

# 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

王伟<sup>1,2\*</sup>, 唐瑛<sup>1</sup>, 张雄星<sup>1,2</sup>, 陈海滨<sup>1,2</sup>, 郭子龙<sup>1</sup>, 王可宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;

<sup>2</sup> 陕西省组合与智能导航重点实验室, 陕西 西安 710068

**摘要** 建立了一种短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器反射光谱的模型, 提出了一种双参数椭圆拟合腔长解调算法, 并对腔长为 26~30  $\mu\text{m}$  的复合式法布里-珀罗腔的解调进行了仿真。结果表明, 采用双参数椭圆拟合算法进行腔长解调的最大误差仅为 0.05  $\mu\text{m}$ 。搭建了光纤法布里-珀罗传感器解调系统, 在加压条件下对复合式光纤法布里-珀罗压力传感器进行了解调实验, 实现了 20 kHz 的解调速率, 验证了所提算法在解调短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器方面的可行性与实时性。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 复合腔; 反射光谱; 6 个参数的椭圆拟合算法; 双参数椭圆拟合算法

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0606001

## Elliptical-Fitting Cavity Length Demodulation Algorithm for Compound Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor with Short Cavity

Wang Wei<sup>1,2\*</sup>, Tang Ying<sup>1</sup>, Zhang Xiongxing<sup>1,2</sup>, Chen Haibin<sup>1,2</sup>,  
Guo Zilong<sup>1</sup>, Wang Kening<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

<sup>2</sup> Shaanxi Key Laboratory of Integrated and Intelligent Navigation, Xi'an, Shaanxi 710068, China

**Abstract** A reflection spectrum model of a compound fiber-optic Fabry-Perot (FP) pressure sensor with short length is established, a two-parameter ellipse-fitting cavity length demodulation algorithm is proposed, and the demodulation for FP-cavity lengths in the range of 26-30  $\mu\text{m}$  is simulated. The results show that the maximum error for the demodulated two-parameter ellipse-fitting cavity length is only 0.05  $\mu\text{m}$ . A demodulation system for the fiber-optic FP sensor is established, and the experiments under different pressures are conducted. A 20-kHz demodulation rate is achieved. Thus, the feasibility and real-time performance of the proposed algorithm for demodulating a compound fiber-optic FP pressure sensor with a short cavity are verified.

**Key words** fiber optics; fiber-optic sensors; compound cavity; reflection spectrum; six-parameter ellipse fitting algorithm; two-parameter ellipse fitting

**OCIS codes** 060.2370; 120.2230

## 1 引 言

光纤传感器具有环境适应性强、抗电磁干扰、测量精度高等优点<sup>[1-4]</sup>。利用微机电系统(MEMS)技术<sup>[5-7]</sup>制作微型光学法布里-珀罗腔式压力传感芯片,把传感芯片和光纤耦合起来,采用光学方法进行传感与解调,以构成非本征型法布里-珀罗干涉

(EFPI)光纤传感器。相对传统的压力传感器,光纤法布里-珀罗腔传感器具有尺寸小、侵入性低、响应速度快、不受电磁干扰、可多点分布测量和工作温度高等优点。压力敏感膜片采用碳化硅(SiC)和蓝宝石等材料,适用于燃气轮机和航空/航天发动机等高温恶劣环境,并已成为极端环境下压力传感器领域的主流研究方向。

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-01-24; 录用日期: 2019-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(31671002,61501363)、陕西省组合与智能导航重点实验室开放基金(SKLIIN-20180210)、西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45)、西安市科协青年人才托举计划(6)

\* E-mail: wangwei@xatu.edu.cn

光纤法布里-珀罗传感器的解调方法可分为强度解调和相位解调两大类<sup>[8-11]</sup>。强度解调法的精度依赖于光源功率的稳定性,且解调范围小。相位解调法是目前主流的解调方法,主要包括傅里叶变换法、双峰法和单峰法等<sup>[12-13]</sup>。光纤法布里-珀罗压力传感器中的空气腔对压力较敏感,腔长越短,温度耦合系数越小,则温度变化引起的腔长变化越小,所以短腔长法布里-珀罗腔是光纤法布里-珀罗压力传感器的趋势,目前最为常见的法布里-珀罗压力传感器的腔长为 20~30 μm。

