

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802272

基于光谱法的法珀压力传感器腔长解调方法研究*

唐瑛 王伟 张天阳

(西安工业大学 光电工程学院 西安 710021)

摘要: 针对白光干涉复合式光纤法珀压力传感器反射光谱复杂,其准确解调易受光源光谱不稳定与电路噪声等因素影响的问题,通过理论分析,确认了反射光谱包络信号来源于传感器对压力敏感的空气腔,其频率上的周期直接正比于腔长,提取了复合式光纤法珀压力传感器反射光谱的包络信号,通过正弦频率估计的方法,优化四参数正弦拟合为三参数正弦拟合,降低正弦拟合的计算量,并准确寻找包络信号两个峰的峰值位置,通过腔长与信号周期的关系可最终得到准确的腔长值。对该解调算法进行了详细地理论分析与数值仿真,通过实验验证了光谱法中峰值检测方法对复合式光纤法珀压力传感器 80 μm 空气腔静态腔长的精确解调,相对误差为 0.13%。

关键词: 白光干涉;复合式光纤法珀压力传感器;反射光谱;三参数正弦拟合算法;正弦频率估计方法

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Study on cavity length demodulation of Fabry-Perot pressure sensor based on spectral method

Tang Ying Wang Wei Zhang Tianyang

(School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: For white light interference method of composite fiber pearl pressure sensor spectral reflectance is complex, its accurate demodulation are susceptible to light source spectrum is unstable and the influence of factors such as noise problem, by theoretical analysis, confirmed the reflection spectral envelope signal from the sensor is sensitive to pressure air chamber, the frequency of cycle is directly proportional to the cavity length, the extraction method of compound fiber pearl pressure sensor reflective spectrum envelope signal, using three parameters of sine fitting method to find the peak position of the adjacent two peak, at the same time, optimization of sinusoidal frequency estimation method reduce the computational burden of the three parameters of sine fitting, through the relationship between the cavity length and signal cycle can eventually get the exact cavity length value. In this paper, a detailed theoretical analysis and numerical simulation of the demodulation algorithm is carried out, and the experiment verifies that the peak value detection method in the spectral method can accurately demodulate the static cavity length of the 80 millimeter-air cavity with a relative error of 0.13% for the composite optical fiber fabry-perot pressure sensor.

Keywords: white light interference; cavity length interrogation of compound fiber Fabry-Perot pressure sensor; reflective spectrum; three-parameter sine-fitting algorithm; sinusoidal frequency estimation method

0 引言

以光纤式法布里-珀罗腔为敏感元件的光纤法珀传感器自 1980 年代初期被提出以来^[1-4],因其体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优点,可广泛应用于压力^[5]、温度^[6]、应变^[7]、加速度^[8]、位移^[9]、化学物质检测^[10]等传感领域,尤其是以空气腔为敏感元件的光纤法珀压力传感器,已经在多个行业领域内获得应用。

近年来,航空航天、石油化工、能源土木等特殊行业对光纤法珀压力传感器的性能提出了更高的要求^[11-12],目前从光纤法珀传感器的结构、材料等方面优化传感器的性能,提高传感器在极端特殊测量环境下的应用。张杰等^[13]利用石英毛细管和两段光纤制作成结构简单的长腔光纤法珀静态高压传感器。Casalino^[14]将包含法珀腔的光纤嵌入用作压力传感器的环氧树脂圆柱体中,可将其表面上施加的压力信号传递至包含法珀腔的光纤内,提高了光纤法珀

收稿日期:2018-10-15

* 基金项目:国家自然科学基金(51475384、31671002)项目资助

压力传感器的灵敏度。采用蓝宝石等耐高温材料,使用 MEMS 技术制作的非本征型光纤法珀压力传感器^[15-18],可以在 1 500 °C 以上的环境下使用,在航空发动机的测试技术领域有重要应用。目前,光纤法珀压力传感器的探测性能以及适用范围因技术的改进得到了显著地提升,但其性能与功能依赖于后端解调技术的发展,因此对复合式光纤法珀压力传感器腔长的解调提出了更高的要求。

