

基于 Lissajous 曲线拟合的 EFPI 光纤传感器腔长解调

王 彦, 蒋 超, 周子玮, 黄晨晨, 程东升

(安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 为提高非本征光纤法珀传感器 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric, EFPI) 腔长解调的精度, 基于 EFPI 传感器反射光谱近似余弦函数的特性, 设计了一种基于李萨如图形 (Lissajous-Figure) 与标准形式椭圆曲线拟合的解调方法。将两组光强信号经过坐标变换拟合为标准椭圆曲线, 以减少求解参数; 并通过经验模态分解对数据进行分析, 去余项后将得到的极值点代入椭圆曲线求解。将离散数据点分别移动 5、10、15、20、25 个点测试五组不同相相对解调结果的影响并选取其中误差最小的一组对 EFPI 传感器进行横向负载实验, 分别施加 5~25 N 的应力, 通过拟合椭圆曲线的解调方法将计算腔长差与理论腔长差相对比。结果表明, 实际腔长差随负载成正比, 平均误差值为 5.690% 左右, 可以准确获取 EFPI 的腔长。

关键词: EFPI 光纤传感器; 李萨如曲线拟合; 经验模态分解; 腔长解调

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210765

Cavity length demodulation of EFPI optical fiber sensor based on Lissajous curve fitting

Wang Yan, Jiang Chao, Zhou Ziwei, Huang Chenchen, Cheng Dongsheng

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of cavity length demodulation of Extrinsic Fabry-Perot Interferometric (EFPI), a demodulation method based on the approximate cosine function of the reflection spectrum was designed based on Lissajous-Figure and standard elliptic curve fitting. The two sets of light intensity signals were fitted into standard elliptic curves by coordinate transformation to reduce the required parameters; The empirical mode decomposition was used to analyze the data. The extreme point obtained after the baseline was taken into the elliptic curve to solve the problem. The discrete data points were moved by 5, 10, 15, 20 and 25 points respectively to test the influence of five groups of different phase shifts on the demodulation results, and the group with the smallest error was selected for the transverse load experiment of EFPI sensor. The stress of 5-25 N was applied respectively, the calculated cavity length difference was compared with the theoretical cavity length difference by the demodulation method of fitting elliptic curve. The results show that the actual cavity length difference is proportional to the load, the average error is about 5.690%, and the cavity length of EFPI can be obtained accurately.

Key words: EFPI optical fiber sensor; Lissajous curve fitting; empirical mode decomposition; cavity length demodulation

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-20

基金项目: 安徽省科技重大专项 (201903 a05020029)

作者简介: 王彦, 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为智能监测与控制、光电测试技术、结构健康监测。

0 引言

非本征光纤法珀传感 (Extrinsic Fabry-Perot Interferometric, EFPI) 是当下光纤传感器研究领域的一个重要分支, 因为易于集成且不受电磁干扰等优点^[1], 在复合材料、大型建筑结构、军工产品等的结构健康自诊断、医疗微创器械位置追踪等领域都有广阔的应用前景^[2]。随着传感技术的发展, 在如超大规模集成电路制作、复杂环境下的探测等领域都需要更高精度的传感器^[3], 而对其光谱解调方法是决定其能否实现高精度测量的关键。

EFPI 传感器腔长信号解调方法主要分为强度解调和相位解调。强度解调法原理简单且成本低^[4], 但光源自身稳定因素的影响对解调结果影响较大, 精确度不高。三波长自适应强度解调法可以解决光源稳定问题^[5], 且测量范围大, 但是解调速度慢。传统相位解调法有高灵敏度高分辨率等优点, 但仍然不适合高速测量^[6]。田培廷^[7]提出将波长不同的 2 束呈正交光由单光纤经耦合器送入 F-P 腔, 然后再通过密集波分复用器将两个波长的反射光分开并分别进行处理, 在 0 ~ 20 Hz 的低频率范围内具有良好的线性响应。何文涛^[8]提出的采用复域相关法求取腔长的多腔长解调方法, 先运用基于高斯拟合 FFT 算法粗略预估各个腔长, 缩小腔长扫描范围, 再对不同腔长的高精度解调, 但计算次数仍然较多。Jia 等^[9]提出了一种动态信号恢复的对称解调方法, 通过选择三个指定波长激光来引入干涉信号, 其中两个信号对称于第三个, 由此从干涉信号中恢复出动态信号, 广泛运用于腔长未知条件下的测量。Liu 等^[10]提出双波长相位解调技术, 通过高速波长切换, 在一条普通光路上实现双波长相位查询, 再利用 MG-Y 激光器的全光谱扫描, 可以直接测量初始腔长和直流分量, 然后选择两个正交波长实现高速相位解调。王伟、唐瑛等^[11]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。