解调仪常用的光源为自发辐射放大(ASE)光源,其谱宽为 40~50 nm。当传感器腔长为 20~30 μm、解调系统的光谱宽度为 40~50 nm 时,传感器的反射光谱中不会出现两个谱峰,因此双峰法失效。此条件下傅里叶变换法的截断误差较大,使得解调误差增大;而单峰法虽然具有较高的解调精度,但其测量范围受限于  $\lambda/2$ ( $\lambda$  为波长)。Gao 等<sup>[14]</sup>提出的 5 步移相求相位的方法虽可解调腔长为 16~12402 μm 的光纤法布里-珀罗传感器,但其解调精度最高仅为 0.5 μm。针对以上分析的短腔长法布里-珀罗腔解调存在的问题,采用椭圆拟合法<sup>[15-16]</sup>计算其光谱信号的周期,进而计算其腔长。但是椭圆拟合方程有 6 个待定系数,计算量大,且实时性差。考虑到进行高动态压力测量时需要高速解调,本文提出了双参数椭圆拟合解调法。与 6 个参数的椭圆拟合方程相比,双参数椭圆拟合建立的椭圆方程只有两个待定系数,其相位差的计算公式更简洁,所提方法在显著降低计算量的同时提高了解调速度。

本文对短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器的反射光谱信号进行分析,提取含有压力信息的包络信号,并提出了双参数椭圆拟合算法,显著减小了计算的复杂度,从而提高了算法的实时性。通过仿真和实验验证了该方法的可行性。

## 2 复合式光纤法布里-珀罗压力传感器腔长解调原理

复合式光纤法布里-珀罗压力传感器包含较长腔体的基底腔和较短腔体的空气腔。压力传感器端面的压力传感芯片在外部压力的作用下发生弹性形变,导致空气腔的腔长随外部压力呈线性变化。使用宽带光源照射复合式光纤法布里-珀罗压力传感器,利用腔体的反射光谱实现对腔长的实时解调。

复合式光纤法布里-珀罗压力传感器的基本结构如图 1 所示。首先对三个反射面组成的复合式光

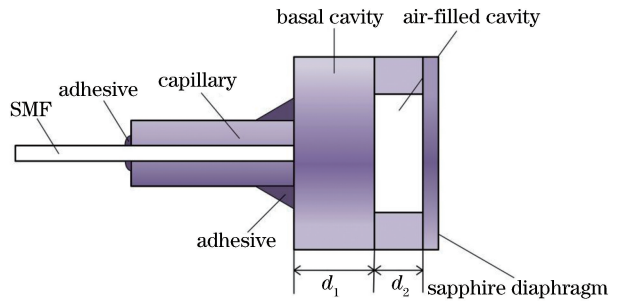


图 1 复合式光纤法布里-珀罗压力传感器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of compound fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor

纤法布里-珀罗压力传感器的输出光谱进行原理分析。当宽带光源发出的光通过光纤耦合进入复合式光纤法布里-珀罗压力传感器时,一部分光在光纤和传感器基底的接触面被反射,另一部分光透射并在基底和空气腔的接触面上被反射。剩余的光则继续向前传播并在空气腔和敏感膜片构成的接触面上被部分反射。这三部分光相互叠加、干涉后重新耦合进入原光纤光路<sup>[17]</sup>。假定光纤和传感器基底的接触面、基底和空气腔的接触面和空气腔和敏感膜片构成的接触面这三个界面上的反射率分别为  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ 。基底腔的腔长为  $d_1$ ,空气腔的腔长为  $d_2$ 。若忽略光纤损耗的影响,可将复合式光纤法布里-珀罗传感器的反射率表示为

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

其中

$$K = R_1 + R_2 + R_3 + R_1 R_2 R_3 + 2(R_3 + \sqrt{R_1 R_2}) \cos(2n_1 k d_1) + 2(1 + R_1) \sqrt{R_2 R_3} \cos(2n_2 k d_2) + 2(1 + R_2) \sqrt{R_1 R_3} \cos[2k(n_1 d_1 + n_2 d_2)], \quad (2)$$

$$D = 1 + R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3 + 2(1 + R_3) \sqrt{R_1 R_2} \cos(2kn_1 d_1) + 2(1 + R_1) \sqrt{R_2 R_3} \cos(2kn_2 d_2) + 2(1 + R_2) \sqrt{R_1 R_3} \cos[2k(n_1 d_1 + n_2 d_2)], \quad (3)$$

式中:波数  $k=2\pi/\lambda=2\pi f/c$ ;  $n_1$  和  $n_2$  分别为基底腔和空气腔的折射率;  $\lambda$  为光波波长;  $f$  为光波频率;  $c$  为真空光速。当反射率  $R_1, R_2, R_3$  都较小时,  $D \approx 1, K$  中的低频项为