复合式光纤法珀压力传感器的解调方法可以分为白光干涉法^[19]和非扫描相关法^[20]等。白光干涉法中光谱法^[21]具有简单、易于实施的特点。该方法利用宽带光源通过光纤照射复合式光纤法珀压力传感器,采用光谱分析仪获取反射光谱,由反射光谱可以分析计算得到复合式光纤法珀压力传感器法珀腔的腔长,进而得到压力信息。

复合式光纤法珀压力传感器包含空气腔和基底腔两个腔体,由于空气腔的腔长远小于基底腔腔长,其反射信号的周期较大,在反射光谱射表现为叠加在基底腔反射信号上的包络信号。采用光谱法对复合式光纤法珀压力传感器进行解调的核心为由反射光谱解算空气腔的腔长,关键在于准确获取包络信号相邻两个峰的峰值位置。

本文采用优化频率估计的三参数正弦拟合法确定复合式光纤法珀压力传感器反射光谱包络信号相邻两个峰的峰值位置,并针对常规正弦拟合频率估计不准确的问题,优化了正弦频率估计方法和阈值,通过腔长与信号周期的关系得到腔长值。减小了光源不稳定性和解调电路噪声带来的误差,提高了解调算法对噪声的容忍性,同时提高了复合式光纤法珀压力传感器空气腔腔长的解调精度。

1 复合式光纤法珀压力传感器反射光谱分析

膜片式复合光纤法珀压力传感器由基底腔和空气腔构成,采用 MEMS 技术制作,其典型结构如图 1 所示。其中,空气腔是用于实现气体或者液体压力传感的敏感单元,对这类传感器的压力解调,即是对传感器空气腔腔长的解调。使用宽带光源,如放大自发射(amplified spontaneous emission, ASE)和超发光二极管(superluminescent diode, SLED)等发出的入射光经单模光纤耦合进复合式光纤法珀压力传感器内,入射光在基底腔前端面、后端面以及空气腔的后端面发生反射,并发生复杂的多光束干涉现象,形成具有多个干涉峰的反射光谱。对于实际应用则需要从反射光谱中解调得到空气腔的腔长值 d_2 。

对于复合式光纤法珀压力传感器,光源发出的光进入传感器后共在 3 个界面上发生反射,分别是光纤端面-传感器基底界面、基底-空气腔界面以及空气腔-敏感膜片界面。这 3 个界面上的反射率分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 。基底腔的长度为 d_1 ,空气腔的长度为 d_2 。若忽略光纤损耗的影响,复合式光纤法珀传感器的反射率表示为^[22-24]:

$$R = \frac{K}{D} \quad (1)$$

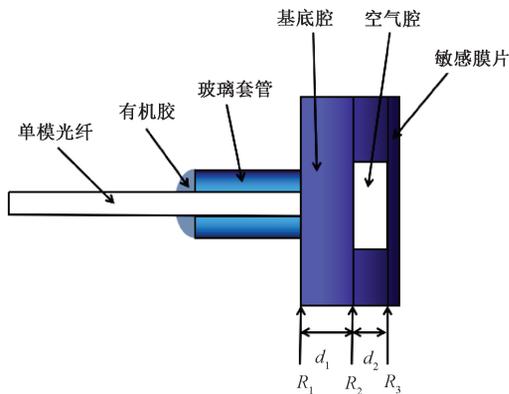


图 1 复合式光纤法珀压力传感器的典型结构

$$A = 2 \sqrt{R_1 R_2} \cos(2k_1 d_1) \quad (2)$$

$$D = 1 + R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3 + 2 \sqrt{R_1 R_2} (1 + R_3) \cos(2k_1 d_1) + 2 \sqrt{R_2 R_3} (1 + R_1) \cos(2k_2 d_2) + 2 \sqrt{R_1 R_3} \cos[2(k_1 d_1 + k_2 d_2)] + 2R_2 \sqrt{R_1 R_3} \cos[2(k_1 d_1 + k_2 d_2)] \quad (3)$$

$$\text{其中, } k_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda}, k_2 = \frac{2\pi n_2}{\lambda}。 \text{当反射率 } R_1、R_2 \text{ 和 } R_3$$

