

# 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器

周瑜<sup>1,2\*</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 王坤博<sup>1</sup>, 魏晓村<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015;

<sup>2</sup>哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 针对基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的特性展开了研究, 仿真分析了三路信号的直流分项、交流分项以及相位差对双光束薄膜干涉型光纤传声器输出性能的影响。采用对比法, 并通过实验研究了基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出特性, 实现了灵敏度为 193 mV/Pa@1 kHz、频率响应为 200 Hz~4 kHz@±3 dB 的声信号测量。本研究能够很好地应用于声探测、语音识别等领域。

**关键词** 光通信; 光纤传感器; 声传感; 双光束薄膜干涉; 相位解调

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0106001

## Double-Beam Thin-Film Interferometric Fiber Microphone Based on Phase Demodulation

Zhou Yu<sup>1,2\*</sup>, Liu Chao<sup>1</sup>, Wang Kunbo<sup>1</sup>, Wei Xiaocun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China;

<sup>2</sup>College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The performances of a double-beam thin-film interferometric fiber (DBTFIF) microphone based on phase demodulation is studied. The effects of the direct current (DC) subentry, alternating current (AC) subentry and phase difference of three interference signals on the output performances of this DBTFIF microphone are analyzed by simulation. Through the comparison method, the output performances of this DBTFIF microphone based on phase demodulation are studied experimentally as well. The experimental results show that the measurement of acoustic signals with a sensitivity of about 193 mV/Pa at 1 kHz and the frequency response ranging from 200 Hz to 4 kHz with a fluctuation of about ±3 dB can both be achieved. This research can be well used in the fields of acoustic detection, voice recognition, and so on.

**Key words** optical communication; fiber sensor; acoustic sensing; double-beam thin-film interference; phase demodulation

**OCIS codes** 060.2370; 230.1040

## 1 引 言

光纤传声器以其灵敏度高、结构尺寸小、前端无源、不易受电磁干扰、易实现分布式等优点, 被广泛应用于声探测、语音通信以及光声光谱等领域<sup>[1-2]</sup>。迄今为止, 光纤传声器可以分为强度型<sup>[3]</sup>、光栅型<sup>[4]</sup>以及干涉型<sup>[5-6]</sup>。干涉型光纤传声器主要是利用光纤干涉原理实现声信号探测, 具有灵敏度高、结构紧凑等优点, 引起了国内外研究者的广泛关注。2010年, 王巧云等<sup>[7]</sup>提出了基于聚合物薄膜的干涉

型光纤传声器, 通过采用聚合物薄膜作为传声器的振膜, 实现了灵敏度为 31 mV/Pa、频率响应为 0.1~12.7 kHz 的声信号探测。2013年, Ma 等<sup>[8]</sup>提出了基于石墨烯薄膜的干涉型光纤传声器, 采用厚度为 100 nm 的多层石墨烯薄膜, 将声信号转化为谐振腔腔长的变化参量, 实现了频率响应为 0.2~22 kHz 的声信号测量。2016年, Liu 等<sup>[9]</sup>提出了基于紫外胶薄膜的干涉型光纤传声器, 利用紫外胶的表面张力, 制备了传声器的振膜, 实现了灵敏度为 57.3 mV/Pa、频率响应为 1 Hz~2 kHz 的声信号探

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-07-20; 录用日期: 2018-08-23

基金项目: 中国电科联合基金

\* E-mail: zycetc3@163.com

测。同年, Liu 等<sup>[10]</sup>提出了基于 45°斜角光纤的干涉型光纤传声器,通过采用 MEMS 工艺,制备出了带有厚度为 95 nm 银薄膜的敏感结构,该器件能够探测频率响应为 1~6 kHz 的声信号。

