

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514439

# 基于瞬态扫频干涉的光纤法珀压力 传感器快速解调方法\*

程小峻,雷小华,许亨艺,章 鹏,刘显明

(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

**摘 要:** 光纤法珀压力传感器对动态压力具有较高的灵敏度,能够准确地反映动态压力信息,常用于动态压力测量当中。基于此,采用光纤法珀压力传感器来采集和测量动态冲击压力。为便于光纤法珀压力传感器冲击压力及其频率响应的现场测试,基于瞬时扫频干涉模型,分析了法珀腔长动态变化对应干涉光谱的时变特征;通过对原始干涉光谱进行傅里叶变换,并使用汉明窗截取正频率,然后反傅里叶变换回时域得到解析信号及其相位信息,即可求解出动态腔长。为进一步求解传感器频率响应信息,通过对干涉光谱进行泰勒展开分析,再对傅里叶变换得到的频率信息进行加减运算得到传感器的频率响应。该解调过程全部无需进行多普勒误差补偿,仅利用傅里叶变换即可快速求解动态腔长及其频率响应,最高解调速率可达 10 MHz。最终该解调模型与单波长强度解调模型进行了对比,两支压力传感器的频率解调的相对误差分别 $<1\%$ 和 $0.7\%$ ,压力解调的相对误差分别 $<0.1\%$ 和 $0.08\%$ ,频率和压力解调的误差均很小。通过实验可以证明,所提出的解调模型非常适合于光纤法珀压力传感器冲击压力及其频率响应的快速测量。同时相对于传统的解调模型,所提出的解调模型速度更快且操作流程更加的简单,更加适合于现场环境较差的测量环境。

**关键词:** 瞬时扫频干涉;傅里叶变换;光纤法珀;解析信号;泰勒展开

**中图分类号:** TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## A rapid demodulation method for fiber Fabry-Perot pressure sensors based on instantaneous frequency-swept interference

Cheng Xiaojun, Lei Xiaohua, Xu Hengyi, Zhang Peng, Liu Xianming

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Fiber Fabry-Perot pressure sensors exhibit high sensitivity to dynamic pressure and can accurately capture instantaneous pressure variations; thus, they are widely used in dynamic pressure measurements. Based on this capability, the present study employs an optical fiber Fabry-Perot pressure sensor to acquire and measure dynamic impact pressure. To facilitate field testing of the impact pressure and frequency response of the fiber Fabry-Perot pressure sensor, the proposed method establishes an instantaneous frequency-swept interference model and analyzes the time-varying characteristics of the interference spectrum induced by dynamic variations in the cavity length. By performing a Fourier transform on the raw interference spectrum, applying a Hamming window to retain the positive-frequency components, and subsequently executing an inverse Fourier transform to obtain the analytic signal and its phase, the dynamic cavity length can be extracted. To further obtain the sensor's frequency-response characteristics, a Taylor expansion of the interference spectrum is conducted, and frequency components obtained from the Fourier transform are processed through addition and subtraction operations to derive the sensor's frequency response. The entire demodulation procedure requires no Doppler error compensation; instead, the dynamic cavity length and frequency response can be rapidly retrieved solely through Fourier-transform operations, enabling a maximum demodulation rate of up to 10 MHz. Finally, the proposed demodulation model is compared with a single-wavelength intensity demodulation method. The relative frequency-demodulation errors of the two pressure sensors are less than 1% and 0.7%, respectively, while the relative pressure-demodulation errors are below 0.1% and 0.08%. Both frequency and pressure demodulation exhibit very small errors. Experimental results

收稿日期:2025-08-29 Received Date: 2025-08-29

\* 基金项目:国家自然科学基金(52175530,52475547)、重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2025NSCQ-LZX0005)项目资助

demonstrate that the proposed demodulation model is highly suitable for rapid measurement of impact pressure and frequency response by using fiber Fabry-Perot pressure sensors. Compared with conventional demodulation approaches, the proposed model achieves higher speed and a simpler operational procedure, making it more appropriate for field environments with harsh conditions.

**Keywords:** instantaneous frequency-swept interference; Fourier transform; fiber Fabry-Perot; analytic signal; Taylor expansion

## 0 引言

光纤法珀压力传感器具有结构简单、测量精度高、谐振频率高等优点<sup>[1]</sup>,在冲击瞬态压力测量中具有潜在优势。为了测量瞬态冲击压力,需要传感器具有较高动态频率响应<sup>[2]</sup>。对光纤法珀压力传感器而言,其响应频率往往高达百 kHz 量级,如何快速解调法珀压力传感器腔长及频率响应成为限制传感器应用的关键瓶颈。

传统基于光谱仪采集光谱,然后利用峰值法<sup>[3-4]</sup>、离散腔长域变换法<sup>[5]</sup>、傅里叶变换法<sup>[6-9]</sup>、最小均方差法<sup>[10]</sup>、相关法等算法进行解调的方法<sup>[11-13]</sup>,因光谱仪电耦合器件(charge-coupled device, CCD)线扫描速度低,不能满足百 kHz 量级快速解调要求。基于单波长<sup>[14-15]</sup>、双波长<sup>[16-18]</sup>或三波长的强度法<sup>[19-22]</sup>,采用单点或少点高速探测器采集光强信息,速度满足要求,是光纤法珀压力传感器快速解调的主要方法。然而,对双波长和三波长方法而言,其波长选择与传感器的初始腔长必须一一对应,对传感器设计与制造的要求较高。单波长强度法利用腔长变化与光强度之间的线性关系实现解调。该方法最为简单,是目前光纤法珀压力传感器快速解调的首选方法。然而,该方法仅依赖单波长的强度,抗干扰能力不足;且在使用前需通过光谱仪采集完整光谱,找到线性工作区,确定工作起始点波长;再切换至单频激光作为光源进行测量。该方法存在操作复杂,现场测试应用及其不便。

基于扫频光源和单点探测器构建的扫频干涉系统,可实现光纤法珀传感器信号的高速采集;但因扫频光源扫频速度有限,当法珀传感器腔长在一个扫频周期内变化较大时,因多普勒效应而引入较大的解调误差<sup>[23]</sup>。本课题组提出了采用时频分析和基于微波双边带调制的快速解调方法<sup>[24-25]</sup>,可提高传感器的快速解调精度。但因需进行较为复杂的数学运算,很难立即得到解调结果,仍然存在现场应用不便的问题。

综合国内外现状分析可知,传统解调方法存在解调速度慢的问题;强度法解调速度快,但存在抗干扰能力差且现场应用不便的问题;现有扫频干涉方法采集速度快,但存在后续解调算法耗时不满足现场应用要求的问题。

研究提出的方法基于扫频光源和单点探测器构建的扫频干涉系统,采集光纤法珀压力传感器光谱信号。基于瞬态扫频干涉模型,分析了法珀腔长动态变化对应干涉光谱的时变特征;通过对原始干涉光谱进行傅里叶变换,并