都较小时,可忽略掉中的高阶项,且 $D \approx 1$,则 R 可简化近似为:

$$R \approx R_1 + R_2 + R_3 + A + B + C \quad (4)$$

由于干涉信号在波长域上是非等周期的,因此将信号由波长域通过式 $f = \frac{c}{\lambda}$ 变换到频率域,则:

$$A = 2 \sqrt{R_1 R_2} \cos(2k_1 d_1) = 2 \sqrt{R_1 R_2} \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1 f}{c}\right) \quad (5)$$

$$B = 2 \sqrt{R_2 R_3} \cos(2k_2 d_2) = 2 \sqrt{R_2 R_3} \cos\left(\frac{4\pi n_2 d_2 f}{c}\right) \quad (6)$$

$$C = 2 \sqrt{R_1 R_3} \cos[2(k_1 d_1 + k_2 d_2)] = 2 \sqrt{R_1 R_3} \cos\left[2\left(\frac{2\pi n_1 d_1 f}{c} + \frac{2\pi n_2 d_2 f}{c}\right)\right] \quad (7)$$

将 k_1 、 k_2 分别代入 A 、 B 和 C ,则 A 、 B 和 C 所对应的周期分别为 T_A 、 T_B 和 T_C ,即:

$$T_A = \frac{c}{2n_1 d_1} \quad (8)$$

$$T_B = \frac{c}{2n_2 d_2} \quad (9)$$

$$T_C = \frac{c}{2(n_1 d_1 + n_2 d_2)} \quad (10)$$

对于空气腔而言, $n_2 \approx 1$ 。当 $d_1 \gg d_2$ 时,即基底腔的厚度远大于空气腔的厚度时, $T_A \approx T_C$ 且 $T_A \ll T_B$,空气腔的干涉光谱周期远远小于基底腔的干涉信号周期。假定 $R_1 = R_2 = R_3 = 0.04$, $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1$, $d_1 = 750 \mu\text{m}$, $d_2 =$

80 μm , 利用式(4)进行仿真计算, 所得复合式光纤法珀传感器在频率 190.5~195 THz 之间的反射光谱如图 2 所示。其中的高频成分来源于 R_1 反射面和 R_2 反射面所构成基底腔以及 R_1 反射面和 R_3 反射面所构成腔干涉信号的叠加; 其中低频包络成分来源于 R_2 反射面和 R_3 反射面所构成的空气腔。对于这种结构的复合式光纤法珀压力传感器的解调而言, 要求其空气腔腔长可以被精确解算, 这需要提取反射光谱信号的包络信号, 并通过特定算法进行数据分析, 提取该信号在频域上的周期 T_B 。空气腔腔长可表示为:

$$d_2 = \frac{c}{2T_B} \quad (11)$$

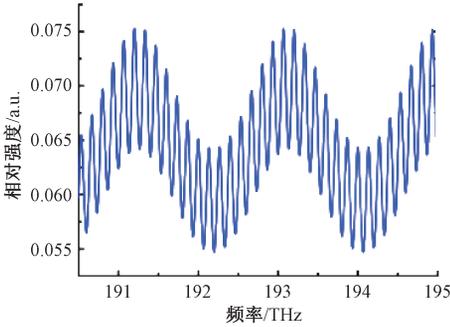


图 2 复合式光纤法珀压力传感器反射光谱仿真

2 复合式光纤法珀压力传感器腔长解调算法

对复合式光纤法珀压力传感器的解调, 其核心为由复合腔的反射光谱信息获取传感器空气腔腔长。为此, 首先需要将频率反射光谱上两个叠加的信号分离, 使用包络提取方法将叠加在基底信号上的空气腔的反射信号提取出来。提取出的空气腔信号类似正弦信号, 利用优化后的三参数正弦拟合将信号相邻两个峰值的位置准确计算出来, 即采用双峰检测法, 由两个峰值位置之差可得空气腔反射信号在频率域上的周期 T_B , 根据式(11), 得到实时的空气腔腔长值。

