光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021080201

基于双波长解调的光纤干涉型传声器研究

崔丽兰，田杨萌*

（北京信息科技大学 理学院，北京 100192）

摘　要： 提出了一种基于双波长解调的光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot,FP)干涉型传声器，采用归一化算法和微分交叉相乘处理(DCM)算法，实现了声信号的准确还原。在归一化算法中，利用椭圆拟合，实现了两路波长光信号的归一化，减小了激光器输出波动对光纤FP干涉型传声器输出特性的影响；在DCM算法中，通过信号处理及滤波，实现了声信号的准确输出，减小了温度等环境因素对光纤FP干涉型传声器输出特性的影响。在实验中，采用对比法，测试了基于双波长解调的光纤FP干涉型传声器的特性，结果显示器件实现了灵敏度为210 mV/Pa、频率响应为100～3 150 Hz的声信号测量，能够很好地应用于语音识别、噪声测量、空气声探测等领域。

关键词： 光纤传感器；光纤传感；相位解调；法布里-珀罗干涉

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0828－06

Research on The Optical Fiber Interference Microphone with Dual Wavelength Demodulation

CUI Lilan, TIAN Yangmeng

(College of Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: The optical fiber Fabry-Perot (FP) interference microphone with dual wavelength demodulation is demonstrated. By adopting the normalization algorithm and differential cross multiplication (DCM) algorithm, the acoustic signal is accurately restored. In the normalization algorithm, through ellipse fitting, the optical signal with two-way wavelength is normalized, which can reduce the influence of the output fluctuation of laser on the output of optical fiber FP interference microphone. In the DCM algorithm, through signal processing and filtering, the accurate output of acoustic signal is realized, and the influence of temperature and other environmental factors on the output of optical fiber FP interference microphone is reduced. In the experiment, the characteristics of optical fiber FP interference microphone based on dual wavelength demodulation are tested by contrast method. The acoustic signal with sensitivity of 210 mV/Pa and frequency response of 100～3 150 Hz is realized, which can be well applied in the fields of speech recognition, noise measurement and airborne acoustic detection.

Key words: fiber optics sensors; optical fiber sensing; phase demodulation; Fabry-Perot interference

0　引言

传声器作为一种用于声信号拾取的传感器，已广泛应用于语音拾取、噪声测量、空气声探测等领域。光纤传声器是一种新型的主要以光波作为载体的传声器，可实现声信号的还原，其优点是结构紧凑、灵敏度较高、不受电磁干扰、易复用等[1]。根据光纤传声器的工作原理，可以分为光纤强度型传声器[2-3]、光纤光栅型传声器[4]和光纤干涉型传声器[5-6]。对于光纤干涉型传声器，光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot,FP)干涉型传声器以灵敏度高、结构简单小巧、成本低廉等优点[7-9]，引起了国内外研究者们

收稿日期：2021－08－02.

* 通信作者：田杨萌

的关注。2010 年，王巧云等基于聚合物薄膜，制备了灵敏度为 31 mV/Pa、频率响应为 0.1～12.7 kHz 的光纤 FP 干涉型传声器[10]。2016 年，Liu 等采用 MEMS 加工工艺，制备了基于 45°倾斜端面光纤和厚度为 95 nm 银薄膜的光纤 FP 干涉型传声器，可实现频率响应为 1～6 kHz 的声信号测量[11]。同年，Liu 等采用 1 mm 半径的 UV 胶振膜，制备了灵敏度为 57.3 mV/Pa、频率响应为 1～2 000 Hz 的光纤 FP 干涉型传声器[12]。2017 年，Wu 等提出一种基于氧化石墨烯薄膜的光纤 FP 干涉型传声器，可实现频率响应为 100 Hz～20 kHz 的声信号测量[13]。