使用汉明窗截取正频率,然后反傅里叶变换回时域得到解析信号及其相位信息,即可求解出动态腔长。为进一步求解传感器频率响应信息,通过对干涉光谱进行泰勒展开分析,再对傅里叶变换得到的频率信息进行加减运算得到传感器的频率响应。进一步通过激波管冲击波实验对该方法进行了验证。该解调方法无需进行多普勒误差补偿,仅利用傅里叶变换即可快速求解动态腔长及其频率响应,最高解调速率可达 10 MHz,非常适合于光纤法珀压力传感器冲击压力及其频率响应的现场快速测量。

## 1 理论分析

### 1.1 瞬态扫频干涉模型

瞬态扫频干涉模型的核心是利用扫频光源产生的参考光和测量光,两路光信号在光纤内相遇,二者因反射面不同从而具有不同的传播时间,而这样的时间差异会产生相位差,因此产生干涉现象。相位差与法珀腔长有关,因为腔长时刻在变化,所以其对应的光程差与相位差也随着时间发生变化。同时在光电探测器采集干涉光谱信号,再对动态干涉信号进行处理即可获得动态法珀腔长信息。法珀传感器产生动态瞬态扫频干涉的原理如图 1 所示。

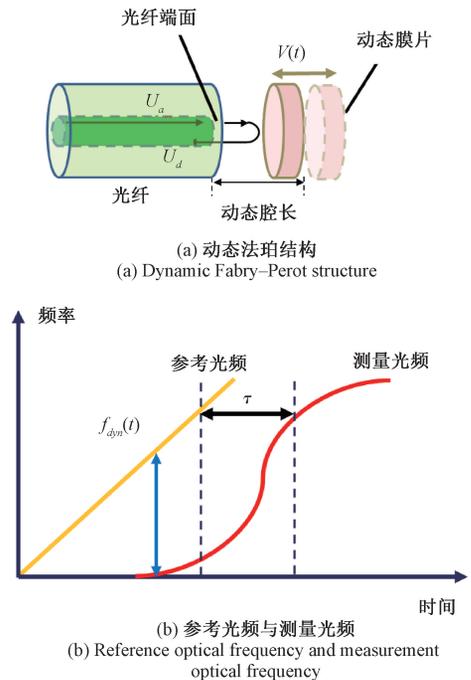


图 1 基于法珀压力传感器的瞬态扫频干涉原理  
Fig. 1 Diagram of a dynamic frequency-sweeping interferometric system based on Fabry-Perot pressure sensors

如图展示了基于法珀压力传感器的瞬态扫频干涉模型。设参考光的光频如式(1)所示。

$$u_r(t) = kt + b \quad (1)$$

其中,  $k$  为扫频光源的扫频斜率,  $b$  为初始的光频。

测量光的光频可表示如式(2)所示。

$$u_b(t) = u_r(t - \tau) \quad (2)$$

其中,  $\tau$  为光信号在法珀腔内传输的时间。

在  $t$  时刻的瞬态腔长如式(3)所示。

$$L(t) = L + \int_0^t V(t) dt \quad (3)$$

其中,  $L$  表示初始法珀腔长,  $V(t)$  为膜片(动态法珀端面)的运动速度。

但实际测量过程中, 因为反射面以速度  $V(t)$  发生运动, 所以会产生多普勒效应, 测量光的光频会发生频移。偏移后的光频可表示如式(4)所示。

$$u_d(t) = u_b(t) \cdot \left[ 1 - 2 \frac{V\left(t - \frac{\tau}{2}\right)}{c} \right] \quad (4)$$

光纤内测量光和参考光之间的光频差可写为式(5), 即:

$$u_r(t) - u_d(t) = u_r(t) - u_r(t - \tau) \times \left[ 1 - \frac{2V\left(t - \frac{\tau}{2}\right)}{c} \right] \approx k\tau + u_r(t) \frac{2V(t)}{c} \quad (5)$$

根据麦克斯韦方程, 参考光的电场如式(6)所示。

$$E_r(t) = E_1 \exp\{j[2\pi u_r(t)t + \varphi_1]\} \quad (6)$$

其中,  $E_1$  为振幅,  $\varphi_1$  为初始相位。

测量光的电场如式(7)所示。

$$E_m(t) = E_2 \exp\{j[2\pi u_d(t)t + \varphi_2]\} \quad (7)$$

其中,  $E_2$  为振幅,  $\varphi_2$  为初始相位。

参考光和测量光信号在光纤内相遇产生干涉, 干涉信号的公式如式(8)所示。

$$I(t) = [E_r(t) + E_m(t)]^2 = E_1^2 + E_2^2 + E_1 E_2 \cos\{2\pi[u_r(t) + u_d(t)]t + \varphi_1 + \varphi_2\} + E_1 E_2 \cos\{2\pi[u_r(t) - u_d(t)]t + \varphi_1 - \varphi_2\} \quad (8)$$

其中, 第 1 与第 2 项为直流分量。第 3 项为二倍光频, 光电探测器无法探测到可以直接省略。所以式(8)经过简化后可以得到如式(9)的表达式, 即:

$$I'(t) = A_0 + B_0 \cos\{2\pi[u_r(t) - u_d(t)]t + \varphi_3\} = A_0 + B_0 \cos(2\pi f_{dyn}(t)t + \varphi_3) = A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi\left[k\tau + u_r(t) \frac{2V(t)}{c}\right]t + \varphi_3\right\} = A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi\left[k \frac{2L}{c} + u_r(t) \frac{2V(t)}{c}\right]t + \varphi_3\right\} \quad (9)$$

其中,  $f_{dyn}(t)$  为动态干涉频率;  $\varphi_3$  为干涉信号的初始相位;  $A_0$  表示直流分量;  $B_0$  表示振幅。

式(9)的时间是在光源的一个扫频周期内, 而扫频光源的一个扫频周期时间非常短。因此根据积分中值定律表示式如式(10)所示。

$$V(t)t \approx \int_0^t V(t) dt \quad (10)$$

因此  $I'(t)$  可以进一步表示为:

$$I'(t) \approx A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi\left[k \frac{2L}{c} t + u_r(t) \frac{2\int_0^t V(t) dt}{c}\right] + \varphi_3\right\} = A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi\left[k \frac{2L}{c} t + u_r(t) \frac{2\Delta L(t)}{c}\right] + \varphi_3\right\} = A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi \cdot 2 \frac{L(t) + \Delta L(t)}{c} u_r(t) - 2\pi \frac{2L}{c} u_r(t) + \varphi_3\right\} = A_0 + B_0 \cos\left\{2\pi \cdot 2 \frac{L(t)}{c} u_r(t) + \varphi_4\right\} = I_1(t) \quad (11)$$

其中,  $\Delta L(t) = \int_0^t V(t) dt$ ,  $\varphi_4 = \varphi_3 - 2\pi \frac{2L}{c} b$ 。