2.1 包络提取

复合式光纤法珀传感器的反射光谱为基底腔和空气腔的叠加光谱, 其中基底腔的峰值点所组成的包络信号为空气腔的反射光谱, 如图 2 所示。对复合式法珀传感器空气腔的解调要对叠加光谱的包络信号进行提取。首先对采集到的光谱数据进行编码, 利用直接比较法对相对强度值较大的光谱数据进行提取。比较连续 5 个点的大小, 当提取的 5 个点中第 3 个点的值大于前后两个点的值, 即提取第 3 个点为基底腔反射光谱峰值点的位置, 此时的峰值点都为离散的点, 如图 3 所示。

2.2 四参数正弦拟合

采用光谱法解调复合式光纤法珀压力传感器, 提取包络之后得到空气腔对应光谱, 由于空气腔对应两个反射界面反射率较低, 在频域上, 包络信号为正弦或者余弦函数曲

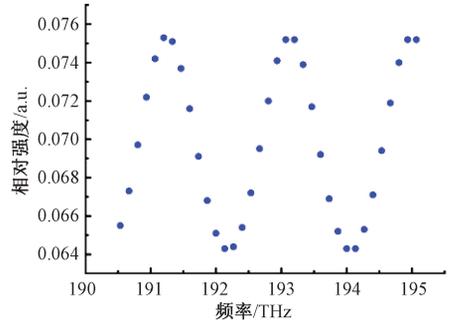


图 3 仿真反射光谱提取包络图

线, 在这里, 采用正弦函数拟合的方式获取峰值位置。光谱仪模块将采集到的光谱数据传输到采样电路和信号处理电路, 在拟合数据时, 为了便于数据处理, 光谱波长域信息转换为频域信息, 构建光谱频率和相应光频强度之间的关系, 用峰值位置附近的数据构建正弦数学模型, 其形式为:

$$I_i = A \cos(\omega f_i + \varphi) + B \quad (12)$$

式中: I_i 为频率域波长 f_i 处的光强值; 信号频率 f 为估计值; 信号角频率 $\omega = 2\pi f$; φ 为初相位; B 为光强的偏移量。需要确定参数 A 、初相位 φ 、光强偏移量 B 及信号频率 f 。

在 f_0 处有:

$$I_0 = A \cos(\omega f_0 + \varphi) + B \quad (13)$$

在 f_1 处有:

$$I_1 = A \cos(\omega f_1 + \varphi) + B = A \cos(\omega(f_0 + \Delta f) + \varphi) + B \quad (14)$$

将其展开:

$$I_1 = A \sin(\omega f_0 + \varphi) \cos(\omega \Delta f) + A \cos(\omega f_0 + \varphi) \sin(\omega \Delta f) + B \quad (15)$$

归纳可知, 在 f_i 处有:

$$I_i = A \sin(\omega \lambda_0 + \varphi) \cos(\omega i \Delta f) + A \cos(\omega f_0 + \varphi) \sin(\omega i \Delta f) + B \quad (16)$$

令:

$$m = A \cos(\omega f_0 + \varphi)$$

则式(16)可化为:

$$I_i = m \cos(\omega i \Delta f) + n \sin(\omega i \Delta f) + B \quad (17)$$

$$\begin{cases} I_0 = m + n \\ I_1 = m \cos(\omega \Delta f) + n \sin(\omega \Delta f) + B \\ I_i = m \cos(\omega 2\Delta f) + n \sin(\omega 2\Delta f) + B \\ \vdots \\ I_n = m \cos(\omega n \Delta f) + n \sin(\omega n \Delta f) + B \end{cases} \quad (18)$$

方程组(18)为超正定线性方程组, 其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \cos(\omega \cdot \Delta f) & \sin(\omega \cdot \Delta f) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\omega \cdot n \Delta f) & \sin(\omega \cdot n \Delta f) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ n \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