当前,干涉型光纤传声器的信号解调主要采用强度解调<sup>[11-12]</sup>,即通过探测经过干涉型光纤传声器作用后的单波长光束的强度变化情况,实现声信号的还原;为了保证解调信号的灵敏度和线性度,光束的波长需稳定在传声器的干涉光谱的正交点(Q点)。强度解调具有简单、响应速度快、成本低廉等优点,但是,干涉型光纤传声器的 Q 点易受温度等环境因素的干扰,产生一定的偏移,从而引起了灵敏度的降低和信号的失真。为了避免温度等环境因素对干涉型光纤传声器的影响, Mao 等<sup>[13]</sup>应用了改进的相位载波算法,通过解调干涉型光纤传声器的相位变化,实现了灵敏度为 40 mV/Pa、频率响应为 100 Hz~12.5 kHz 的声信号探测。但是,基于相位载波的相位解调对激光光源的要求较高,并且需进行载波调制,系统较为复杂,成本较高,而且相位载波解调的频率响应及动态范围受载波频率的限制。三波长相位解调作为另一种相位解调方法,已被广泛应用于光纤振动传感器的振动信号解调<sup>[14-16]</sup>,不仅能够有效地消除温度等环境因素的影响,而且无需对激光光源进行载波调制,系统相对比较简单且成本较低,因此三波长相位解调方法在声信号探测方面也具有很大的潜力。

本文将三波长相位解调算法应用于双光束薄膜干涉型光纤传声器中,研究基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的特性,分析了三路信号的直流(DC)分项、交流(AC)分项以及相位差对双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出性能的影响;搭建了基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的测试平台,测试了基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的灵敏度和频率响应。

## 2 工作原理

基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的工作原理示意图如图 1 所示,主要包含了放大自发辐射(ASE)光源、光环行器(OC)、波分复用器(WDM)、光电探测器(PD)以及信号采集处理模块组成的主机和双光束薄膜干涉型光纤传声器。ASE 光源发出一束包含多个波长的宽谱光,经过光环行器进入双光束薄膜干涉型光纤传声器;利用光环行器将从光纤传声器反射回的包含传感信号的信号光

引入 WDM 中;通过 WDM 选取三个波长的信号,利用信号采集处理模块对选取的信号进行采集和解调。

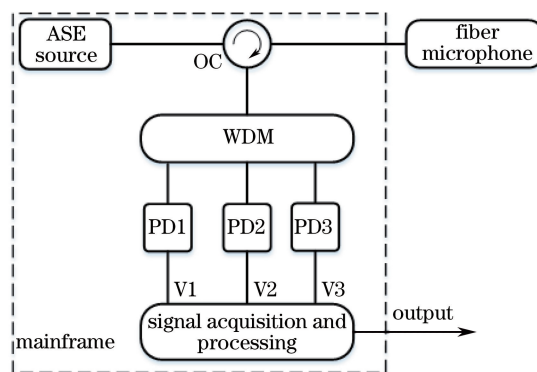


图 1 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation

双光束薄膜干涉型光纤传声器是基于光纤干涉原理的光纤声传感器,其结构如图 2 所示,主要由光纤陶瓷插芯、振膜以及外壳组成。振膜为 3 μm 厚的镍薄膜,固定在封装外壳上;振膜的内表面与光纤陶瓷插芯的端面组成干涉谐振腔,其腔长大小通过封装外壳的螺纹进行调节和固定。当声信号作用在振膜上时,振膜将发生振动,从而引起谐振腔腔长的变化,使得双光束薄膜干涉型光纤传声器的相位发生相应的变化,因此,通过解调出相位的变化,可以实现声信号的解调。由于振膜和光纤陶瓷插芯端面的反射率分别约为 50% 和 4%,都不是很大,因此光纤传声器的输出光近似双光束干涉<sup>[17]</sup>,光强度  $I$  可表示为

$$I = I_A + I_B \cos \left[ \frac{4\pi nd}{\lambda} + \theta(t) + \theta_0 \right], \quad (1)$$

式中:  $I_A$  和  $I_B$  分别为干涉光强度的 DC 分项和 AC 分项;  $n=1$  为谐振腔内空气的折射率;  $\lambda$  为光波长;

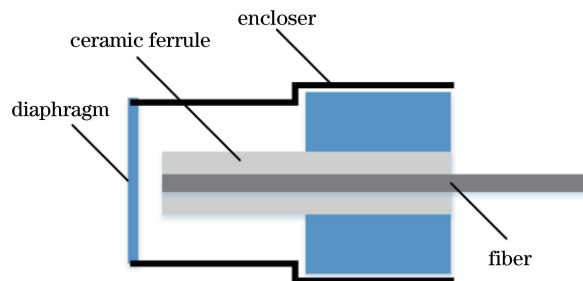


图 2 双光束薄膜干涉型光纤传声器的结构示意图  
Fig. 2 Structural diagram of double-beam thin-film interferometric fiber microphone