针对传统光强解调会受到外界环境影响进而造成精度不高, 文中提出了一种基于李萨如 (Lissajous) 图形与标准形式椭圆曲线拟合的解调算法, 将输出光强沿光频坐标平移 α 个单位, 得到两组相互垂直的

余弦振动信号。经过坐标变换拟合为标准椭圆曲线, 并通过经验模态分解方法对数据进行分析, 去余项后得到极值点代入椭圆曲线求解参数, 根据已得参数求相位差解腔长, 结果表明, 此算法解调出的腔长大小平均误差为 3.860%, 并搭建应力实验系统, 加载五组不同的横向负载作用力, 解调出腔长差与理论平均误差 5.690%, 精度较高。

1 基于 Lissajous 图形的解调方法

1.1 解调原理

根据 EFPI 的传感机理可知, 假设光纤 EFPI 的两个反射端面的反射率相同, 则光电检测器检测的输出干涉谱光强值 I 的表达式为:

$$I = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi d}{c} \nu \right) I_0 \quad (1)$$

式中: λ 为光纤 EFPI 的波长; R 为光纤 EFPI 端面反射率 ($R < 1$); d 为光纤 EFPI 的腔长; I_0 为入射光强; c 为真空中的光速; ν 为光频。

由公式 (1) 可知, 反射光强随真空中光频的变化呈近似余弦形式, 为得到稳定椭圆的 Lissajous 图形, 将输出光强沿光频坐标平移 α 个单位, 可得到两组振幅相等, 角频率相同的振动信号, 表达式为:

$$\begin{cases} I = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi d}{c} \nu \right) I_0 \\ I_\alpha = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi d}{c} (\nu + \alpha) \right) I_0 \end{cases} \quad (2)$$

将 I 与 I_α 分别作为横纵坐标进行合成, 在相位差 α 不为极端值 $n\pi$ 时, 可以得到 Lissajous 椭圆。通过对 Lissajous 图形进行椭圆参数拟合与极值点代入实现进一步解调。

1.2 椭圆参数拟合

用 Lissajous 图形将 EFPI 传感器的输出光谱处理为一个稳定的椭圆曲线后, 为实现解调需要进行椭圆参数拟合。

反射光强 I 与平移信号 I_α 是频率相等、幅值相等, 只有相位不同的两组信号。两组信号合成的 Lissajous 图形为椭圆, 将原坐标系看为 xy , 该椭圆长轴与 X 轴夹角 45° , 短轴与 Y 轴夹角 45° 。将坐标轴逆时针旋转 45° , 得到 $x'y'$ 坐标系, 两坐标系点的变化为^[11]:

$$\begin{cases} x' = \frac{\sqrt{2}}{2}(x+y) \\ y' = \frac{\sqrt{2}}{2}(y-x) \end{cases} \quad (3)$$

在变化后的坐标系建立新的椭圆标准方程:

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别为长短轴,代入两个坐标点可求得参数 a 、 b 。标准形式的椭圆参数方程,只涉及两个参数,只需求得两个极值点即可求得椭圆方程。