由于光纤 FP 干涉型传声器的输出信号是加载声信号的光波信号，因此，需要对光纤 FP 干涉型传声器的输出信号进行解调，才能够准确还原声信号。当前，光纤 FP 干涉型传感器的解调主要有强度解调[13-15]、波长解调[16]以及相位解调[17]。强度解调作为光纤 FP 干涉型传声器最常用的解调方法，主要是通过测量光纤 FP 干涉型传声器的输出光的强度，实现声信号的还原，具有简单、成本低廉等优点[15]。将光纤 FP 干涉型传声器的工作波长稳定在其工作点处可以确保实现解调声信号的准确性和稳定性，但是，光纤 FP 干涉型传声器的干涉腔易受温度等环境因素的干扰，造成光纤 FP 干涉型传声器的工作点产生一定的偏移，从而引起灵敏度降低和信号失真。温度等环境因素对光纤 FP 干涉型传声器的影响不可忽视，为减小其影响，Mao 等选取相位解调，采用改进的相位载波算法，实现了灵敏度为 40 mV/Pa、频率响应为 100 Hz～12.5 kHz 的声信号测量[18]；刘超等采用反正切相位载波算法，利用数字化归一化参数实时估计方法和相位累加算法，实现了灵敏度为 273 mV/Pa、频率响应为 50 Hz～5 kHz 的声信号测量[19]。但是，相位载波算法需对激光器进行载波调制，系统较为复杂，成本较高，而且，相位载波解调的声信号的输出幅度、频率响应及动态范围受激光器和载波频率的限制。作为另一种相位解调方法，三波长解调不仅能够减小激光器输出波动和温度等环境因素对解调信号的影响，而且，激光器不需要进行载波调制，解调系统相对比较简单、成本较低，已被广泛应用于光纤干涉型传感器的信号解调[20-24]。但是，三波长解调需要使用三个不同中心波长的激光器，不易于大规模复用。

本文研究基于双波长解调的光纤法布里-珀罗干涉型传声器的特性，采用归一化算法和微分交叉相乘（DCM）算法，实现了声信号的准确还原。在归一化算法中，通过椭圆拟合，得到两路光信号的各项参数，实现了两路光信号的归一化，减小了激光器输出波动对光纤 FP 干涉型传声器输出特性的影响。在 DCM 算法中，通过信号处理及滤波，得到了原始声信号，实现了声信号的准确输出，减小了温度等环境因素对光纤 FP 干涉型传声器输出特性的影响。实验采用对比法，进行基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器特性的测试，实现了灵敏度为 210 mV/Pa、频率响应为 100～3 150 Hz 的声信号测量。

1　工作原理

基于双波长相位解调的光纤 FP 干涉型传声器工作原理框图如图 1 所示，主要包含由激光器、波分复用器（WDM）、光环形器、光电探测器（PD）组成的解调光路，光纤 FP 干涉型传声器，信号采集卡和电脑。两个激光器分别发出波长为 λ_1 和 λ_2 的光波，先通过 WDM 进行复用，再传输至光环形器的输入端，最后通过光环形器的输出端进入光纤 FP 干涉型传声器。经过光环形器的反射端，将从光纤 FP 干涉型传声器反射回的光信号引入 WDM 中；通过 WDM 的解复用，将波长为 λ_1 和 λ_2 的光波进行分离，进入 PD 进行光电转换，生成电信号，进入信号采集处理模块进行信号采集和解调。

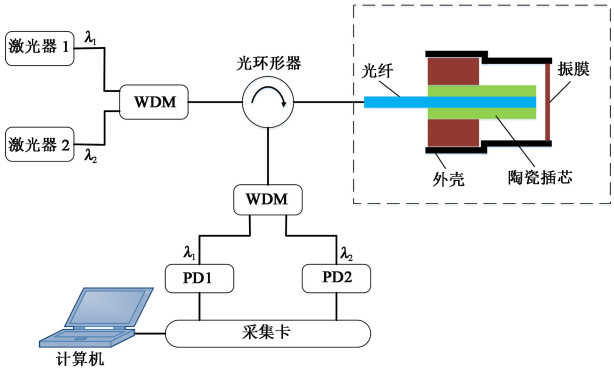


图 1　基于双波长相位解调的光纤 FP 传声器工作原理示意图

光纤 FP 干涉型传声器主要由外壳、振膜和光纤和陶瓷插芯组成。振膜固定在外壳上，其内表面与光纤陶瓷插芯的端面组成 FP 谐振腔，实现 FP 干涉。谐振腔的腔长可以通过封装外壳的螺纹进行调节和固定。当受到声信号作用时，振膜将发生振动，