根据式(11), 对法珀传感器腔长动态变化得到瞬态干涉光谱进行仿真, 其中, 初始腔长  $L$  为 1 380  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta L(t)$  振幅为 1  $\mu\text{m}$ , 谐振频率为 4 kHz, 结果如图 2 所示。

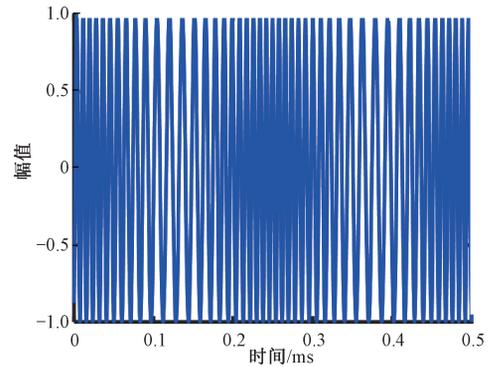


图 2 动态法珀扫频干涉光谱仿真图

Fig. 2 Simulated spectrum of dynamic Fabry-Perot swept-frequency interferometry

从图 2 可以看到, 光谱有明显的疏密程度变化, 这表明腔长随着膜片的动态变化而发生变化, 进而使得光程差与相位差发生变化。同时瞬态扫频干涉模型当中的每个光谱数据信息对应一个时刻, 也对应着传感器的一个瞬态腔长。若扫频光源的扫频速率为 2 kHz, 且每个扫频周期内有 5 101 个测量点, 则该模型的测量速率为 10 MHz ( $2\ 000 \times 5\ 101 \approx 10\ \text{M}$ ), 如图 3 所示。

从图 3 可知, 若一个扫频周期内光谱有  $N$  个点, 其对应的解调的腔长个数就有  $N$  个。根据奈奎斯特采样定律, 该方法可以快速地采集并解调几百 kHz 的法珀振动信号。

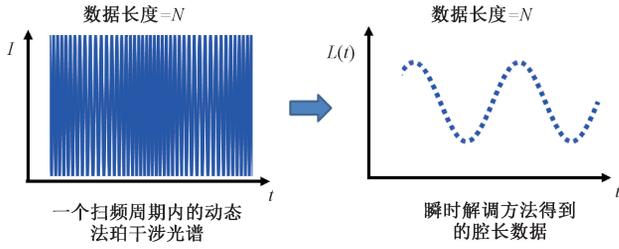


图3 瞬时解调速率分析

Fig. 3 Diagrams of instantaneous demodulation rate analysis

### 1.2 瞬态腔长解调原理分析

对采集到的动态法珀扫频干涉光谱做傅里叶变换,如式(12)所示。

$$F(f) = F[I_1(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} I_1(t) e^{-jft} dt \quad (12)$$

然后使用汉明窗截取出频谱的主要正频率。汉明窗的公式如式(13)所示。

$$W(f, f_0) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos\left(\pi \frac{f-f_0}{\Delta f}\right), & f_0 - \Delta f \leq f \leq f_0 + \Delta f \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\Delta f$  为汉明窗的窗长度,  $f_0$  为中心频率。

使用汉明窗截取主要正频率之后,表示式如式(14)所示。

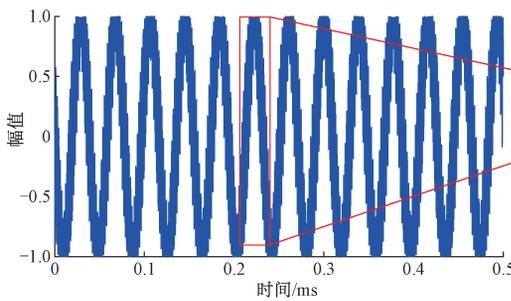
$$F_{f^+}(f) = F_+(f) \cdot W(f, f_0) \quad (14)$$

其中,  $F_+(f)$  为正频率部分的频谱。然后对式(13)做反傅里叶变换如式(15)所示。

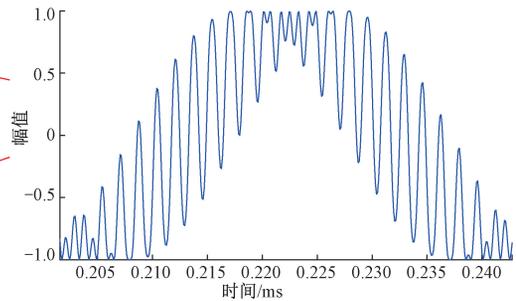
$$I_2(t) = F^{-1}[F_{f^+}(f)] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} F_{f^+}(f) e^{jft} df = C_0 e^{j\left[2\pi \cdot 2 \frac{L(t)}{c} u_r(t) + \varphi_4\right]} \quad (15)$$

其中,  $C_0$  为幅值。

因为这里仅截取了正频率部分打破了原有的共轭状态,所以返回时域信号后出现了虚部与实部。提取解析信号的实部与虚部,可以得到式(16)和(17)。



(a) Interference spectrum



(b) 放大后干涉光谱

图5 法珀腔瞬态干涉光谱

Fig. 5 Instantaneous interference spectrum of the Fabry-Perot cavity

$$I_3(t) = \text{norm}\{ \text{Re}[I_2(t)] \} = \cos\left[2\pi \cdot 2 \frac{L(t)}{c} u_r(t) + \varphi_4\right] \quad (16)$$

$$I_4(t) = \text{norm}\{ \text{Im}[I_2(t)] \} = \sin\left[2\pi \cdot 2 \frac{L(t)}{c} u_r(t) + \varphi_4\right] \quad (17)$$

其中,  $\text{Re}$  为取实部运算;  $\text{Im}$  为取虚部运算;  $\text{norm}$  为归一化运算。

将式(16)和(17)做除法并作反正切运算和解缠绕运算后便可以得到动态干涉相位,如式(18)所示。

$$\varphi_{dyn}(t) = \text{unwrap}\left\{ \arctan\left[\frac{I_4(t)}{I_3(t)}\right] \right\} \quad (18)$$

最终动态腔长  $L(t)$  可以表示为:

$$L(t) = \frac{c}{4\pi(k t + b)} \varphi_{dyn}(t) + L_{ini} \quad (19)$$

其中,  $L_{ini}$  为  $t=0$  时刻的初始腔长。

假设法珀传感器感知的压力信号频率为 600 kHz, 压力引起的传感器腔长振动幅值为 100 nm, 法珀腔的初始腔长为 380  $\mu\text{m}$ , 仿真得到瞬态腔长变化如图4所示, 其中初始腔长  $L$  为 380  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta L(t)$  振幅为 100 nm, 谐振频率为 600 kHz。