$$I_B = 2\sqrt{R_2 R_3} (1 + R_1) \cos(2n_2 k d_2), \quad (4)$$

式中:  $I_B$  为传感器空气腔的干涉信号, 其周期  $T_B$  可表示为

$$T_B = \frac{c}{2n_2 d_2}. \quad (5)$$

当  $n_2 = 1$ , 根据(5)式, 空气腔腔长  $d_2$  可以表示为

$$d_2 = \frac{c}{2T_B}. \quad (6)$$

### 3 法布里-珀罗腔解调的椭圆拟合算法

根据前文所述, 空气腔的干涉信号反映了外界压力的变化, 因此需要对空气腔的干涉信号单独进行分析。由(4)式可知, 复合式法布里-珀罗腔光谱中空气腔的干涉信号近似为余弦信号, 假设空气腔的干涉信号为  $I_s(f)$ , 沿横坐标平移  $\tau$  ( $\tau$  小于信号周期) 后得到的信号为  $I_s(f+\tau)$ , 根据(4)式建立的两路信号的数学表达式为

$$\begin{cases} I_s(f) = 2\sqrt{R_2 R_3} (1 + R_1) \cos\left(\frac{4\pi n_2 d_2}{c} f\right) + H \\ I_s(f + \tau) = 2\sqrt{R_2 R_3} (1 + R_1) \cos\left[\frac{4\pi n_2 d_2}{c} (f + \tau)\right] + H \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $H$  为信号中的直流偏量。

将  $I_s(f)$  和  $I_s(f+\tau)$  分别作为横、纵坐标轴绘制李萨如图<sup>[18-19]</sup>, 对该李萨如图进行椭圆拟合, 可得到空气腔干涉信号的周期, 并根据(6)式得到复合式光纤法布里-珀罗传感器空气腔的腔长。

#### 3.1 6个参数的椭圆拟合算法

##### 3.1.1 6个参数的椭圆拟合方程建立

作为二次曲线的一种, 椭圆在二维平面坐标系中可用圆锥曲线方程来表示。椭圆方程的一般表达式为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0, \quad (8)$$

式中:  $A, B, C, D, E$  和  $F$  为椭圆方程的6个参量;  $x$  和  $y$  为椭圆方程的两个坐标参量。

设椭圆上观测点的坐标为  $(x_i, y_i)$ , 利用(8)式可以建立如下线性方程组:

$$Ax_i^2 + Bx_i y_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F' = 1, \quad (9)$$

式中: 点序号  $i = 1 \sim n$ ,  $n$  为采样点数; 参数  $F' = F - 1$ 。则可采用矩阵来求解  $A, B, C, D, E$  和  $F$  6个参数。(9)式可改写为如下矩阵表达形式:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

为简化处理, 令  $\mathbf{G}_{n \times 6} =$

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \\ F \end{bmatrix}.$$

此时方程组可改写为

$$\mathbf{G}_{n \times 6} \mathbf{H}_{6 \times 1} = \mathbf{I}, \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

通过分析可知, (11)式为超定线性方程组, 将其变换为正定线性方程组:

$$\mathbf{G}_{n \times 6}^T \mathbf{G}_{n \times 6} \mathbf{H}_{6 \times 1} = \mathbf{G}_{n \times 6}^T \mathbf{I}. \quad (12)$$

求解该正定线性方程组, 可得到6个参数  $A, B, C, D, E$  和  $F$ , 即可求得椭圆方程。

##### 3.1.2 信号相位差及周期计算

将信号  $I_s(f)$  及其平移信号  $I_s(f+\tau)$  分别作为横、纵坐标轴, 绘制李萨如图, 采用6个参数的椭圆拟合算法拟合的李萨如图如图2所示。图2的椭圆中心位置由信号中的直流偏量  $H$  决定, 中心坐标为  $(H, H)$ , 椭圆上  $P$  和  $Q$  两个极值点的坐标分别为  $(x_P, y_P)$  和  $(x_Q, y_Q)$ 。

(7)式中  $I_s(f)$  的相位为  $\pi/2$ , 即  $(4\pi n_2 d_2 f)/c = \pi/2$  时, 两路信号的数学表达式分别为

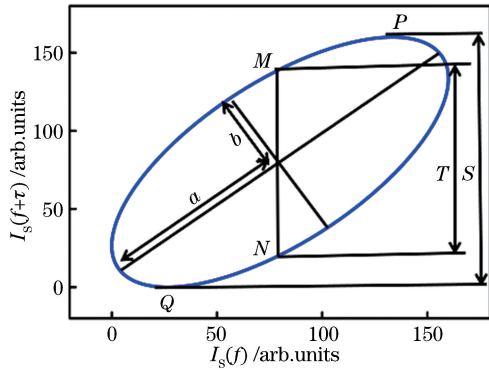


图 2 采用 6 个参数的椭圆拟合算法拟合的李萨如图  
Fig. 2 Lissajous figure obtained by six-parameter ellipse-fitting algorithm

$$\begin{cases} I_s(f) = H \\ I_s(f + \tau) = 2\sqrt{R_2 R_3} (1 + R_1) \sin\left(\frac{4\pi n_2 d_2}{c} \tau\right) + H^\circ \end{cases} \quad (13)$$