使得 FP 谐振腔腔长发生变化。FP 谐振腔腔长的变化将使得光纤 FP 干涉型传声器的相位发生变化，因此，通过解调相位变化，就能够准确解调出声信号。光纤 FP 干涉型传声器的输出光强度 I 近似双光束干涉[25]，可表示为

$$I = I_a + I_b \cos\left[\varphi(t) + \frac{4\pi nL}{\lambda} + \varphi_0\right] \tag{1}$$

其中，λ 为光波长，I_a 和 I_b 分别为输出光的直流分项和交流分项，$n=1$ 为谐振腔内空气的折射率，$\varphi(t)$为声信号，L 为谐振腔的腔长，φ_0 为初始相位。因此，经过 PD 转化后，两个波长 λ_1 和 λ_2 的信号可表示为

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{a1} + I_{b1} \cos\left[\varphi(t) + \frac{4\pi nL}{\lambda_1} + \varphi_0\right] \\ I_2 &= I_{a2} + I_{b2} \cos\left[\varphi(t) + \frac{4\pi nL}{\lambda_2} + \varphi_0\right] \end{aligned} \tag{2}$$

通过控制光纤 FP 传声器的腔长以及 λ_1 和 λ_2，使得 $4\pi L(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)$为 90°。同时，考虑到光纤 FP 传声器的腔长在制备中存在一定误差，因此，$4\pi L(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)$ 在 90°会有一定的偏差。那么，式(2)可以变换为

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{a1} + I_{b1}\cos[\varphi(t) + \Phi_0] \\ I_2 &= I_{a2} + I_{b2}\cos[\varphi(t) + \Phi_0] + I_{c2}\sin[\varphi(t) + \Phi_0] \end{aligned} \tag{3}$$

其中，$\Phi_0 = 4\pi L/\lambda_1 + \varphi_0$。

光纤 FP 干涉型传声器的双波长解调主要采用归一化算法和 DCM 算法，如图 2 所示，主要包含归一化、微分、交叉相乘相减以及积分滤波过程。

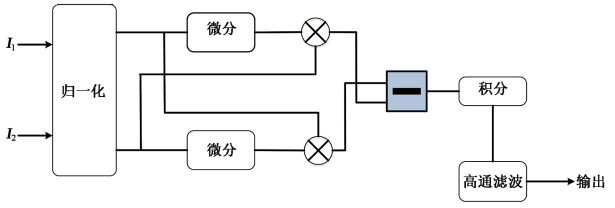


图 2 光纤 FP 干涉型传声器的双波长解调过程示意图

光纤 FP 干涉型传声器的归一化主要采用椭圆拟合算法[26-28]来确定干涉光强度的直流分项 I_{a1}，I_{a2} 和交流分项 I_{b1}，I_{c2}，I_{d2}，从而实现两路光信号的归一化。从式(3)可以看出，I_1 和 I_2 可以形成一个稳定的椭圆，其椭圆方程为

$$I_1^2 + m_1 I_1 I_2 + m_2 I_2^2 + m_3 I_1 + m_4 I_2 + m_5 = 0 \tag{4}$$

其中，m_1，m_2，m_3，m_4，m_5 为待定系数，与直流分项 I_{a1}，I_{a2} 和交流分项 I_{b1}，I_{b2}，I_{c2} 的关系为

$$\begin{cases} I_{a1} = \dfrac{2m_2 m_3 - m_1 m_4}{m_1^2 - 4m_2} \\ I_{a2} = \dfrac{2m_4 - m_1 m_3}{m_1^2 - 4m_2} \\ I_{c2}^2 = \dfrac{1}{m_2}(I_{a1}^2 + m_2 I_{a2}^2 + m_1 I_{a1} I_{a2} - m_5) \\ I_{b2}^2 = \dfrac{m_1^2}{4m_2 - m_1^2} I_{c2}^2 \\ I_{b1} = -\dfrac{2m_2}{m_1} I_{b2} \end{cases} \tag{5}$$