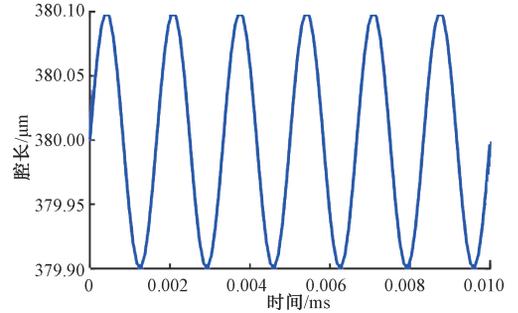


图4 法珀瞬态腔长变化

Fig. 4 Dynamic variation of Fabry-Perot cavity

根据式(11),可以得到法珀腔动态变化的瞬态干涉光谱,如图5所示,其中初始腔长  $L$  为 380  $\mu\text{m}$ ,  $\Delta L(t)$  振幅为 100 nm, 频率为 600 kHz。

再对图 5 的法珀腔瞬态干涉光谱做傅里叶变换,得到如图 6 所示的频谱图。

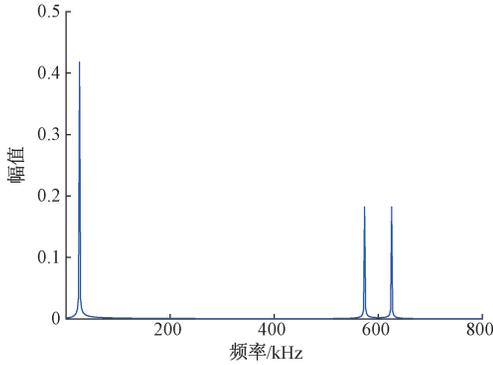
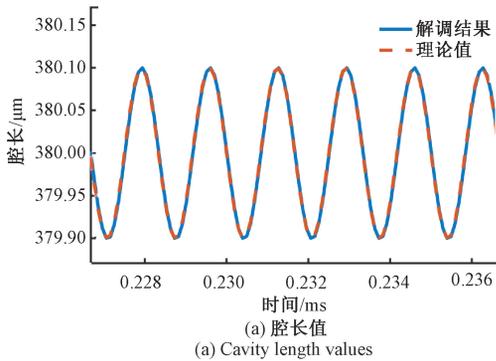


图 6 傅里叶变换后的频谱

Fig. 6 Fourier-transformed frequency spectrum

对图 6 得到的频谱截取其中正频率,根据式 (15) 进行反傅里叶变化;然后根据式 (16) 和 (17) 求解出实部与虚部,再进行相位提取与解缠绕。提取相位并解缠绕后



(a) 腔长值  
(a) Cavity length values

得到的相位如图 7 所示。

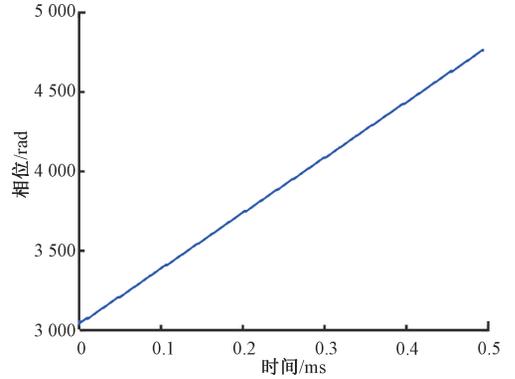
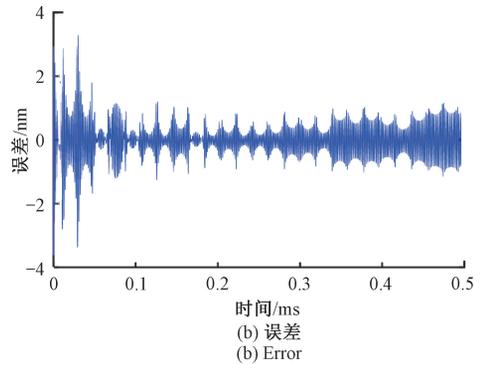


图 7 解缠绕后的相位

Fig. 7 Unwrapped phase

最后,根据式 (18) 解算出腔长。经过仿真计算,实际的测量值与理论值的差异较小。当压力振动信号引起腔长变化幅值为 100 nm 时,其最大误差 < 3.5 nm,如图 8 所示。



(b) 误差  
(b) Error

图 8 解调结果

Fig. 8 Demodulated results

### 1.3 频率响应解调分析

实际应用中,不仅关注压力也关注压力变化的频率信息。因法珀传感器的腔长与压力相关,而腔长变化量的频率信息则与压力变化频率相关。为求解频率,传统方法往往是在求得腔长对应压力后,再对压力信息进行傅里叶变换,求得频率信息。为了简化求解过程,提高解调速度,所提研究采用泰勒展开分析方法快速求解振动频率。该方法仅需对原始光谱进行傅里叶变换,再对频率进行简单的加减运算便可以快速地求解出频率信息。

假设被测压力包含多个频率信息,则对应法珀腔的腔长变化量  $\Delta L(t)$  为多个不同频率信号共同作用导致的腔长变化量,其表示式如式 (20) 所示。

$$\Delta L(t) = \sum_{i=1}^n \Delta L_i(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t) \quad (20)$$

其中,  $\omega_i$  为第  $i$  个振动信号的频率,其振幅为  $A_i$ 。

将式 (20) 代入式 (11), 可得传感器在多个振动信号作用下的光谱表达式如式 (21) 所示。

$$I_1(t) = \cos \left[ 2\pi \cdot 2 \frac{L + \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t)}{c} u_r(t) + \varphi_4 \right] = \cos \left[ \varphi + 2\pi \cdot 2 \frac{L + \sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t)}{c} u_r(t) + \varphi_4 \right] \quad (21)$$

令  $\varphi = 2\pi \frac{L}{c} u_r(t)$ , 并对式 (21) 进行泰勒展开。此

处将  $\varphi$  视为定值并在  $\varphi$  处展开, 包含  $\sum_{i=1}^n \Delta L_i(t)$  的项作为变化量。得到的表达式如式 (22) 所示。

$$I_1(t) = \cos \left[ \varphi + 2\pi \cdot 2 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i(t)}{c} (kt + b) + \varphi_4 \right] =$$

$$\cos(\varphi + \varphi_4) - \sin(\varphi + \varphi_4) \cdot 2\pi \cdot 2 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i(t)}{c} (kt + b) -$$

$$\cos(\varphi + \varphi_4) \frac{\left[ 2\pi \cdot 2 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i(t)}{c} (kt + b) \right]^2}{2!} +$$

$$\sin(\varphi + \varphi_4) \frac{\left[ 2\pi \cdot 2 \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i(t)}{c} (kt + b) \right]^3}{3!} \dots \quad (22)$$