$d$  为谐振腔的腔长;  $\theta_0$  为初始相位;  $\theta(t)$  为声信号引起的相位变化。因此, WDM 选取的三个波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  的光信号经过 PD 转化后, 可表示为

$$\begin{cases} V_1 = A_1 + B_1 \cos\left[\frac{4\pi d}{\lambda_1} + \theta(t) + \theta_0\right] \\ V_2 = A_2 + B_2 \cos\left[\frac{4\pi d}{\lambda_2} + \theta(t) + \theta_0\right] \\ V_3 = A_3 + B_3 \cos\left[\frac{4\pi d}{\lambda_3} + \theta(t) + \theta_0\right] \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $A_i$ 、 $B_i$  分别为 DC 分项和 AC 分项,  $i=0,1,2,3$ 。

三波长相位解调算法原理如图 3 所示, 通过精确控制,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  可使  $4\pi d(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)$  和  $4\pi d(1/\lambda_3 - 1/\lambda_2)$  皆为  $120^\circ$ , 同时, 控制电路使得 DC 分项  $A_1 = A_2 = A_3 = A_0$  和 AC 分项  $B_1 = B_2 = B_3 = B_0$ 。那么, (2) 式可以变换为

$$\begin{cases} V_1 = A_0 + B_0 \cos[\theta(t) + \varphi_0] \\ V_2 = A_0 + B_0 \cos[\theta(t) + 2\pi/3 + \varphi_0] \\ V_3 = A_0 + B_0 \cos[\theta(t) + 4\pi/3 + \varphi_0] \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\varphi_0 = 4\pi d/\lambda_1 + \theta_0$ 。由 (3) 式可以看出,  $(V_1 + V_2 + V_3)/3 = A_0$ , 因此,  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  分别经过去直流后, 变为

$$\begin{cases} V'_1 = B_0 \cos[\theta(t) + \varphi_0] \\ V'_2 = B_0 \cos[\theta(t) + 2\pi/3 + \varphi_0] \\ V'_3 = B_0 \cos[\theta(t) + 4\pi/3 + \varphi_0] \end{cases}. \quad (4)$$

经过微分、相减、相乘和相加后, 信号变换为<sup>[16]</sup>

$$V = \frac{3\sqrt{3}}{2} B_0^2 \dot{\theta}(t), \quad (5)$$

式中  $\dot{\theta}(t)$  为  $\theta(t)$  的微分项。另外, 由于  $V'^2_1 + V'^2_2 + V'^2_3 = 3B_0^2/2$ , 因此, (5) 式与之相除并积分后, 输出信号为

$$V_{\text{out}} = \sqrt{3} \theta(t). \quad (6)$$

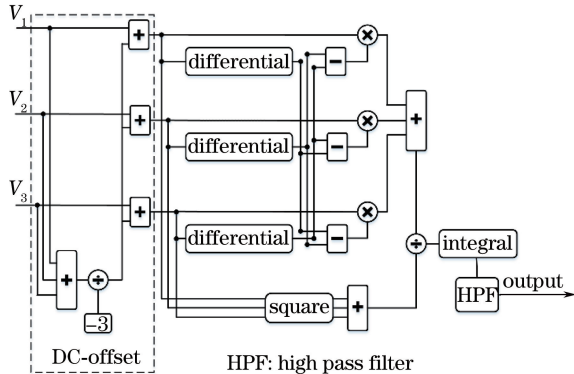


图 3 三波长相位解调算法原理图

Fig. 3 Principle of three-wavelength phase demodulation algorithm

从 (6) 式可以看出, 三波长相位解调算法能够很完整地解调出声信号, 而且由温度等环境因素造成双光束薄膜干涉型光纤传声器的相位变化信号是一个缓变信号, 其频率一般不会超过 0.01 Hz, 因此, 通过采用截止频率为 20 Hz 的高通滤波, 便能够滤除该噪声信号, 避免了环境温度等因素对光纤传声器的影响。

### 3 仿真分析

图 4 为不同声信号频率下基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况, 其中, DC 分项  $A_0$  和 AC 分项  $B_0$  分别为 2 和 1, 初始相位设定