最小二乘法是椭圆拟合的一种有效方法，其原理是使所采集的数据到拟合结果曲线间的距离之和最小，而求出一组最优的椭圆系数[26]。因此，椭圆系数应满足以下方程组[26]：

$$\begin{cases} Y(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5) = \sum_{i=1}^{N} (I_{1i}^2 + m_1 I_{1i} I_{2i} + \\ m_2 I_{2i}^2 + m_3 I_{1i} + m_4 I_{2i} + m_5)^2 \\ \dfrac{\partial Y}{\partial m_1} = \dfrac{\partial Y}{\partial m_2} = \dfrac{\partial Y}{\partial m_3} = \dfrac{\partial Y}{\partial m_4} = \dfrac{\partial Y}{\partial m_5} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

其中，N 为用于拟合的样本点数量。为了保证方程组(6)具有唯一最优解，引入约束条件 $4m_2 - m_1^2 = 1$，因此，方程组(6)可以表征为[27]

$$\begin{cases} \min \|\boldsymbol{Dm}\|^2 \\ \boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} \boldsymbol{m} = 1 \end{cases} \tag{7}$$

其中，$\boldsymbol{m} = [1, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5]^{\mathrm{T}}$ 是椭圆系数向量；$\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 分别是所采集数据矩阵和中间矩阵：

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} I_{1,1}^2 & I_{1,1} I_{2,1} & I_{2,1}^2 & I_{1,1} & I_{2,1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{1,i}^2 & I_{1,i} I_{2,i} & I_{2,i}^2 & I_{1,i} & I_{2,i} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{1,N}^2 & I_{1,N} I_{2,N} & I_{2,N}^2 & I_{1,N} & I_{2,N} & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

通过引入拉格朗日因子 λ，使用拉格朗日乘数法，可将方程组(6)写为

$$\begin{cases} \boldsymbol{Sm} = \lambda \boldsymbol{H} \boldsymbol{m} \\ \boldsymbol{m}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{H} \boldsymbol{m} = 1 \end{cases} \tag{10}$$

利用求广义特征向量的方法，根据方程组(8)可解出椭圆系数向量 $\boldsymbol{m}$，得到椭圆系数 m_1，m_2，m_3，m_4 和 m_5。根据式(5)，确定干涉光强度的直流分项 I_{a1}，I_{a2} 和交流分项 I_{b1}，I_{b2}，I_{c2}，实现两个波长 λ_1 和 λ_2 的光信号的归一化，减小了系统光源对光纤 FP 传声器输出特性的影响。

归一化后的两路信号可表征为

$$\begin{cases} I_1 = \cos[\varphi(t) + \Phi_0] \\ I_2 = \sin[\varphi(t) + \Phi_0] \end{cases} \tag{11}$$

利用 DCM 算法[29-30]，经过微分交叉相乘处理后，两路信号则变为

$$\begin{cases} I'_1 = -\sin^2[\phi(t) + \Phi_0]\phi'(t) \\ I'_2 = \cos^2[\phi(t) + \Phi_0]\phi'(t) \end{cases} \tag{12}$$

相减后进行积分可得到声信号 $\varphi(t)$。由于温度等环境因素造成光纤 FP 干涉型传声器的相位变化信号是一个缓变信号，因此，通过高通滤波，便可以滤除该噪声信号，避免温度等环境因素对光纤传声器的影响。

2　实验研究

双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的测试系统装置如图 3 所示。测试系统采用对比法，主要包括光纤 FP 干涉型传声器、标准传声器、光纤 FP 干涉型传声器的解调光路、采集卡和信号发生器、电脑以及扬声器。测试采用灵敏度为 50 mV/Pa 的标准传声器 G. R. A. S. 46AE。光纤 FP 干涉型传声器的传输光谱如图 4 所示，其自由光谱范围(FSR)约为 3.2 nm，消光比约为 17 dB。

对不同频率声信号下的基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的测试情况如图 5 所示。从图中可以看出，光纤 FP 干涉型传声器输出的声信号的频率与标准传声器输出的声信号较为一致，表明基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器可以很好地