(13)式对应图 2 中横坐标  $I_s(f) = H$  的点,即  $M$  和  $N$  两点,其坐标分别为  $(x_M, y_M)$  和  $(x_N, y_N)$ 。 $T$  为  $M, N$  之间的距离,  $S$  为  $P, Q$  之间的距离。利用最小二乘法解得关于  $A, B, C, D, E$  及  $F$  的  $T$  和  $S$  的表达式分别为

$$S = \frac{4\sqrt{A^2 E^2 - ABED - 4A^2 CF + ACD^2 + AB^2 F}}{4AC - B^2}, \quad (14)$$

$$T = \frac{2\sqrt{4A^2 C^2 E^2 - 4ABC^2 DE - A^2 B^2 C^2 - AB^2 CE^2 + 4AD^2 C^3 - 16A^2 C^3 F + B^3 CDE + 8AB^2 C^2 F - B^4 CF}}{C(4AC - B^2)}. \quad (15)$$

信号  $I_s(f)$  和信号  $I_s(f + \tau)$  的相位差  $\varphi_1$  可表示为

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{T}{S}\right). \quad (16)$$

此时信号  $I_s(f)$  的周期  $T_s(f)$  为

$$T_s(f) = \frac{2\pi}{\varphi_1} \tau. \quad (17)$$

### 3.2 双参数椭圆拟合算法

第 3.1.1 节和第 3.1.2 节中所提出方法的基本过程为:首先建立椭圆方程,基于信号  $I_s(f)$  及其平移信号  $I_s(f + \tau)$ ,通过椭圆拟合确定相位差  $\varphi_1$  和信号周期  $T_s(f)$ 。利用 6 个参数的椭圆拟合算法,通过求解逆矩阵得到椭圆方程的基本参数。目前使用较多的求解逆矩阵的方法为正交三角(QR)分解法、LU(lower-upper)分解法和改进型 Cholesky 分解法<sup>[20-23]</sup>,这三种分解法的复杂度统计见表 1。从表 1 中可以看出分解法的复杂度与乘法和除法的次数相关,并且随着矩阵阶数  $n$  的增大呈现指数增长,这将引起高阶矩阵求逆存在时复杂度较高的问题。另外,(14)~(16)式所示的相位求解方法,需要经过多次乘法及开方计算,这进一步增加了求解算法的复杂度。为了降低该算法的复杂度并提高执行效率,在此提出了一种双参数椭圆拟合方法。

#### 3.2.1 双参数椭圆拟合方程建立

由于信号  $I_s(f)$  和信号  $I_s(f + \tau)$  仅相位不同,拟合后的椭圆长轴  $a$  与  $X$  轴的夹角始终为  $45^\circ$ 。椭圆中心位置为  $(H, H)$ 。假定原坐标系为  $XY$  坐标

表 1 QR 分解法、LU 分解法和改进型 Cholesky 分解法的复杂度统计

Table 1 Complexity statistics of QR, LU, and improved Cholesky decomposition methods

Method	QR	LU	Improved Cholesky
Multiplication	$(3n^3 - n)/2$	$(n^3 + 2n)/3$	$n(n-1)^2/3$
Division	$(3n^2 - n)/2$	$n(n-1)/2$	$n(n-1)/2$
Addition	$3n^2(n-1)/2$	$(3n^2 - 4n + 1)/2$	$n(n-1)$

系,变换后的坐标系为  $X'Y'$  坐标系。令  $X'Y'$  坐标系相对于原坐标系逆时针旋转  $45^\circ$ ,则  $XY$  坐标系中的某一点  $(x, y)$  变换到  $X'Y'$  坐标系的位置  $(x', y')$  的变换公式可表示为

$$\begin{cases} x' = \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \\ y' = \frac{\sqrt{2}}{2}y - \frac{\sqrt{2}}{2}x \end{cases}. \quad (18)$$

令  $X'Y'$  坐标系相对于原坐标系逆时针旋转  $45^\circ$  后,  $X'Y'$  坐标系下椭圆的中心坐标为  $(\sqrt{2}H, 0)$ 。将椭圆向坐标原点水平平移  $\sqrt{2}H$  距离(即  $x'' = x' - \sqrt{2}H$ ),建立  $X'Y'$  坐标系的中心在坐标原点的椭圆方程:

$$\frac{(x'')^2}{a'^2} + \frac{(y')^2}{b'^2} = 1, \quad (19)$$

式中:  $a'$  和  $b'$  分别表示椭圆的两个轴长。

设椭圆上观测点的坐标为  $(x'_j, y'_j)$ , 则利用

(19)式可以建立如下方程:

$$\frac{(x''_j)^2}{a'^2} + \frac{(y'_j)^2}{b'^2} = 1, \quad (20)$$

式中:点序号  $j=1\sim n$ 。矩阵形式表示如下:

$$\begin{bmatrix} (x''_1)^2 & (y'_1)^2 \\ (x''_2)^2 & (y'_2)^2 \\ \vdots & \vdots \\ (x''_{n-1})^2 & (y'_{n-1})^2 \\ (x''_n)^2 & (y'_n)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{a'^2} \\ \frac{1}{b'^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