记为:

$$\mathbf{M}\mathbf{X} = \mathbf{N} \quad (20)$$

求解与式(18)同解的线性方程组 $\mathbf{M}^T\mathbf{M}\mathbf{X} = \mathbf{M}^T\mathbf{N}$, 解这个方程组可求得唯一的 m, n, B ; 可得:

$$\varphi = \arctan \frac{n}{m} \quad (21)$$

$$f_{\max} = \frac{-\varphi}{\omega} \quad (22)$$

由式(21)和(22)可计算出光谱的单个峰值位置。

正弦拟合需要确定 4 个参数幅值 A 、信号频率 f 、初相位 φ 和偏置量 B , 目前采用的四参数正弦拟合时信号频率 f 的确定, 多采用的迭代方式进行, 增加了数据计算量, 因此在三参数正弦拟合的基础上, 对信号频率 f 进行估计是一种更简单的方法, f 估计的准确性会影响拟合效果, 因此, 需要在此基础上对信号频率 f 估计方法进行优化。

2.3 三参数正弦拟合优化频率估计的方法

根据精度、实时性和信号质量的不同, 可以采用不同的正弦波序列频率估计方法^[25-29]。当获得等频间隔光谱序列后, 其函数关系式如式(14)所示, 令:

$$X_i = A \cos(\omega f_i + \varphi) \quad (23)$$

则观测点 I_i 的误差为 $\gamma_i, g = 2 \cos \omega$, 则有:

$$I_i = X_i + B + \gamma_i \quad (24)$$

$$X_i + X_{i-2} = (2 \cos \omega) X_{i-1} = g X_{i-1} \quad (25)$$

$$\begin{cases} I_i - B + I_{i-2} - B = g(I_{i-1} - B) \\ I_i - B - \gamma_i + I_{i-2} - B - \gamma_{i-2} = g(I_{i-1} - B - \gamma_{i-1}) \\ I_{i+1} - B - \gamma_{i+1} + I_{i-1} - B - \gamma_{i-1} = g(I_i - B - \gamma_i) \end{cases} \quad (26)$$

令:

$$Z_i = I_i - I_{i-1}$$

$$\zeta_i = \gamma_i - \gamma_{i-1}$$

由式(25)和(26)可得:

$$Z_{i+1} + Z_{i-1} - gZ_i = \zeta_i + \zeta_{i-1} - g\zeta_i \quad (27)$$

可将 γ_i 视为随机误差, 故式(27)右侧也可认为是随机误差, 此时需要适当选取 g 值, 使得:

$$\rho = \sum_3^{n-1} (Z_{i+1} + Z_{i-1} - g \cdot Z_i)^2 = \min \quad (28)$$

当 $\frac{d\rho}{dg} = 0$ 时, 有:

$$g = \frac{Z_n Z_{n-1} + Z_3 Z_2 + 2 \sum_{i=4}^{n-1} Z_i Z_{i-1}}{\sum_{i=3}^{n-1} Z_i^2} \quad (29)$$

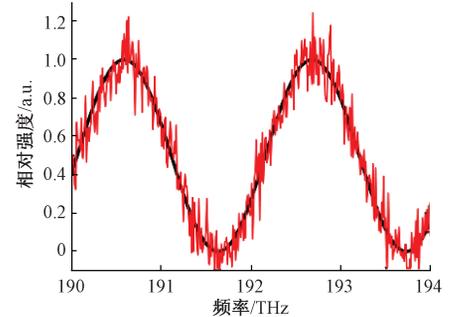
$$\omega = \arccos\left(\frac{g}{2}\right) \quad (30)$$

式中: ω 为数字角频率的最小二乘估计值。

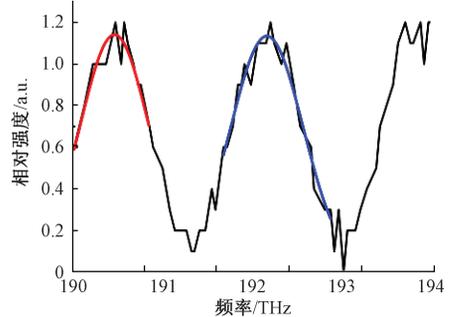
2.4 仿真验证

为了验证角频率选取优化方法的可行性, 本文在 MATLAB 中进行了验证。产生一组带有噪声的正弦函数

数据模拟包络光谱数据, 如图 4 所示, 其中横坐标为光波频率, 纵坐标为模拟光谱数据的相对强度值。按照前文所述方法对所选数据进行处理, 图 4(a) 中波动较大曲线为模拟光谱数据, 其角频率 $\omega = 3$, 平滑等号曲线为模拟光谱数据加噪声后的信号; 图 4(b) 中平滑曲线为提取图 4(a) 中加噪声后信号的包络, 并根据上述方式估计图 4(b) 所示的正弦曲线第 2 个峰值位置附近数据的角频率 $\omega = 2.85$, 用同样的方法对第 3 个峰值位置附近数据角频率进行估计, 分别对其进行三参数正弦拟合寻峰, 得到的结果如表 1 所示。