1.3 EFPI 腔长计算

得到 Lissajous 图形之后进行椭圆曲线的拟合,信号 I 和信号 I_a 的相位差 φ 由椭圆的长轴 a 与短轴 b 之比确定,信号的相位差的表达式为:

$$\varphi = 2 \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (5)$$

由相位差可以求得反射光强度 I 的周期,表达式为^[12]:

$$T_I = \frac{2\pi}{\varphi} \alpha \quad (6)$$

由公式 (1) 可得,干涉光强的周期与腔长的关系为:

$$T_I = \frac{c}{2d} \quad (7)$$

将公式 (6) 所求周期代入公式 (7) 计算得出 EFPI 传感器的腔长,表达式为:

$$d = \frac{c \arctan\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi\alpha} \quad (8)$$

2 实验研究

文中采用环氧树脂胶熔接法制备 EFPI 传感器如图 1 所示,所得到的干涉谱以光频 ν 和光强 I 为坐标,反



图 1 制作的 EFPI 传感器实物图

Fig.1 Picture of EFPI sensor

射光强的曲线如图 2 所示,用精度为 0.01 mm 的显微镜进行腔长读取,实际为 298 μm 。

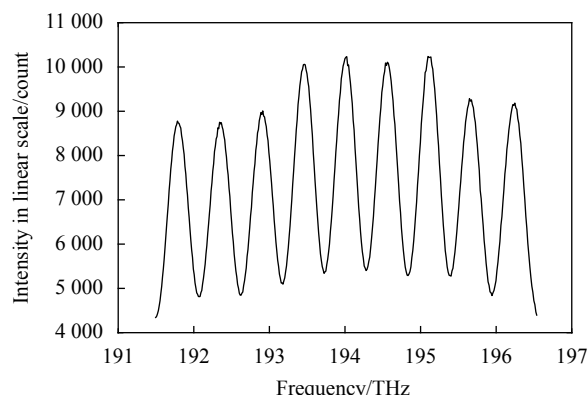


图 2 EFPI 传感器反射光谱

Fig.2 EFPI sensor reflection spectrum

2.1 EMD 去噪

由于直接观测到的反射光谱看似平滑实则存在高频噪声,通过对干涉谱进行经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD),可以将干涉谱中的高频噪声滤除,得到更为平滑的干涉谱。

EMD 可以根据信号的的时间特征来自适应的将复杂信号分解成有限个本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF),其中 IMF 要满足: (1) 极值点和过零点差值小于等于 1; (2) 局部上下包络线平均为零^[13]。使用三次样条插值法得到局部上下包络线,求出均值 $M(t)$,与原始信号最差求得 $\omega(t)$,即为 IMF1,剩余信号 β_1 。将 β_1 作为新的原始信号重复以上操作,直至信号单调或者不满足条件,分解的频率由高到低,表达式为:

$$F_s = \sum_{i=1}^{m-1} \omega_i + \beta_m \quad (9)$$

式中: F_s 为原始信号; ω_i 为计算出的 IMF 分量; β_m 为剩余信号。使用 MATLAB 编程,对干涉光谱采用 EMD 自适应分解共 4 层,其中第 4 层为余项式,EMD 分解后的结果如图 3 所示。

显然 IMF1 为高频噪声信号,将原始信号减去 IMF1 即为去噪后的信号。图 4(a)、(b) 分别为处理前后的光谱波峰信号,由此可以看出,去噪后的光谱已较为平滑。