式中: $x''_j$  为在  $X'Y'$  坐标系下将椭圆向坐标原点水平平移 $\sqrt{2}H$  距离后得到的坐标值。

$$\text{令 } \mathbf{G}'_{n \times 2} = \begin{bmatrix} (x''_1)^2 & (y'_1)^2 \\ (x''_2)^2 & (y'_2)^2 \\ \vdots & \vdots \\ (x''_{n-1})^2 & (y'_{n-1})^2 \\ (x''_n)^2 & (y'_n)^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}'_{2 \times 1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a'^2} \\ \frac{1}{b'^2} \end{bmatrix}, \text{ 则(21)式可表示为}$$

$$\mathbf{G}'_{n \times 2} \mathbf{H}'_{2 \times 1} = \mathbf{I}. \quad (22)$$

分析可知,(22)式为超定线性方程组。对(22)式进行变换可得到正定线性方程组:

$$(\mathbf{G}'_{n \times 2})^T \mathbf{G}'_{n \times 2} \mathbf{H}'_{2 \times 1} = (\mathbf{G}'_{n \times 2})^T \mathbf{I}. \quad (23)$$

求解(23)式的正定线性方程组,即可求得双参数  $a'$  和  $b'$ 。

### 3.2.2 双参数椭圆拟合信号相位差及周期计算

信号  $I_s(f)$  和信号  $I_s(f+\tau)$  的相位差  $\varphi_2$  由椭圆的长轴  $b'$  与短轴  $a'$  之比确定,其表达式为

$$\varphi_2 = 2\arctan\left(\frac{b'}{a'}\right). \quad (24)$$

信号  $I_s(f)$  的周期  $T_s(f)$  为

$$T_s(f) = \frac{2\pi}{\varphi_2} \tau. \quad (25)$$

由(6)式得到法布里-珀罗腔空气腔的腔长为

$$d_2 = \frac{c}{2T_s(f)}. \quad (26)$$

## 4 双参数椭圆拟合算法仿真

对双参数椭圆拟合算法进行仿真。采用石英玻璃制备传感器芯片,其折射率为 1.45。基底厚度设为  $650 \mu\text{m}$ ,空气腔长度设为  $30 \mu\text{m}$ 。解调系统的光源为 ASE,光谱范围为  $1524\sim 1570 \text{ nm}$ 。根据复合腔反射光谱模型,计算传感器的反射光谱信号。滤

除光谱信号中的高频成分,即基底腔的干涉信号,从而提取出空气腔的干涉信号。短腔长复合式法布里-珀罗传感器的反射光谱及提取出的空气腔的干涉信号如图 3 所示。

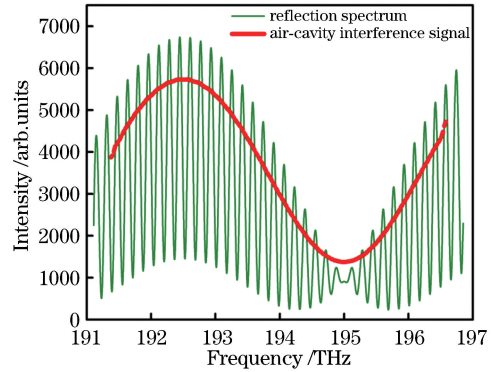


图 3 短腔长复合式法布里-珀罗传感器的反射光谱及提取出的空气腔的干涉信号

Fig. 3 Reflection spectrum of compound FP sensor with short cavity and interferometric signal for cavity filling with air

令空气腔的干涉信号沿频率轴平移  $\tau = 1.238 \text{ THz}$ , 绘制李萨如图。对该李萨如图进行双参数椭圆拟合得到其拟合椭圆,拟合度  $R^2$  为 0.984, 如图 4 所示。

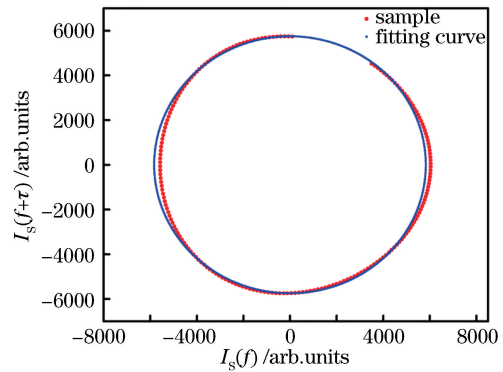


图 4 令空气腔的干涉信号沿频率轴平移  $\tau = 1.238 \text{ THz}$  后得到的李萨如图

Fig. 4 Lissajous figure when interferometric signal has translation of  $\tau = 1.238 \text{ THz}$  along frequency axis