将振动频率表达式(20)代入式(22),可得式(23),即:

$$I_1(t) = \cos(\varphi + \varphi_4) - \sin(\varphi + \varphi_4) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t) \cdot \frac{2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c} - \cos(\varphi + \varphi_4) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n A_i^2 \sin^2(2\pi\omega_i t) \cdot \frac{\left[ \frac{2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c} \right]^2}{2!} +$$

$$\sin(\varphi + \varphi_4) \cdot \sum_{i=1}^n A_i^3 \sin^3(2\pi\omega_i t) \cdot \frac{\left[ \frac{2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c} \right]^3}{3!} +$$

$$\dots \quad (23)$$

当  $\sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c} \ll 1$ , 式(23)中的高阶项远小于一阶项,因此高阶项可忽略不计。则式(23)可写为式(24),即:

$$I_1(t) \approx \cos(\varphi + \varphi_4) - \sin(\varphi + \varphi_4) \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n A_i \sin(2\pi\omega_i t) \frac{2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c} \approx$$

$$\cos(\varphi + \varphi_4) - \sum_{i=1}^n D_i(t) \sin(\varphi + \varphi_4) \sin(2\pi\omega_i t) \quad (24)$$

其中,  $D_i(t) = \frac{A_i \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot (kt + b)}{c}$  为  $I_1(t)$  的直流信号的乘积。

利用三角函数关系,对式(24)进行运算,可得式(25),即:

$$I_1(t) \approx \cos(\varphi + \varphi_4) - \sum_{i=1}^n D_i(t) \cdot$$

$$\frac{\cos(2\pi\omega_i t - \varphi - \varphi_4) - \cos(2\pi\omega_i t + \varphi + \varphi_4)}{2} \quad (25)$$

对式(25)进行傅里叶变换,可得式(26),即:

$$F[I_1(t)] = F(f) \approx$$

$$\frac{1}{2} \left[ \delta \left( f - \frac{2Lk}{c} \right) \cdot e^{j\varphi_4 f} + \delta \left( f + \frac{2Lk}{c} \right) \cdot e^{-j\varphi_4 f} \right] -$$

$$\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\delta \left[ f - \left( \omega_i - \frac{2Lk}{c} \right) \right] \cdot e^{j\varphi_4 f} + \delta \left[ f + \left( \omega_i - \frac{2Lk}{c} \right) \right] \cdot e^{-j\varphi_4 f}}{4} - \frac{\delta \left[ f - \left( \omega_i + \frac{2Lk}{c} \right) \right] \cdot e^{j\varphi_4 f} + \delta \left[ f + \left( \omega_i + \frac{2Lk}{c} \right) \right] \cdot e^{-j\varphi_4 f}}{4} \right] \quad (26)$$

其中,  $\frac{2Lk}{c}$  表示法珀传感器初始腔长  $L$  对应的特征频率,  $\delta$  为冲激函数。

由式(26)可见,傅里叶变换结果包含传感器初始腔长对应频率  $\frac{2Lk}{c}$ , 以及和频  $\omega_i + \frac{2Lk}{c}$  与差频  $\omega_i - \frac{2Lk}{c}$ , 如图9所示。

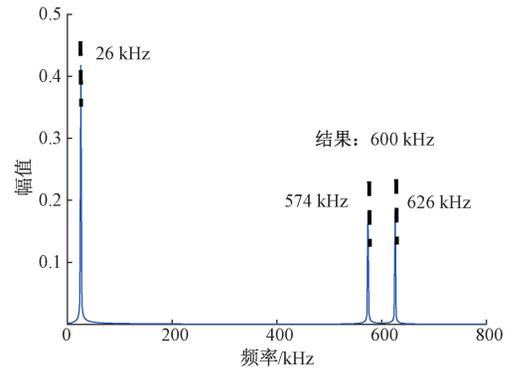


图9 傅里叶变换后的频谱

Fig. 9 Fourier-transformed frequency spectrum

进一步根据式(27)计算可得振动信号频率,即:

$$\omega_i = \frac{\left( \omega_i + \frac{2Lk}{c} \right) + \left( \omega_i - \frac{2Lk}{c} \right)}{2}, \quad i \in [1, n] \quad (27)$$

图9中初始腔长  $L$  为  $380 \mu\text{m}$ ,  $\Delta L(t)$  振幅为  $100 \text{ nm}$ , 振动频率为  $600 \text{ kHz}$ 。由图9可见,解调结果为  $600 \text{ kHz}$  与生成的振动频率值相同,该方法仅需找到差频与和频再根据式(27)做简单的运算便可以得到振动频率,解调过程更加简便。

## 2 实验验证

### 2.1 冲击压力实验系统

为了验证上述方法,搭建了基于激波管的冲击压力实验系统,如图10所示。

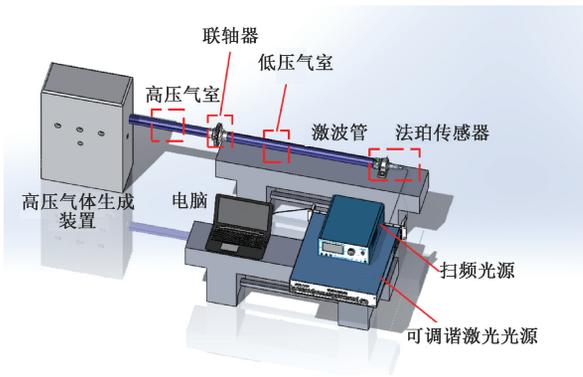


图 10 实验系统

Fig. 10 System diagram of the experiment

激波管包含高压气室和低压气室,两者被联轴器分开。在联轴器的位置固定一次性的圆形铝片,当高压气体加载装置向激波管持续加载气体时,高压气体在高压段气室内被压缩,并将压力施加在铝片上;在铝片破裂瞬间,高压气体会冲向激波管末端的膜片式光纤法珀传感器。传感器膜片受到冲击压力作用,引起法珀腔长快速振动变化。测量实验现场照片如图 11 所示。

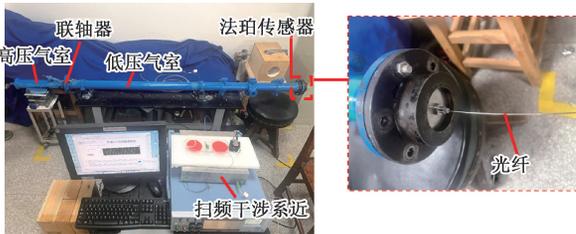


图 11 测量实验现场照片

Fig. 11 Photograph of the experimental measurement setup

## 2.2 基于扫频干涉系统的冲击波实验

首先,将光纤法珀压力传感器的输出尾纤与自研扫频干涉系统相连,采集冲击波作用过程中的光谱信号。系统采用的扫频光源的扫频速率为 2 kHz,光电探测器的采集范围为 800~1 700 nm,采集卡的采样率为 10 Ms/s。如图 12 所示为冲击前后的部分原始光谱。