(a) 仿真信号及加噪声信号



(b) 包络信号的双峰拟合

图 4 正弦拟合法寻找双峰位置仿真

表 1 正弦拟合法寻找双峰位置仿真值 (THz)

项目	$f_{\max 1}$	$f_{\max 2}$
理论值	190.95	192.68
直接寻峰	190.61	192.66
三参数正弦拟合寻峰	190.93	192.69

3 实验验证与分析

为了验证该算法的可行性, 搭建了白光干涉型复合式光纤法珀传感器的解调实验装置, 其原理如图 5 所示。该装置主要由中心波长为 1 550 nm, 3 dB 带宽为 46 nm 的 ASE 光源(频率范围为 191.069~196.765 THz, 其频率光谱如图 6 所示)、3 端口光纤环行器, 空气腔腔长为 80 μm 的复合式光纤法珀压力传感器、小型光谱仪模块、信号处理电路以及计算机构成。

ASE 光源发射的近红外宽带光由 1 端口进入光纤环

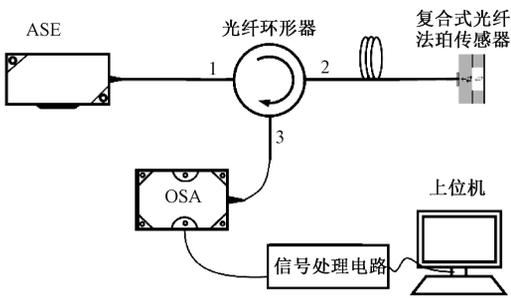


图 5 实验传感解调系统原理

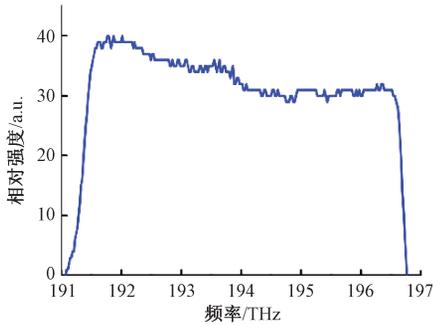


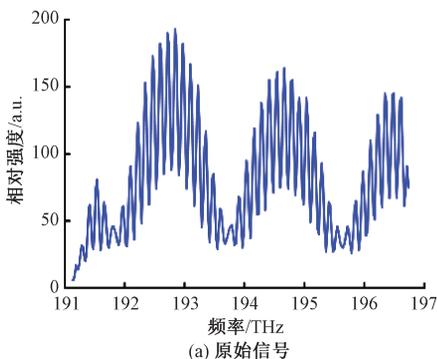
图 6 ASE 光源输出光谱

行器,并由光纤环形器 2 端口出射至复合式光纤法珀压力传感器,复合式光纤法珀压力传感器反射部分光返回光纤环形器 2 端口,并从光纤环形器 3 端口出射耦合进入小型光谱仪模块,光谱仪模块将采集到的光谱信息以模拟信号形式传送到信号处理电路,进行数据处理,并最终由计算机显示输出。

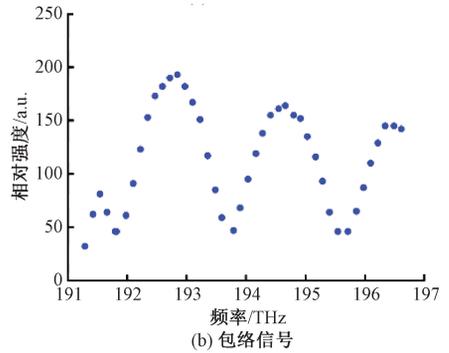
根据上文所述的实验方法,采用优化频率估计法的三参数正弦拟合寻峰算法,结合双峰法对复合腔光纤法珀传感器 $80\ \mu\text{m}$ 空气腔进行了解调实验。