图 4 中拟合椭圆的长短轴分别为  $a = 5829.72$  和  $b = 5747.58$ 。根据(26)式得到光谱包络平移  $\tau (\tau = 1.238 \text{ THz})$  对应的相位变化  $\varphi = 89^\circ 11'$ , 光谱包络的周期为  $5.000 \text{ THz}$ , 将其代入(26)式可得空气腔的腔长  $d_2$  为  $29.989 \mu\text{m}$ , 其误差为  $0.011 \mu\text{m}$ 。当空气腔的腔长为  $26\sim 30 \mu\text{m}$  时,采用双参数椭圆拟合算法计算的空气腔腔长如表 2 所示,其误差最大为  $0.05 \mu\text{m}$ 。

## 5 短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器腔长解调实验

针对短腔长复合式光纤法布里-珀罗传感器腔长的解调,搭建了如图 5 所示的光纤法布里-珀罗传感器解调系统。该解调系统由 ASE 光源、光纤环行器、高速光谱仪模块、解调电路与上位机构成。其中,ASE 光源的光谱范围为 1524~1570 nm,谱宽为 46 nm。光谱仪模块为 Ibsen Photonics 公司的高速光谱仪模块 I-MON 256 OEM,解调电路采用 FPGA 芯片作为微控制器,通过串口发送反射光谱及解调腔长。该解调系统采用双参数椭圆拟合解调法对法布里-珀罗腔传感器进行腔长解调,解调速度

表 2 当空气腔的腔长为 26~30 μm 时,采用双参数椭圆拟合算法计算的空气腔腔长仿真结果

Table 2 Calculation results of length of cavity filling with air obtained by two-parameter ellipse-fitting algorithm for cavity length in range of 26-30 μm

Simulated cavity length /μm	Demodulation cavity length /μm	Period /THz	Error /μm	R <sup>2</sup>
30	29.989	5.000	-0.011	0.984
29	28.995	5.173	-0.005	0.998
28	28.024	5.352	0.024	0.986
27	27.050	5.545	0.050	0.998
26	25.972	5.775	-0.028	0.996

达到了 20 kHz,而如果采用 6 个参数的椭圆拟合算法,其解调速度仅能达到 1.5 kHz 左右。

为验证该基于双参数椭圆拟合算法的光纤法布里-珀罗传感器解调系统的实际解调效果,以腔长为 30 μm 的空气腔的短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器为解调对象,进行压力传感实验。该短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器如图 6 所示,其基底腔厚度为 650 μm,整个结构通过高温阳极键合方法制备而成。压力传感实验装置如图 7 所示,由气瓶、压力控制器、压力密闭箱、压力传感器、解调仪和检测上位机组成。传感器的传感头完全放进压力密闭箱内,由气瓶提供气体加压,并通过压力控制器来控制箱体内的压力。

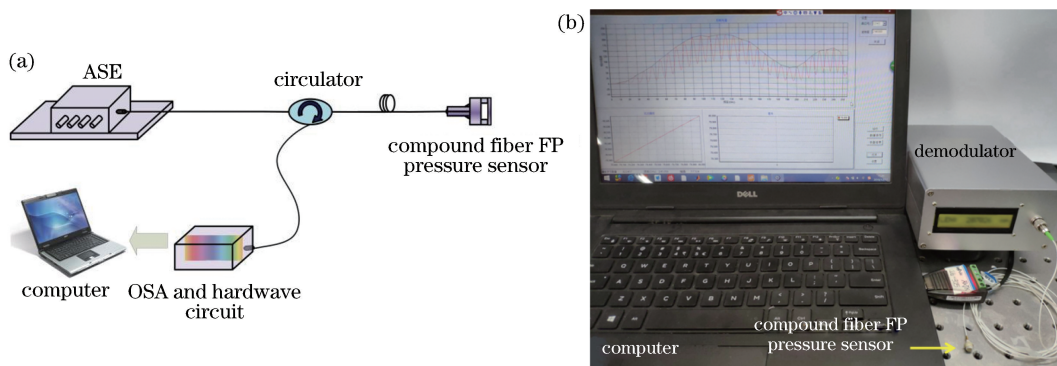


图 5 光纤法布里-珀罗传感器解调系统。(a)原理图; (b)实物

Fig. 5 Demodulation system for fiber-optic Fabry-Perot sensor. (a) Schematic; (b) physical map