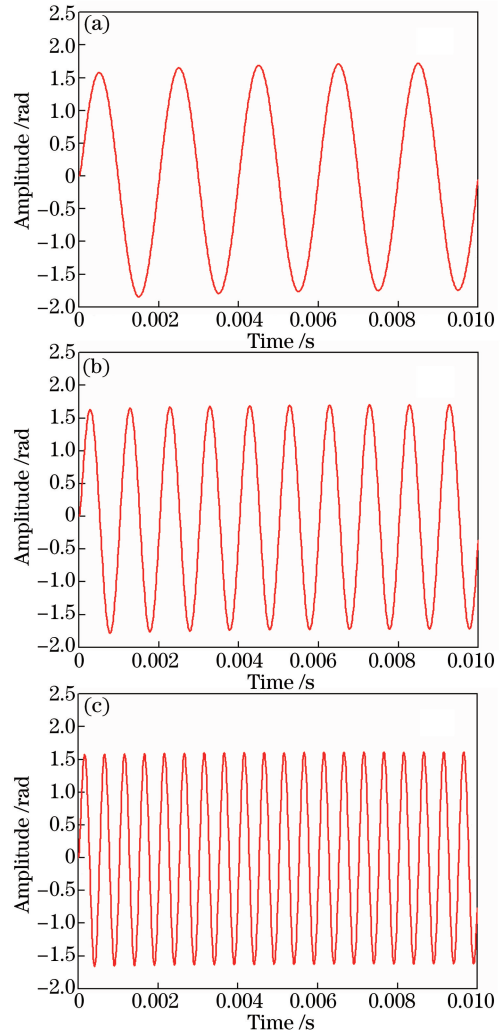


图 4 不同声信号频率下, 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况。(a) 500 Hz; (b) 1000 Hz; (c) 2000 Hz

Fig. 4 Outputs of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation under different signal frequencies. (a) 500 Hz; (b) 1000 Hz; (c) 2000 Hz



为  $2\pi$ 。从图中可以看出,虽然作用于双光束薄膜干涉型光纤传声器的声信号的频率不同,但是,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器仍然能够很好地还原声信号的频率。

从三波长相位解调算法中可以看出,该算法要求双光束薄膜干涉型光纤传声器的三路信号的 DC 分项、AC 分项都相等,且三路信号的相位差为  $120^\circ$ ,但是,在实际中,三路信号的 DC 分项、AC 分项以及相位差都会有微小差别,很难完全保持一致,因此需分析三路信号的 DC 分项、AC 分项以及相位差对基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的影响。

图 5 为当三路信号的相位差偏差分别为  $5^\circ$ 、

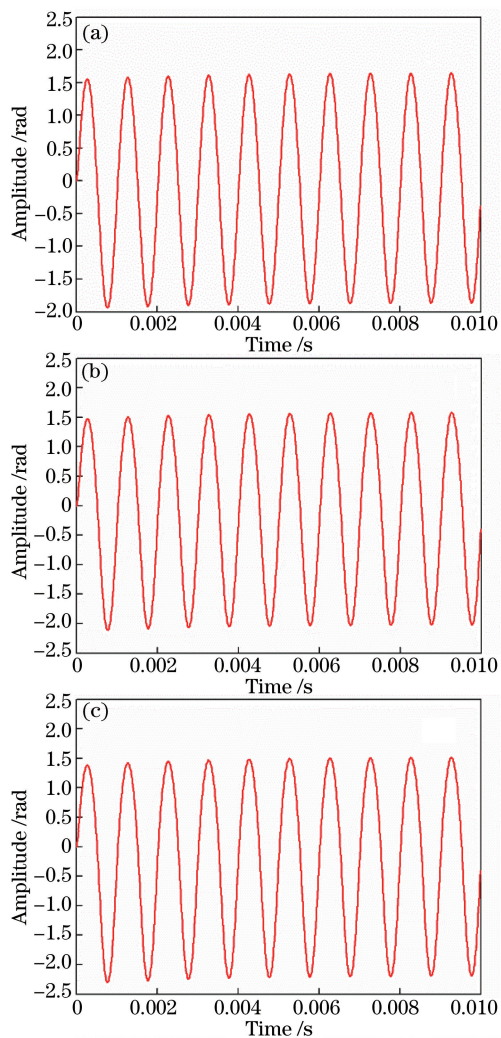


图 5 不同相位差偏差下,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况。(a)  $5^\circ$ ; (b)  $10^\circ$ ; (c)  $15^\circ$

Fig. 5 Outputs of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation under different deviations of phase difference.