图 7(a)所示为实际采集到的 $80\ \mu\text{m}$ 空气腔法布里珀罗传感器复合腔的原始干涉信号,将干涉信号的包络提取出来,得到图 7(b)所示的包络信号用于传感器空气腔的腔长解调。提取图 7(a)中第 2 个和第 3 个较为完整的峰值信号作为寻峰位置。

采用三参数正弦拟合的方法对上述两个峰值进行正弦



(a) 原始信号

图 7 空气腔腔长为 $80\ \mu\text{m}$ 的复合式光纤法珀压力传感器的反射光谱

拟合,确定峰值位置,拟合的效果如图 8 所示。

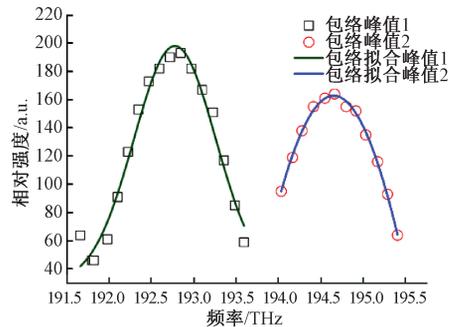


图 8 优化频率估计的三参数正弦拟合效果

根据三参数拟合寻峰定位后采用双峰法得到的参数如表 2 所示。

表 2 拟合寻峰峰值和腔长

项目	$f_{\max 1} / \text{THz}$	$f_{\max 2} / \text{THz}$	$d_2 / \mu\text{m}$
直接寻峰	192.843	194.663	82.398
三参数正弦拟合寻峰	192.775	194.653	79.900

通过计算可知,直接寻峰得到的腔长值相对误差达到了 3%,三参数正弦拟合寻峰算法得到的腔长值相对误差为 0.13%,可以看出采用三参数正弦拟合寻峰的双峰法解调法布里珀罗腔相比于直接寻峰具有更好的效果。

4 结 论

本文通过理论分析了复合式光纤法珀压力传感器反射光谱的特性,通过提取反射光谱的包络信号,利用优化频率估计的三参数正弦拟合寻峰算法对包络信号进行处理,精确确定两个相邻峰在频域上的位置,并由此计算频域上的周期,分析得到复合式光纤法珀压力传感器空气腔腔长,同时简化四参数正弦拟合中参数 f 使用迭代算法的计算量,减少了算法的总计算量,提高算法的实时性,算法简单易于实现。此算法可以显著提高白光干涉型复合式光纤法珀压

力传感器空气腔腔长解调的解调精度。对空气隙为 $80\ \mu\text{m}$ 复合腔光纤法珀传感器进行解调,相比于直接寻峰解调算法,相对误差由 3% 减小为 0.13%,减小了 25 倍,验证了方法的可行性,提高了解调精度。