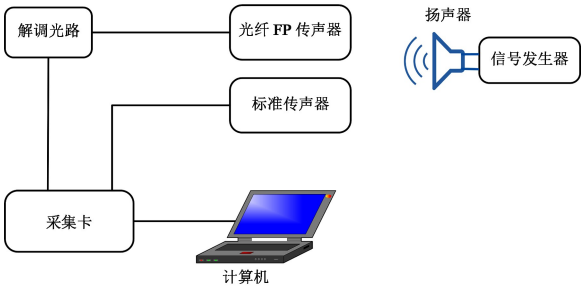


图 3　基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的测试系统装置图

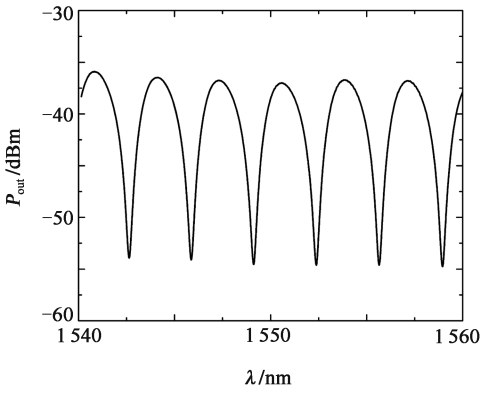
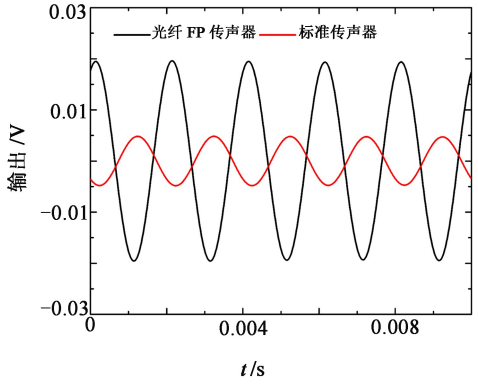
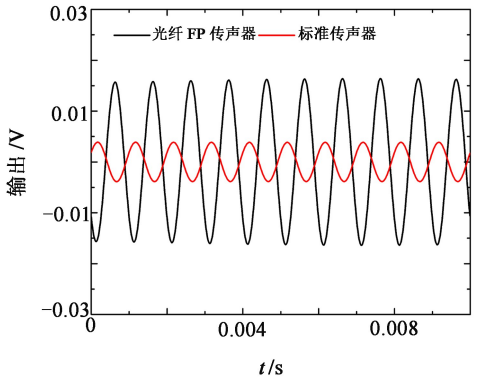


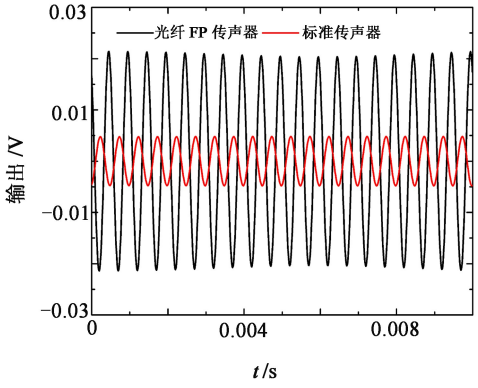
图 4　光纤 FP 干涉型传声器的传输光谱



(a)　500 Hz



(b)　1 kHz



(c)　2 kHz

图 5　不同声信号频率下的基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的测试情况

实现声信号的还原。同时,光纤 FP 干涉型传声器输出声信号的幅值远高于标准传声器输出声信号的幅值。在 500 Hz 的声信号下,光纤 FP 干涉型传声器与标准传声器输出声信号的幅值分别约为 0.02 和 0.004 6 V;在 1 kHz 的声信号下,二者输出声信号的幅值分别约为 0.016 4 和 0.003 9 V;在 2 kHz 的声信号下,二者输出声信号的幅值分别约为 0.022 和 0.004 7 V。这就意味着,基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的灵敏度远高于标准传声器,当声信号的频率为 1 kHz 时,基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的灵敏度约为 210 mV/Pa,其频率响应如图 6 所示。可以看出,其频率响应较为平坦,当声信号频率在 100～3 150 Hz 范围内时,其频率响应波动在±3 dB。