由于 IMF4 是余项 (基线干扰信号),会对信号分

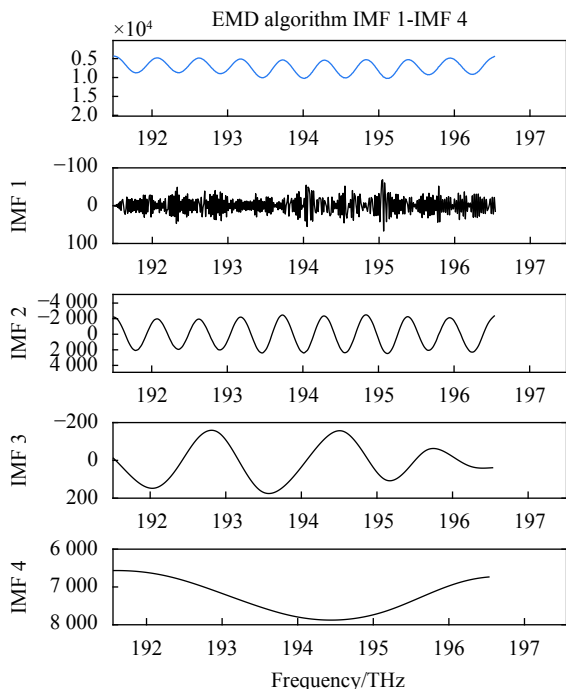


图 3 反射光谱的 EMD 分解

Fig.3 EMD decomposition of the reflection spectrum

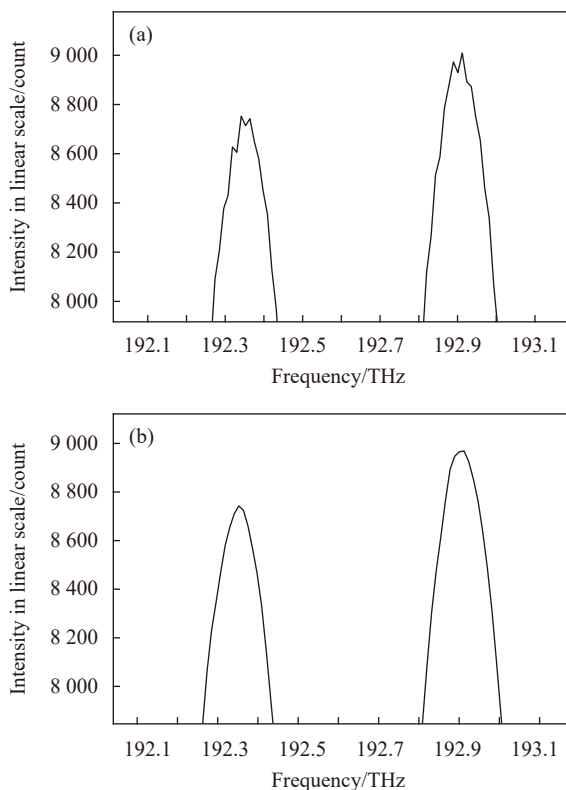


图 4 (a) 去噪前的波峰; (b) 去噪后的波峰

Fig.4 (a) Peak before denoising; (b) Peak after denoising

析产生不利影响,故将其去除,去除余项后的光谱如图 5 所示。由图像可知,此时信号接近于余弦波,

此时对其进行相移操作所合成的椭圆圆心在坐标原点,方便后续计算。

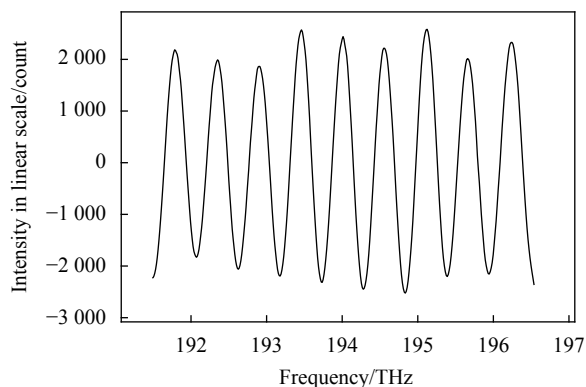


图 5 去除余项的反射光谱

Fig.5 Reflection spectrum with remainder remove

2.2 极值点类型的选择

为使测量误差最小,选取相移前的点坐标与相移后的同一 x 轴对应的纵坐标,构成一组对应点,通过两组对应点求得标准椭圆参数,并选择三种不同极值类型讨论以进行解调对比。

将离散数据移动 10 个点对应波形相移 0.085 T,得到四个极值点 (A 、 B 、 C 、 D) 以及对应的相移点,如图 6 所示。采用双极大值 (A 、 B)、双极小值 (C 、 D)、极大值和极小值 (A 、 D) 的三种方式,进行 Lissajous 曲线拟合解调,计算长短轴 a 、 b 及相应腔长 d ,与腔长 298 μm 对比,求得相对误差。结果表明,选择极大值和极小值解调的方式误差最小为 1.993%,如表 1 所示。