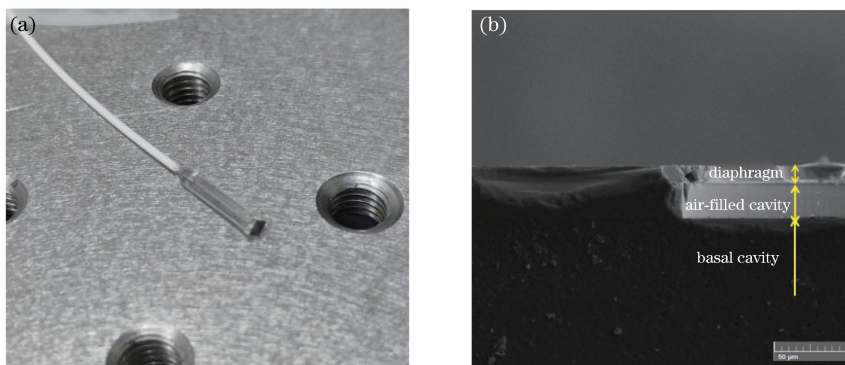


图 6 短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器。(a)实物图; (b)扫描式电子显微镜(SEM)图

Fig. 6 Compound fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor with short cavity. (a) Physical map; (b) SEM image

使用压力传感实验装置对短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器进行压力加载实验。实验在室温 25 °C 的条件下进行,压力以步长为 0.2 MPa 的间隔从 0.1 MPa 升压到 3 MPa,在每升压 0.2 MPa 稳定 5 min 后记录空气腔的腔长值。图 8(a)为 0.1, 0.3, 0.5 MPa 三种压力条件下空气腔的反射光谱包络曲线。图 8(b)是传感器空气腔的腔长-压力特性响应曲线。实验结果表明:传感器在 0.1~3 MPa 压力范围内的灵敏度为 0.7 nm/kPa,腔长-压力特性曲线的非线性误差为 0.5%。由以上实验及结果可知,双参数椭圆拟合解调算法可用于短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器的准确解调,且具有较好的实时性。

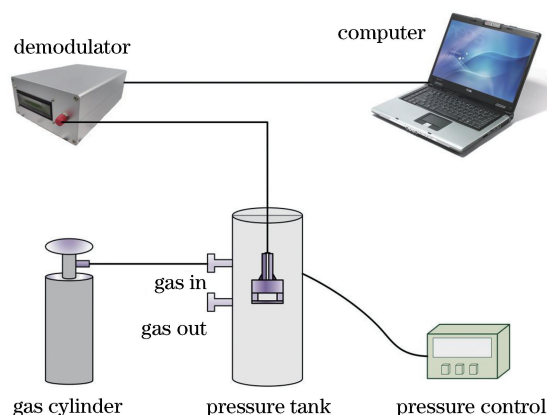
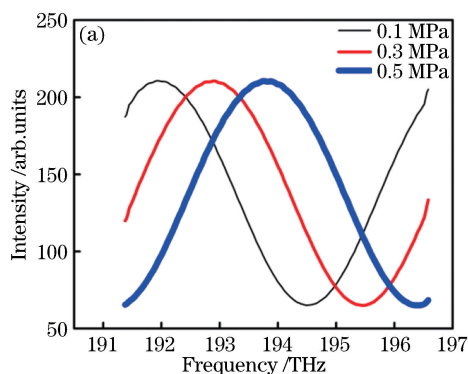


图 7 压力传感实验装置

Fig. 7 Experimental setup for pressure sensing

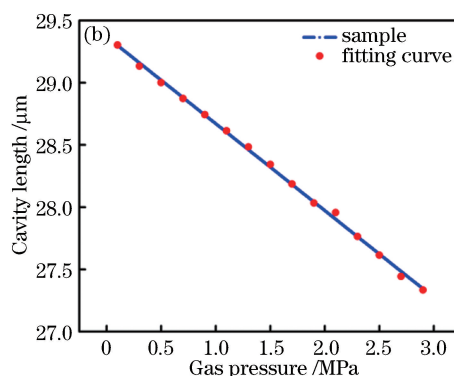


图 8 压力传感实验结果。(a)分别在 0.1, 0.3, 0.5 MPa 三种压力条件下空气腔的反射光谱包络曲线;  
(b)传感器空气腔的腔长-压力特性响应曲线

Fig. 8 Experimental results of pressure sensing. (a) Reflection spectra for cavity filling with air under three kinds of pressure-loading conditions of 0.1, 0.3, and 0.5 MPa; (b) sensor cavity length versus pressure