对每个扫频周期做傅里叶变换,然后在每个扫频周期的频谱图中截取出主要频率,接着依据 1.2 节中所述过程,对截取出的频率做反傅里叶变换,并使用反正切和解缠绕算法解算出腔长值,最后使用事先标定好的压力-腔长关系式解算出瞬态压力值,得到结果如图 13 所示。由于气体会在气室中多次反复,因此解调结果中包含多次冲击波作用周期。取第 1 次冲击波作用过程分析,可见压力传感器 1 响应的最大瞬态冲击压力为 0.452 MPa。压力传感器 2 响应的最大瞬态冲击压力为 0.633 MPa。

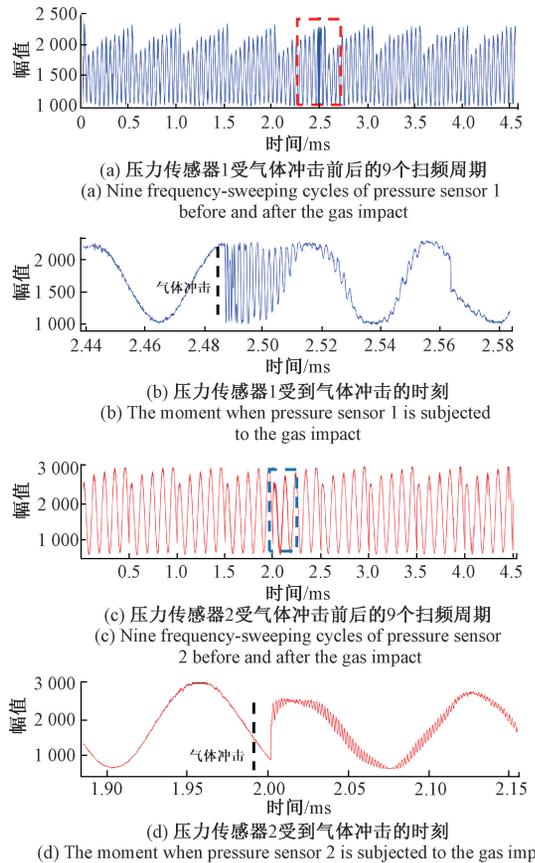


图 12 冲击前后的部分原始光谱

Fig. 12 Partial original spectra before and after the impact

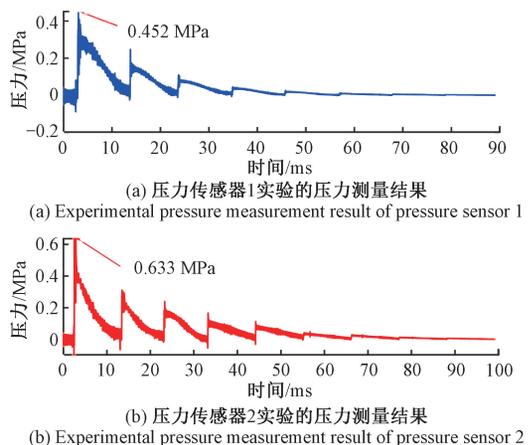


图 13 使用动态扫频干涉系统解调瞬态冲击压力结果  
Fig. 13 Demodulation results of transient impact pressure using the dynamic frequency-swept interferometric system

将图 13 中第 1 个冲击波作用过程展开并放大,可以看到压力随时间呈周期性变化,这是由于冲击波引起传感器膜片谐振引起的,如图 14 所示。

根据 1.3 节所述频率求解过程,对傅里叶变换的结果中的两个信号频率求和并除以 2,即可得到传感器的

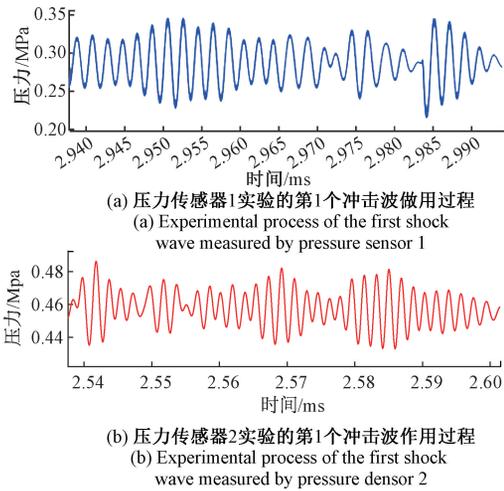


图14 第1个冲击波作用过程

Fig. 14 Process of the first shock wave

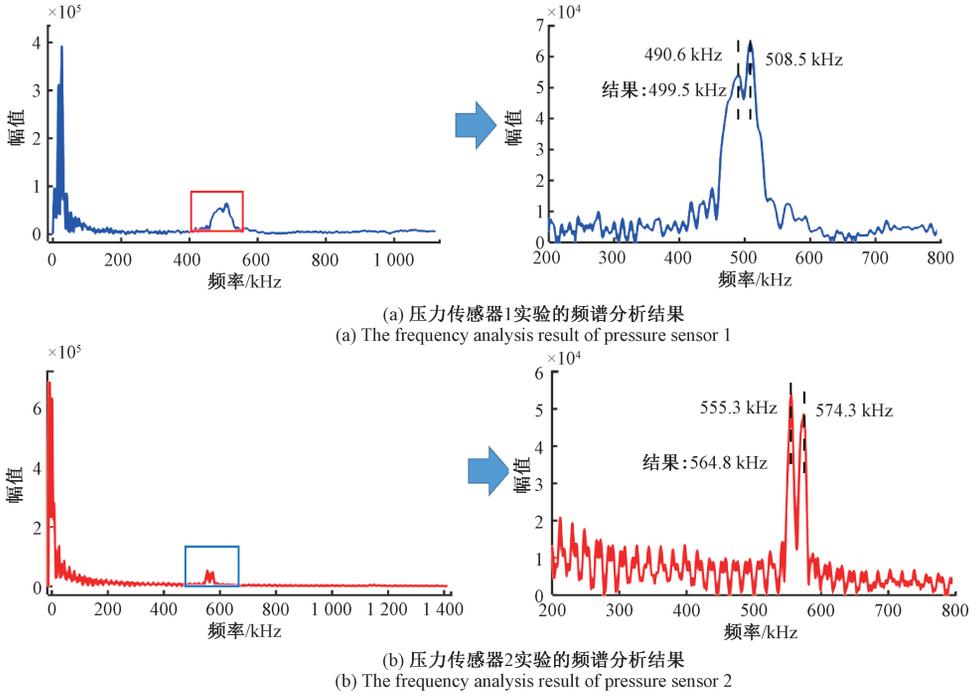


图15 使用泰勒展开分析谐振频率的结果

Fig. 15 Results of resonant frequency analysis by using Taylor series expansion

将图17中第1个冲击波作用过程展开,可以看到压力随时间呈周期性变化,如图18(a)所示。使用傅里叶变换求出谐振频率,结果如图18(b)所示。压力传感器1和压力传感器2谐振频率分别为489.1和564.3 kHz。