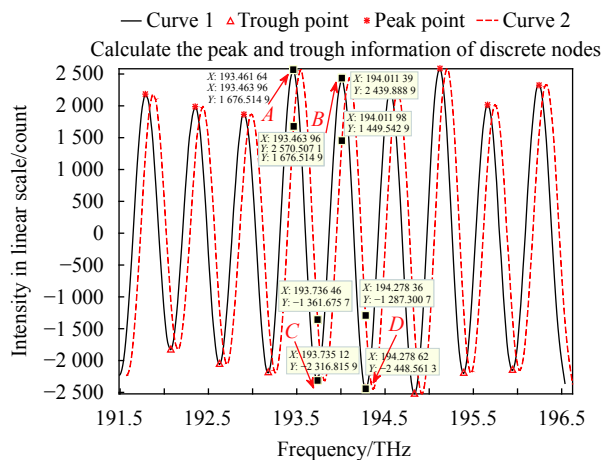


图 6 不同类型极值解调对比

Fig.6 Comparison of different types of extreme value demodulation

表 1 不同极值类型解调结果

Tab.1 Demodulation results of different types of extreme values

Extreme value type	a/count	b/count	$d/\mu\text{m}$	Error
Two maxima	2930.476	1752.153	309.278	3.784%
Two minima	2912.415	1765.563	291.262	2.262%
Maximum and minimum	2924.607	1759.400	303.951	1.993%

2.3 参数解调

将所得到的反射光谱在频率坐标上移动 0.038 T (5 个数据点), 读取频率为 193.461 T 的极大值点与 194.278 T 的极小值点, 如图 7 所示。

将两组信号的极值点代入公式 (3), 即可得到落在椭圆上的点, 计算得出拟合椭圆的参数 $a=3354.702$, $b=765.866$ 。对应的相位差 φ 由公式 (5) 计算得出为 25.910° , 将得到的信号周期数值代入公式 (8), 成功解调出传感器的腔长为 $285.171 \mu\text{m}$, 实际误差 4.310%。为测试不同相移的影响, 另做四组实验, 将离散的光谱数据点分别移动 10、15、20、25 个点, 对应的频率坐标分别为 0.085 T、0.145 T、0.201 T、0.250 T, 取相同的极值点进行解调并将结果记录如表 2 所示。

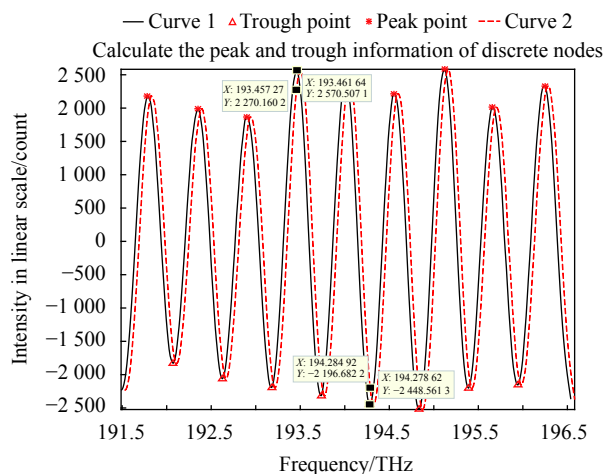


图 7 相移 0.038 T 的反射光谱

Fig.7 Reflection spectrum with phase shift of 0.038 T

表 2 不同相移下椭圆解调结果与误差

Tab.2 Elliptic demodulation results and errors under different phase shifts

Phase shift/THz	a/count	b/count	$\Phi/(\circ)$	$d/\mu\text{m}$	Error
0.038	3354.702	765.866	25.910	285.171	4.310%
0.085	2924.607	1759.400	61.929	303.951	1.993%
0.145	2236.514	2571.339	97.981	281.162	5.661%
0.201	1129.871	3143.681	140.429	288.461	3.208%
0.250	299.644	3669.338	170.652	285.714	4.128%

由此可知, 相移在 0.038~0.250 THz 变化时, 相位差 φ 变化范围在一个周期 ($0\sim\pi$) 内, 平均误差 3.860%, 相移在 0.085 T 时误差最小, 为 1.993%。