参考文献

- [1] YOSHINO T, KUROSAWA K, ITOH K, et al. Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensor applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10):1624-1633.
- [2] FRANZEN D L, KIM E M. Long optical-fiber Fabry-Perot interferometers [J]. Applied Optics, 1981, 20(23):3991-3992.
- [3] KERSEY A D, JACKSON D A, CORKE M. A simple fibre Fabry-Perot sensor[J]. Optics Communications, 1983, 45(2):71-74.
- [4] CORKE M, LEILABADY P A. All-fiber-optic remote sensing of temperature employing interferometric techniques[J]. Optics Letters, 1987, 12(10):772-774.
- [5] NIEZRECKI C, WU N, WANG W, et al. Miniature all-silica optical fiber pressure sensor with an ultrathin uniform diaphragm[J]. Optics Express, 2010, 18(9):9006-9014.
- [6] CHOI H Y, PARK K S, PARK S J, et al. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer [J]. Optics Letters, 2008, 33(21):2455-2457.
- [7] PEVEC S, DONLAGIC D. All-fiber, long-active-length Fabry-Perot strain sensor[J]. Optics Express, 2011, 19(16):15641-15651.
- [8] GERGES A S, JACKSON D A, JONES J D C, et al. High-sensitivity fiber-optic accelerometer[J]. Optics Letters, 1989, 14(4):251-253.
- [9] ZHOU X, YU Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry - Perot interferometer for subnanometer measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(7):1602-1606.
- [10] MORENO-HERNANDEZ C, QUIROZ O R, MONZON-HERNANDEZ D, et al. Contactless optical fiber interferometric sensor to monitor water content in ethanol[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(8):1-1.
- [11] GANDER M J, MACPHERSON W N, BARTON J S, et al. Embedded micromachined fibre optic Fabry-Perot pressure sensors in aerodynamics applications [C]. Sensors, Proceedings of IEEE, 2003(2):1707-1712.
- [12] LIU H. Fabry-Perot fiber optic sensors in harsh environments[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002:118-128.
- [13] 张杰,荆振国,李昂,等.结构简单的熔接式全石英光纤 EFPI 高静压传感器[J].中国激光,2016,43(10):230-236.
- [14] CASALINO M. Design of resonant cavity enhanced schottky graphene/silicon photodetectors at 1 550 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018 (99):1-1.
- [15] YI J, LALLY E, WANG A, et al. Demonstration of an all-sapphire Fabry - Pérot cavity for pressure sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 23(1):9-11.
- [16] MILLS D A, ALEXANDER D, SUBHASH G, et al. Development of a sapphire optical pressure sensor for high-temperature applications [C]. SPIE Sensing Technology Applications, 2014:91130H.
- [17] 张鉴,戚昊琛,杨文华,等.一种用于胎压监测的 MEMS 压力传感器设计[J].电子测量与仪器学报, 2015, 29(10):1424-1430.
- [18] 许晓青,王宝光,孙春生.基于 MEMS 传感器技术的微型化、数字式倾角仪的研究[J].电子测量技术, 2008, 31(2):177-178,185.
- [19] LEE C E, TAYLOR H F. Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensor using a low-coherence light source[J]. Lightwave Technology Journal, 1991, 9(1):129-134.
- [20] DÄNDLIKER R, ZIMMERMANN E, FROSIO G. Electronically scanned white-light interferometry: A novel noise-resistant signal processing [J]. Optics Letters, 1992, 17(9):679-81.
- [21] HAN M, ZHANG Y, SHEN F, et al. Signal-processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optics Letters, 2004, 29(15):1736-8.
- [22] 姜雨娟,江俊峰,刘铁根,等.具有复合式法珀腔的光纤压力传感器的解调[J].光子学报, 2012, 41(3):283-287.
- [23] 孙雪铮,陈海星,顾培夫.引入衰减的多腔法布里-珀罗滤波器的特性分析[J].光学学报, 2005, 25(7):970-975.
- [24] 陈明睿,毕思文,豆西博.双腔法布里-珀罗腔透射特性[J].强激光与粒子束, 2010, 22(8):1870-1874.
- [25] 梁志国,张大治,孙璟宇,等.四参数正弦波曲线拟合的快速算法[J].计测技术, 2006(1):4-7,47.
- [26] 田健飞.一种基于曲线拟合的柱面图像匹配算法[J].电子测量技术, 2016, 39(2):61-63,68.
- [27] 杨扩军,田书林,蒋俊,等.基于 TIADC 的 20 GS/s 高速数据采集系统[J].仪器仪表学报, 2014, 35(4):841-849.
- [28] 张昊,师奕兵,王志刚.时间交替 ADC 系统通道时钟延迟的多频正弦拟合算法[J].电子测量与仪器学报, 2010, 24(3):244-249.
- [29] 冯飞,杨博.基于曲线拟合的水声换能器转移阻抗测量[J].中国测试, 2014, 40(3):44-47.

作者简介

唐瑛,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为光电检测、测试计量技术及仪器、光纤传感等。

E-mail:362749116@qq.com

王伟,1973 年出生,博士、教授,主要研究方向为光电测量、光纤传感。

E-mail:wangwei@xatu.edu.cn

张天阳,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感。

E-mail:1091832240@qq.com