对比2.2和2.3节中的两种方法的解调结果可知,在求解瞬态冲击压力方面,对压力传感器1而言,研究所提的方法求解的最大瞬态冲击压力值为0.452 MPa,而单波长强度解调法所得最大瞬态冲击压力值为0.447 MPa,

谐振频率,如图15所示。其中,压力传感器1和压力传感器2的谐振频率分别为489.7和564.8 kHz。

### 2.3 基于单波长强度系统冲击波对比实验

为了对比分析,采用了单波长激光结合单点探测器的采集系统进行冲击波过程光谱采集。首先,将光纤法珀压力传感器的输出尾纤连接自研扫频干涉系统,采集完整干涉光谱并确定工作点波长;再将尾纤跳线连接可调谐激光光源(YOKOGAWA-AQ2200),锁定在工作波长位置。施加高压气体,冲破铝片,开始采集冲击波过程光谱,得到结果如图16所示。

使用单波长强度法以及实现标定好的压力-强度关系式解算出压力值。如图17所示。压力传感器1实验的最大瞬态冲击压力为0.447 MPa。压力传感器2实验的最大瞬态冲击压力为0.637 MPa。

相对误差 $<1\%$ 。而压力传感器2,二者的解调结果分别为0.633和0.637 MPa,相对误差 $<0.7\%$ 。

在求解频率方面,对压力传感器1而言,使用研究所提的解调方法得到的谐振频率为489.7 kHz,而单波长强度解调法所得频率为489.1 kHz,相对误差 $<0.1\%$ 。而压力传感器2,二者的解调结果分别为564.8和564.3 kHz,相对误差 $<0.08\%$ 。

由以上分析可以得到,研究所提的方法具有较高的精确度,这也验证了研究提出方法的可行性。

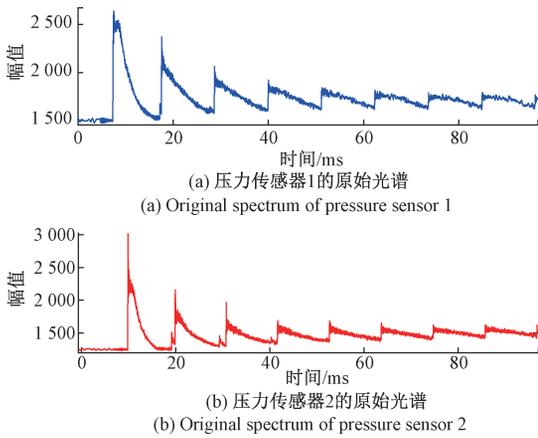


图 16 单波长解调系统采集的冲击过程的原始光谱  
Fig. 16 Original spectra of the shock process collected by the single wavelength demodulation system

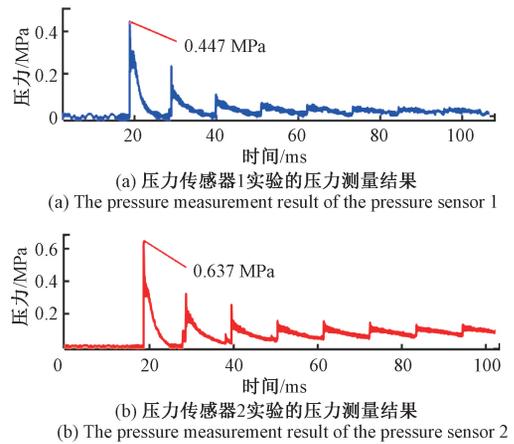


图 17 使用单波长强度解调法解调瞬态冲击压力结果  
Fig. 17 Demodulation results of instantaneous shock pressure by using the single wavelength intensity demodulation method

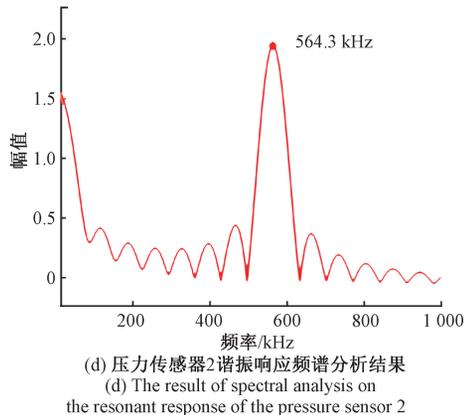
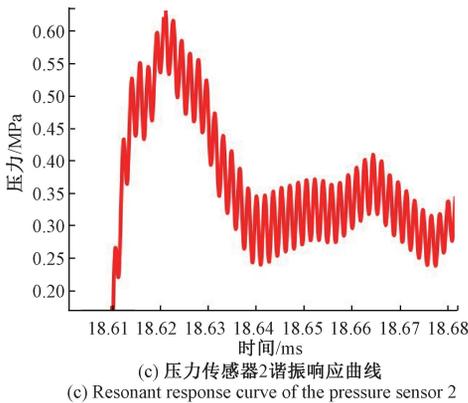
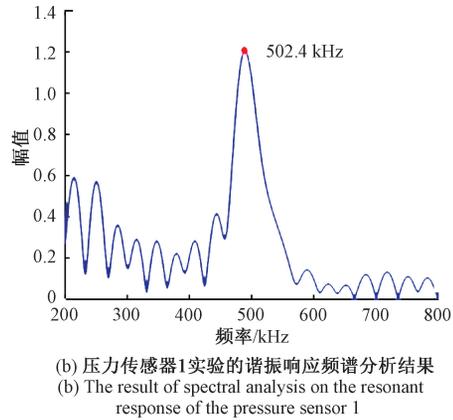
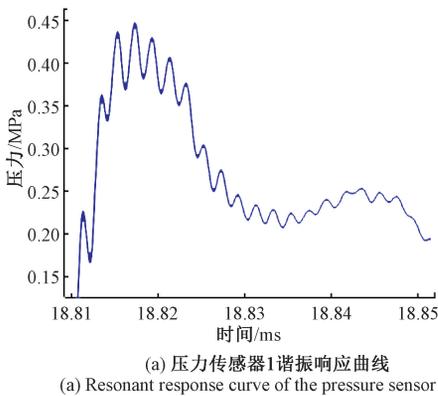


图 18 使用单波长强度法解调谐振频率的结果

Fig. 18 Results of resonant frequency demodulated by the single wavelength intensity method

### 3 结 论

研究提出的基于扫频干涉的光纤法珀压力传感器快速解调方法,通过引入瞬态扫频干涉模型极大地提升了解调速率。通过与单波长强度法的实验结果对比表明:

该方法相对单波长而言,压力解调误差 $<1\%$ ,频率解调误差 $<0.1\%$ 。该解调方法无需进行多普勒误差补偿,仅利用傅里叶变换即可快速求解动态腔长及其频率响应,最高解调速率可达  $10\text{ MHz}$ ,非常适合于光纤法珀压力传感器冲击压力及其频率响应的快速测量。