当相移超过一个周期时, 此时选取的极值点会落在上一个波峰 (谷) 上, 导致解调失败, 可通过减小每

组实验的步长, 增大实验组数来确定周期范围。

图 8 为绘制解调出的 Lissajous 椭圆, x 、 y 为原坐标轴, x' 、 y' 为旋转坐标后的坐标轴。由图像可知, 当相位差 φ 在 $0\sim\pi$, 椭圆长轴在原坐标轴的一三象限, 当相位差在 $\pi\sim2\pi$, 椭圆长轴在原坐标轴二四象限。

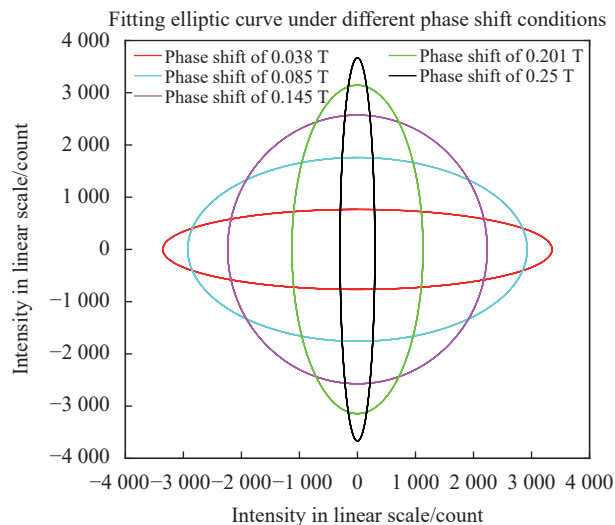


图 8 不同相移所拟合的 Lissajous 椭圆

Fig.8 Lissajous ellipse fitted by different phase shifts

3 加载应力实验

为了验证该算法的可行性,搭建了 EFPI 传感器的解调实验装置,图 9(a)所示为应力加载实验系统原理图。实验所采用的 EFPI 传感器腔长为 206 μm , 传感器长度为 20 mm, 采用 Micron Optics 的 SI155 解调仪, CML-1 H 型应变力综合测试仪, BDCL-3 型材料力

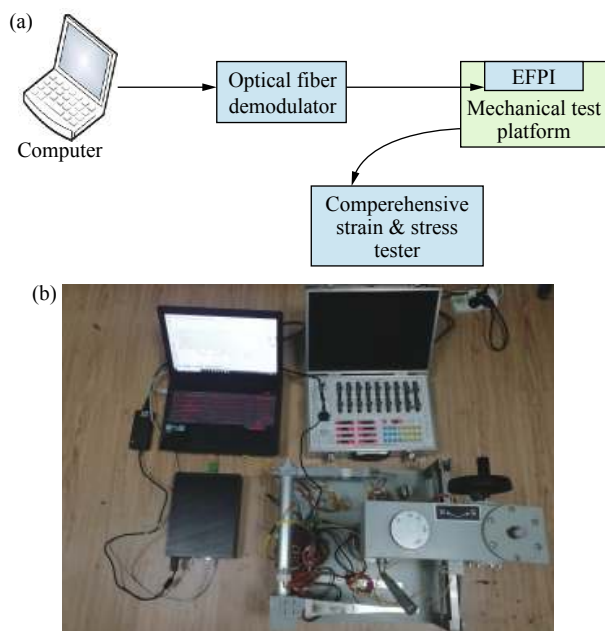


图 9 (a) 应力实验系统原理图; (b) 现场装置图

Fig.9 (a) Schematic diagram of pressure experiment system; (b) Field device diagram

学多功能实验台, 现场装置如图 9(b) 所示。

在对 EFPI 传感器进行横向负载实验过程中, 为减小误差, 均采用相移 0.085 T 的方式进行解调, 分别施加 5、10、15、20、25 N 的应力所得到的光谱与原干涉谱如图 10 所示。