(a)  $5^\circ$ ; (b)  $10^\circ$ ; (c)  $15^\circ$

$10^\circ$ 、 $15^\circ$ 时,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况。从图中可以看出,虽然三路信号的相位差有偏差,不能完全保证相位差为  $120^\circ$ ,但是,双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出波形仍为规则的正弦信号,且频率保持不变。不同的是,当三路信号的相位差有偏差时,双光束薄膜干涉型光纤传声器输出信号整体上有一定的倾斜,而且,随着相位差偏差的增大,输出信号的波谷逐渐下降。

图 6 为当三路信号的 DC 分项和 AC 分项的偏差分别为  $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$ 时,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况。从图中可以看出,虽然三路信号的 DC 分项和 AC 分项都存在

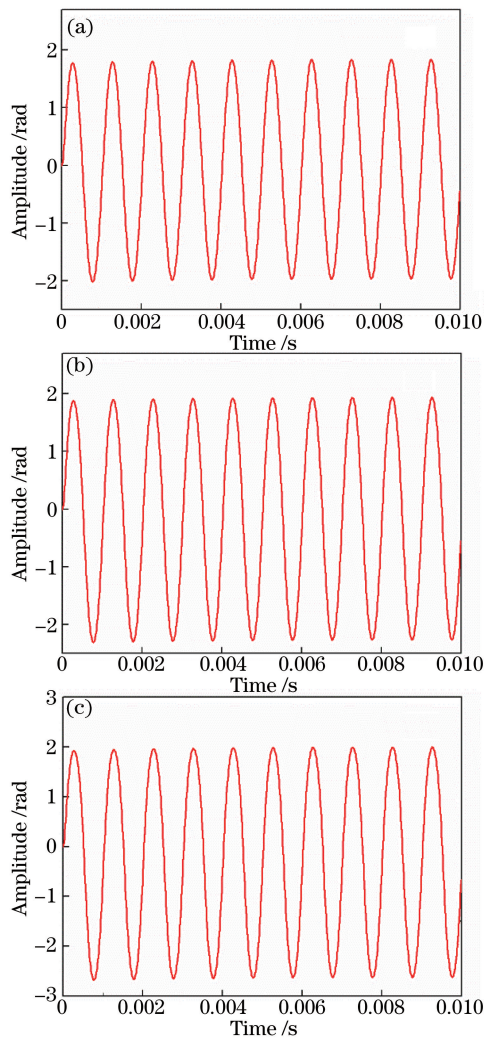


图 6 不同 DC 分项和 AC 分项的偏差下,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出情况。

(a)  $5\%$ ; (b)  $10\%$ ; (c)  $15\%$

Fig. 6 Outputs of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation under different deviations of DC subentry and AC subentry. (a)  $5\%$ ; (b)  $10\%$ ; (c)  $15\%$



较小的偏差,不能完全保证一致,但是,双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出波形仍为规则的正弦信号,且频率保持不变。不同的是,当三路信号的 DC 分项和 AC 分项有偏差时,双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出信号整体上有一定的倾斜,而且,随着 DC 分项和 AC 分项偏差的增大,输出信号的波谷逐渐下降。

### 4 实验研究

基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器主要采用对比法进行测试,测试装置如图 7 所示,主要包括双光束薄膜干涉型光纤传声器的主机、双光束薄膜干涉型光纤传声器、标准传声器、采集卡和扬声器,其中,标准传声器为 BK4190,灵敏度为 50 mV/Pa。在实验中,三路干涉所用的中心波长分别约为 1552.52,1550.12,1547.72 nm,波长之间的间隔为 2.4 nm,由 WDM 进行选取;双光束薄膜干涉型光纤传声器的传输光谱如图 8 所示,其自由光谱范围(FSR)约为 7.2 nm,消光比约为 15 dB,这是通过调节双光束薄膜干涉型光纤传声器的谐振腔实现的;由于双光束薄膜干涉型光纤传声器的 FSR 是三路干涉信号的中心波长之间间隔的 3 倍,且谐振腔由螺纹和金属胶固定,双光束薄膜干涉型光纤传声器的腔长比较稳定,因此,三路干涉信号之间的相位差可以稳定在 120°左右。干涉信号的 DC 分项和 AC 分项的控制电路为自动增益控制(AGC)电路,通过输入信号幅度的变化产生一个相应变化的直流电压(AGC 电压),利用 AGC 电压去控制可变增益放大器的放大倍数,具有很好的稳定性。