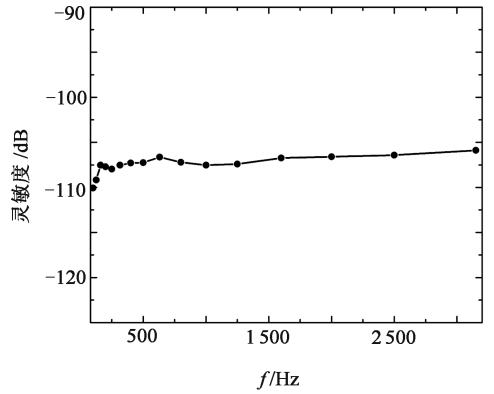


图 6 基于双波长相位解调的光纤 FP 传声器的频率响应

3 结论

本文研究了基于双波长解调的光纤 FP 传声器的特性,采用归一化算法和微分交叉相乘处理(DCM)算法,实现了声信号的准确还原。在归一化算法中,通过椭圆拟合,得到两路光信号的各项参数,实现了两路光信号的归一化,减小了激光器输出波动对光纤 FP 干涉型传声器输出特性的影响。在 DCM 算法中,通过信号处理及滤波,得到了原始声信号,实现了声信号的准确输出,减小了温度等环境因素对光纤 FP 干涉型传声器输出特性的影响。实验采用对比法,进行了基于双波长解调的光纤 FP 干涉型传声器的特性测试,实现了声信号测量,其灵敏度为 210 mV/Pa,频率响应为 100～3 150 Hz。可以应用于噪声测量、语音识别、空气声探测等领域。

参考文献:

[1] Kirkendall C, Cole J H, Tveten A B, et al. Progress in fiber optical acoustic and seismic sensing[C]// OFS Conf., 2006: ThB1.

[2] 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): 83-87.
Ding P, Dong X P. Theoretical and experimental research on fiber-optic microphone using multimode fiber lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 83-87.

[3] 于洪峰, 王 伟, 王世宁, 等. 一种基于感声波纹结构的光学式声传感器[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(9): 68-70.
Yu Hongfeng, Wang Wei, Wang Shining, et al. An optical acoustic sensor based on acoustics-sensitive corrugated configuration[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(9): 68-70.

[4] Bandutunga C P, Fleddermann R, Gray M B, et al. All-optical low noise fiber Bragg grating microphone[J]. Appl. Opt., 2016, 55(21): 5570.

[5] 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.
Wu D F, Jia B. Theoretical and experimental research of all-fiber based on M-Z interferometer[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 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 J., 2016, 16(9): 3054-3058.

[7] Wonuk Jo, Akkaya O C, Solgaard Olav, et al. Miniature fiber acoustic sensors using a photonic-crystal membrane [J]. Optical Fiber Technol., 2013, 19(6): 785-792.

[8] Ames Gregory H, Maguire Jason M. Miniaturized mandrel-based fiber optic hydrophone[J]. J. of The Acoustical Society of America, 2007, 121(3): 1392-1395.

[9] 吴梓楠, 唐冬林, 张旭辉, 等. 宽带啁啾光纤光栅 F-P 腔磁场传感器研究[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(11): 61-64, 68.
Wu Zinan, Tang Donglin, Zhang Xuhui, et al. Research on F-P cavity magnetic field sensor based on broadband chirped FBG [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38 (11): 54-57.

[10] Wang Q, Yu Q. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. Chinese Opt. Lett., 2010, 8(3): 266-269.

[11] Liu Bin, Lin Jie, Wang Jian, et al. MEMS-based high-sensitivity Fabry-Perot acoustic sensor with a 45° angled fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(5): 581-584.

[12] Liu Li, Lu Ping, Wang Shun, et al. UV adhesive diaphragm-based FPI sensor for very-low-frequency acoustic sensing[J]. IEEE Photonics J., 2016, 8(1): 1-9.

[13] Wu Yu, Yu Caibin, Wu Fan, et al. A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane[J]. J. of Lightwave Technol., 2017, 35(19): 4344-4349.

[14] Wang W, Wu N, Tian Y, et al. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm [J]. Opt. Express, 2010, 18(9): 9006-9014.