## 6 结 论

从复合腔的原理上分析了复合式光纤法布里-珀罗压力传感器反射光谱的形成机理,建立了法布里-珀罗腔反射光谱的数学模型,推导出法布里-珀罗空气腔的腔长与其干涉信号周期的关系,采用双参数椭圆拟合算法对其光谱数据进行仿真。仿真结果表明,该双参数椭圆拟合算法对于短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器的最大空气腔的腔长解调误差仅为 0.05  $\mu\text{m}$ 。另外,基于双参数椭圆拟合算法搭建了光纤法布里-珀罗传感器解调系统,在加压条件下,对短腔长复合式光纤法布里-珀罗压力传感器进行了空气腔的腔长解调实验,其解调速率可达 20 kHz,验证了所提的双参数椭圆拟合算法的有效性与实时性。

## 参 考 文 献

- [1] Lee C E, Taylor H F. Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensor using a low-coherence light source [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(1): 129-134.
- [2] Kao T W, Taylor H F. High-sensitivity intrinsic fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor [J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 615-617.
- [3] Jiang M Z, Gerhard E. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 88(1): 41-46.
- [4] Chen Q Q, Tang Y, Wang K N, *et al.* Characteristic analysis of correlation interference signals in optical wedge type fiber Fabry-Perot sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110603. 陈青青, 唐瑛, 王可宁, 等. 光楔式光纤法布里-珀罗传感器相关干涉信号特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110603.
- [5] Guo Z H, Li Y H, Yang H, *et al.* Tunable Fabry-Perot optical filter based on micro-electro mechanical system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0604007.

- 郭智慧, 李拥华, 杨恒, 等. 基于微机电系统的法布里-珀罗可调光滤波器[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0604007.
- [6] Li M, Wang M, Li H P. Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry [J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1497-1504.
- [7] Zhang J F, Zhuang X Y, Wang W M, *et al.* Structure design and analysis of a new type MEMS Fabry-Perot filter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822005.  
张建飞, 庄须叶, 汪为民, 等. 一种新型微机电系统法布里-珀罗滤波器的设计与分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822005.
- [8] Zheng Z X, Huang Y Q. Diaphragm type optical fiber MEMS pressure sensors based on F-P cavity interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(12): 1488-1492.  
郑志霞, 黄元庆. 基于 F-P 腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器[J]. 光子学报, 2012, 41(12): 1488-1492.
- [9] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [10] Han M, Zhang Y, Shen F B, *et al.* Signal-processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. Optics Letters, 2004, 29(15): 1736-1738.
- [11] Xie J H, Wang F Y, Pan Y, *et al.* High resolution signal-processing method for extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 22: 1-6.
- [12] Sun X Z, Chen H X, Gu P F. Characteristic analysis of multi-cavities Fabry-Perot filters with attenuation [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 970-975.  
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.
- [13] Chen M R, Bi S W, Dou X B. Transmission characteristics of two-cavity Fabry-Perot structure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1870-1874.  
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.
- [14] Gao H C, Jiang Y, Zhang L C, *et al.* Five-step phase-shifting white-light interferometry for the measurement of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. Applied Optics, 2018, 57(5): 1168-1173.
- [15] Ahn S J, Rauh W, Warnecke H J. Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(12): 2283-2303.
- [16] Xu A P, Wang Z Y, Kong D L, *et al.* A new ellipse fitting method of the minimum differential-mode noise in the atom interference gravimeter[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(7): 070203.
- [17] Jiang L J, Jiang J F, Liu T G, *et al.* Demodulation of cascade optical fiber Fabry-Perot pressure sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(3): 283-287.  
姜丽娟, 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.
- [18] Liu F W, Wu Y Q, Wu F. Correction of random phase-shifts errors based on Lissajous calibration[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015(2): 89-94.  
刘锋伟, 吴永前, 伍凡. 随机相移误差的 Lissajous 标定与校正[J]. 光电工程, 2015(2): 89-94.
- [19] Guo R H, Li J X, Zhu R H, *et al.* Wavelength-tuned phase-shifting calibration based on the Lissajous figures technique [J]. Optical Technique, 2010, 36(2): 200-204.  
郭仁慧, 李建欣, 朱日宏, 等. 基于 Lissajous 图技术的波长移相标定方法[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 200-204.
- [20] Feng S S. Research on matrix inversion in massive MIMO systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.  
冯双双. 基于 Massive MIMO 的矩阵求逆算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [21] Li Y Q. Research and implementation of matrix inversion in Massive MIMO[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.  
李应谦. Massive MIMO 中矩阵求逆算法的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [22] Xia J. A comparative study of ellipses fitting methods [D]. Guangzhou: Jinan University, 2007.  
夏菁. 椭圆拟合方法的比较研究[D]. 广州: 暨南大学, 2007.
- [23] Shen B, Hua Q, Wang Q, *et al.* Linear signal detection based on simplified matrix inversion in massive MIMO systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016, 39(6): 77-81.  
申滨, 华权, 王倩, 等. 基于矩阵求逆化简的大规模 MIMO 系统线性信号检测[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(6): 77-81.