图 9 为不同声信号频率下,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的测试输出示意图。从图中可以看出,双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出波形的频率基本与标准传声器一致,这意味着基

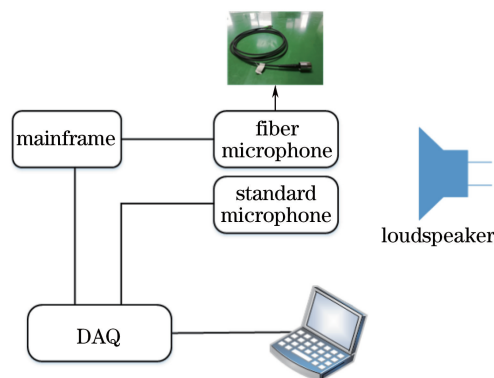


图 7 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的测试装置图

Fig. 7 Experimental setup of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation

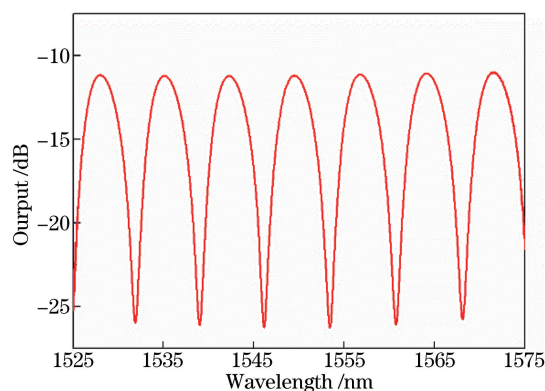


图 8 双光束薄膜干涉型光纤传声器的传输光谱

Fig. 8 Transmission spectrum of double-beam thin-film interferometric fiber microphone

于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器能够很好地还原声信号的频率,而且其灵敏度远高于标准传声器;当声信号的频率为 1000 Hz 时,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的灵敏度约为 193 mV/Pa。同时,可以看出,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器输出的波形存在一定程度的不规整,这是由三路信号的 DC 分项、AC 分项以

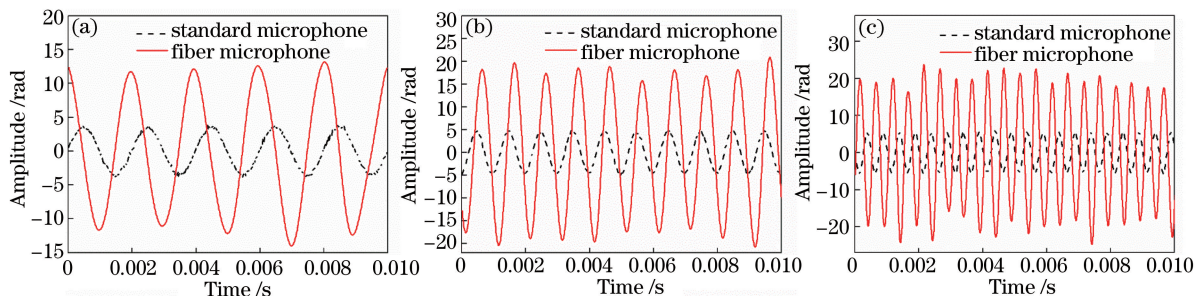


图 9 不同声信号频率下,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的测试结果。(a) 500 Hz; (b) 1000 Hz; (c) 2000 Hz

Fig. 9 Test results of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation for different signal frequencies. (a) 500 Hz; (b) 1000 Hz; (c) 2000 Hz

及三者之间的相位差存在一定的偏差造成的。图 10 为基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的频率响应,图 10 纵轴为相对 50 kV/Pa 下的灵敏度。从图中可以看出,双光束薄膜干涉型光纤传声器的频率响应较为平坦,当频率从 200 ~ 4000 Hz 变化时,双光束薄膜干涉型光纤传声器的频率响应波动在  $\pm 3$  dB 以内。