本研究所提方法无需寻找工作点和确定合适的初始

腔长,所以操作和运算简便且受到环境的影响较小,相对于单波长强度法等传统算法更具有适用性,非常适合现场测试应用。

## 参考文献

- [1] 向柳静,姜昌兴,刘显明,等. 基于超弹性体材料的微型光纤法珀压力传感器[J]. 仪器仪表学报,2022,43(12):66-75.  
XIANG L J, JIANG CH X, LIU X M, et al. Miniature optical fiber Fabry-Perot pressure sensor based on hyper-elastic material[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12):66-75.
- [2] 孙富强. 基于 HTCC 的光纤高温脉动压力传感器设计与集成工艺研究[D]. 重庆:重庆大学,2024.  
SUN F Q. Design and integration process research of fiber Fabry-Perot high temperature pulsating pressure sensor based on HTCC[D]. Chongqing: Chongqing University, 2024.
- [3] 段雅楠,王双,江俊峰,等. 光纤法珀传感解调方法研究进展[J]. 应用科学学报,2021,39(5):793-808.  
DUAN Y N, WANG SH, JIANG J F, et al. Research progress on demodulation methods of optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. Journal of Applied Sciences, 2021, 39(5):793-808.
- [4] MEI J W, XIAO X SH, YANG CH X et al. High-resolution and large dynamic range fiber extrinsic Fabry-Perot sensing by multi-extrema-tracing technique[J]. Applied Optics, 2015, 54(12):3677-3681.
- [5] 雷小华,朱永,章鹏,等. 离散腔长变换解调光纤法珀应变传感器并联复用的研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):199-202.  
LEI X H, ZHU Y, ZHANG P, et al. Study on parallel multiplexing of fiber Fabry-Perot strain sensors by the method of discrete gap transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4):199-202.
- [6] HAI ZH Y, SU ZH X, LIANG R, et al. Numerical and experiment analysis of sapphire sandwich-structure Fabry-Perot pressure sensor through fast fourier transform and mean square error demodulation algorithm[J]. Materials, 2024, 17(15):3649.
- [7] CHEN F L, SUN S M, JIANG W B. Fiber optic integrated FPI sensor for simultaneous measurement of temperature and relative humidity [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 393:116865.
- [8] GUO M CH, ZHANG Q, SU ZH X, et al. Simultaneous measurement of gas pressure and temperature sensor based on F-P interference using hollow core bragg fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(23):39028-39034.
- [9] 肖林,雷小华,郭光辉,等. 基于快速稀疏扫频干涉的动态间隙测量方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(9):52-61.  
XIAO L, LEI X H, GUO G H, et al. A dynamic clearance measurement method based on a fast sparse frequency-swept interferometry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):52-61.
- [10] 王颖,徐毅,章鹏,等. 基于光纤光栅法珀腔传感器的结构表面温度测量方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(11):40-52.  
WANG Y, XU Y, ZHANG P, et al. Structural surface temperature measurement method based on fiber grating-Farber cavity sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11):40-52.
- [11] 韩超,左方俊,任乾钰,等. 小型化四通道光纤法珀传感器解调系统设计[J]. 电子测量技术,2022,45(5):39-43.  
HAN CH, ZUO F J, REN Q Y, et al. Design of miniaturized four channel fiber Fabry-Perot sensor demodulation system[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5):39-43.
- [12] CHEN Y R, LEI X H, MA SH H, et al. Correlation demodulation for low-finesse Fabry-Perot sensors based on microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(10):3929-3935.
- [13] TAN J H, WANG Q, WANG N, et al. Hardware optical correlation method for dynamic detection of micrometer gaps with sub-nanometer resolution[J]. Optics Express, 2022, 30(18):32660-32669.
- [14] XU Y F, QI H CH, ZHAO X Y, et al. High-speed spectrum demodulation of fiber-optic Fabry-Perot sensor based on scanning laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 178:108192.
- [15] 曾灏,袁嫣红. 基于钛膜的光纤 F-P 声波传感器实现[J]. 仪表技术与传感器, 2024(2):6-10.  
ZENG H, YUAN Y H. Realization of optical fiber F-P acoustic sensor based on titanium film [J]. Instrument Technique and Sensor, 2024(2):6-10.
- [16] SHI J H, GONG Y F, GUANG D, et al. Improved topography measurement with a high dynamic range using phase difference sensing technology[J]. Optics Letters, 2023, 48(17):4657-4660.
- [17] HU X Y, WANG H B, YUE Y, et al. Robust fiber-optic microphone with modified dual-wavelength demodulation algorithm for low-frequency sound detection[J]. Applied Acoustics, 2025, 229:110394.
- [18] HUANG Y, CHEN H W, ZHANG L N, et al. Improved dual-wavelength demodulation technique based on prior

- information for fiber optic Fabry-Pérot ultrasonic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(18): 6444-6450.
- [19] REN Q Y, JIA P G, AN G W, et al. Self-compensation three-wavelength demodulation method for the large phase extraction of extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107535.
- [20] GUO M CH, ZHANG Q, ZHU H T, et al. Performance study of F-P pressure sensor based on three-wavelength demodulation: High-temperature, high-pressure, and high-dynamic measurements[J]. *Sensors*, 2024, 24(16): 5313.
- [21] ZHANG SH H, PENG M, DONG J Y, et al. Three-wavelength phase demodulation technique for extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 81: 103578.
- [22] CHEN H, GUAN CH G, LYU H, et al. Improved optical path structure for symmetric demodulation method in EFPI fiber optic acoustic sensors using wavelength division multiplexing [J]. *Sensors*, 2023, 23(10): 4985.
- [23] CHEN Y R, LEI X H, XIAO L, et al. Dynamic distance measurement based on a fast frequency-swept interferometry[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4771.
- [24] CHEN Y R, LEI X H, ZHANG P, et al. Dynamic demodulation of low-finesse Fabry-Perot sensors based on instantaneous frequency analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 2996-3002.

- [25] CHEN Y R, LEI X H, Ma SH H, et al. Dynamic demodulation method for Fabry-Perot sensors based on the double-sideband microwave modulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(20): 7412-7419.

### 作者简介



**程小峻**, 2023年毕业于重庆邮电大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术和光电检测技术。

E-mail: 691237109@qq.com

**Cheng Xiaojun** received his B. Sc. degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2023. He is currently a master's student at Chongqing University. His main research interests include fiber optic sensing, and photoelectric detection technology.



**雷小华**(通信作者), 2002年于重庆大学获得学士学位, 2008年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆大学光电学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为光纤传感和光电检测技术。

E-mail: xhlei@cqu.edu.cn

**Lei Xiaohua** (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degrees both from Chongqing University in 2002 and 2008, respectively. She is currently a professor and Ph. D. advisor in the College of Optoelectronic Engineering at Chongqing University. Her main research interests include fiber optic sensing and photoelectric detection technology.