[15] Wang K B, Zhou Y, Liu C, et al. The F-P interferometric fiber optic microphone with intensity demodulation[J]. J. of Appl. Acoustics, 2017, 36(5): 438-444.

[16] 胡　晨，陶　青，周　舟，等. 多峰 F-P 干涉传感信号光谱的波长寻峰算法研究[J]. 传感器与微系统，2020，39(6)：30-32，36.
Hu Chen, Tao Qing, Zhou Zhou, et al. Study of multi-peaks F-P interference sensing signal spectrum wavelength peak seeking algorithm [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(6): 30-32, 36.

[17] Qi Bing, Winder D E, Liu Y. Quadrature phase-shifted optical demodulator for low-coherence fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. Opt. Express, 2019, 27(5): 7319-7329.

[18] Mao X, Tian X, Zhou X, et al. Characteristics of a fiber-optical Fabry-Perot interferometric acoustic sensor based on an improved phase-generated carrier-demodulation mechanism[J]. Opt. Engineering, 2015, 54(4): 046107.

[19] 刘　超，周　瑜，王坤博，等. 基于相位生成载波解调的光纤 FP 干涉型传声器的研究[J]. 电声技术，2018，42(5)：12-16.
Liu Chao, Zhou Yu, Wang Kunbo, et al. Research on fiber Fabry-Perot microphone with phase generated carrier demodulation[J]. Audio Engineering, 2018, 42(5): 12-16.

[20] Schmidt M, Fürstenau N. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with three-wavelength digital phase demodulation[J]. Opt. Lett., 1999, 24(9): 599-601.

[21] 江　毅，陈淑芬. 用 3×3 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.
Jiang Y, Chen S F. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler[J]. Acta Optica Sinca, 2004, 24(11): 1487-1490.

[22] Jiang Y, Tang C. Passive interrogation of an extrinsic Fabry-Pérot interferometer using a three-wavelength method[J]. Opt. Engineering, 2009, 48(6): 064401.

[23] 周　瑜，刘　超，王坤博，等. 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器[J]. 光学学报，2019，39(1)：308-314.
Zhou Yu, Liu Chao, Wang Kunbo, et al. Double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demdodulation[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 308-314.

[24] 高晓丹，彭建坤. 基于敏感薄膜的 F-P 光纤温度传感器的高温特性[J]. 半导体光电，2020，41(1)：25-28，34.
Gao Xiaodan, Peng Jiankun. Study on high temperature characteristics of F-P fiber temperature sensor based on sensitive film[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(1): 25-28, 34.

[25] 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.
Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. Acta Optica Sinca, 2018, 38(3): 0328010.

[26] 曾周末，刘　芳，封　皓，等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J]. 光学精密工程，2014，22(6)：1410-1417.
Zeng Zhoumo, Liu Fang, Feng Hao, et al. Digitalized demodulation based on 3 × 3 coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1410-1417.

[27] 王　丹，廖延彪，张　敏. 双光束干涉仪中椭圆拟合估算的参数精度研究[J]. 光学学报，2016，36(3)：105-110.
Wang Dan, Liao Yanbiao, Zhang Min. Analysis of precisions of parameters calculated by ellipse fitting in double beam interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 105-110.

[28] 王　伟，唐　瑛，张雄星，等. 短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器椭圆拟合腔长解调算法[J]. 光学学报，2019，39(6)：50-57.
Wang Wei, Tang Ying, Zhang Xiongxing, et al. Elliptical-fitting cavity length demodulation algorithm for compound fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor with short cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 50-57.

[29] Fang Gaosheng, Xu Tuanwei, Li Fang. 16-channel fiber laser sensing system based on phase generated carrier algorithm[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(22): 2185-2188.

[30] Liu Bin, Lin Jie, Liu Huan, et al. Diaphragm based long cavity Fabry-Perot fiber acoustic sensor using phase generated carrier[J]. Opt. Commun., 2017, 382: 514-518.

作者简介：

崔丽兰(1992—)，女，陕西省人，硕士研究生，从事传声器与传声器定位研究；

田杨萌(1963—)，女，博士，教授，研究方向包括声信号识别、处理与定位。