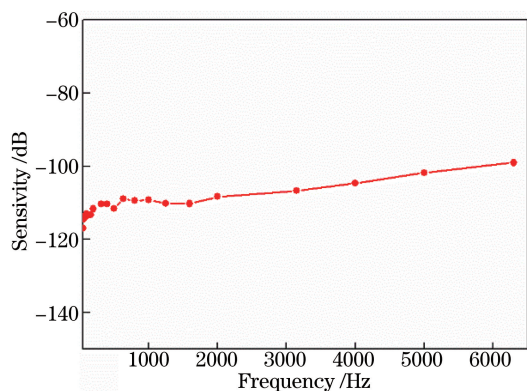


图 10 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的频率响应

Fig. 10 Frequency response of double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation

## 5 结 论

对基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的特性展开了研究,分析发现三路信号的 DC 分项、AC 分项以及三者之间的相位差的微小偏差对双光束薄膜干涉型光纤传声器的输出信号的影响较小。在实验中,采用对比法对基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器的性能进行了测试,测试结果表明,基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器能够很好地还原出声信号的频率,且其灵敏度为 193 mV/Pa@1 kHz,频率响应为 200 Hz~4 kHz@ $\pm 3$  dB。本研究能够为干涉型光纤传声器在声探测、语音识别等领域的应用提供很好的支撑。

## 参 考 文 献

[1] Wang X H, Zhang W C, Zhao H, *et al.* Impact of liquid insulation on characteristic parameters of fiberbry-erot partial discharge induced ultrasound sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0406005.  
王学会, 张伟超, 赵洪, 等. 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0406005.

[2] Chen K, Yuan S, Gong Z F, *et al.* Ultra-high sensitive photoacoustic spectrometer for trace gas detection based

on fiber-optic acoustic sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328015.

陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328015.

- [3] Ding P, Dong X P. Theoretical and experimental research on fiber-optic microphone using multimode fiber lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060603.  
丁朋, 董小鹏. 采用多模光纤透镜的光纤麦克风理论与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060603.
- [4] Bandutunga C P, Fleddermann R, Gray M B, *et al.* All-optical low noise fiber Bragg grating microphone[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5570-5574.
- [5] Wu D F, Jia B. Theoretical and experimental research of all-fiber microphone based on M-z interferometer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1528-1530.  
吴东方, 贾波. 基于 M-Z 动态干涉仪的全光纤麦克风研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1528-1530.
- [6] Liu L, Lu P, Liao H, *et al.* Fiber-optic Michelson interferometric acoustic sensor based on a PP/PET diaphragm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 3054-3058.
- [7] Wang Q, Yu Q. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(3): 266-269.
- [8] Ma J, Xuan H F, Ho H L, *et al.* Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 932-935.
- [9] Liu L, Lu P, Wang S, *et al.* UV adhesive diaphragm-based FPI sensor for very-low-frequency acoustic sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 6800709.
- [10] Liu B, Lin J, Wang J, *et al.* MEMS-based high-sensitivity Fabry-Perot acoustic sensor with a 45° angled fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(5): 581-584.
- [11] Wang W, Wu N, Tian Y, *et al.* Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9006-9014.
- [12] Wang K B, Zhou Y, Liu C, *et al.* The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(5): 438-444.  
王坤博, 周瑜, 刘超, 等. 强度解调的 F-P 干涉型光纤传声器[J]. *应用声学*, 2017, 36(5): 438-444.
- [13] Mao X F, Tian X R, Zhou X L, *et al.* Characteristics of

- a fiber-optical Fabry-Perot interferometric acoustic sensor based on an improved phase-generated carrier-demodulation mechanism[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(4): 046107.
- [14] Schmidt M, Fürstenau N. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with three-wavelength digital phase demodulation[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 599-601.
- [15] Jiang Y, Chen S F. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on  $3\times 3$  coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1487-1490.
- 江毅, 陈淑芬. 用  $3\times 3$  耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1487-1490.
- [16] Jiang Y. Passive interrogation of an extrinsic Fabry-Pérot interferometer using a three-wavelength method[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(6): 064401.
- [17] Chen W M, Lei X H, Zhang W, *et al.* Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328010.
- 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328010.