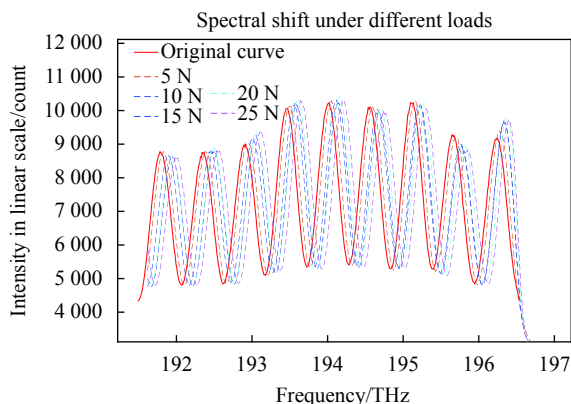


图 10 不同横向负载下 EFPI 输出干涉谱

Fig.10 EFPI output interference spectrum under different lateral loads

3.1 实验结果分析

将实验得到的横向负载作用力下的干涉谱进行 Lissajous 曲线的绘制、椭圆曲线的拟合与 EMD 去基线处理后, 解调出腔长的相关参数记录如表 3 所示。

利用腔长变化量的理论计算公式进行腔长变化量的计算, 可表示为:

$$\Delta d = \varepsilon \cdot L \quad (10)$$

式中: L 为 EFPI 传感器的长度, 大小为 20 mm; ε 为传感器在横向负载作用力下受到的应变。取 5 N 力下由 COMSOL 仿真计算出传感器所受应变大小为 5.96×10^{-5} , 由公式 (10) 可知, 腔长变化量随负载大小成正比。

由表 3 可知, 在 0~25 N 范围内的横向负载作用力下, 解调出的腔长平均误差为 5.690%, 腔长差随所施加负载增大而增大, 与预期相符合。

将解调出的数据进行 Lissajous 图形的绘制, 如图 11 所示, 可以看出解调结果和实际相一致, 解调具有良好的准确度。

表 3 不同负载条件下的腔长解调结果

Tab.3 Cavity length demodulation results under different load conditions

Loads/N	a/count	b/count	$\Phi/(^{\circ})$	d/ μm	$\Delta d_{\text{实际actual}}/\mu\text{m}$	$\Delta d_{\text{理论theory}}/\mu\text{m}$	Error
0	2 906.451	1 118.232	42.249	206.587			
5	2 894.729	1 128.940	42.557	207.850	1.262	1.197	5.160%
10	2 880.228	1 152.088	43.724	213.813	7.225	6.785	6.089%
15	2 769.411	1 135.451	44.023	215.995	9.408	8.934	5.041%
20	2 753.020	1 156.259	44.963	219.572	12.958	12.210	5.782%
25	2 740.341	1 164.638	45.326	223.299	16.711	15.645	6.380%

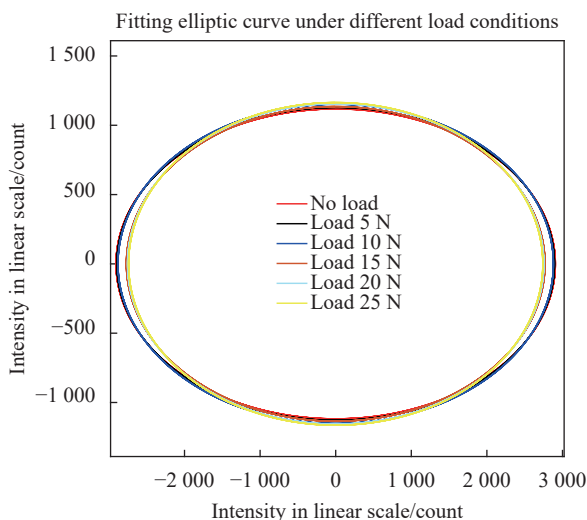


图 11 不同横向负载拟合的 Lissajous 椭圆

Fig.11 Lissajous ellipse fitted with different transverse loads

4 结 论

依据 EFPI 的反射光强近似呈余弦特性,提出了一种基于标准形式椭圆参数曲线拟合的解调算法。首先通过对反射光谱进行 Lissajous 处理,得到的椭圆曲线为椭圆长轴与 X 轴呈 45° 的椭圆曲线,选用了速度较快的标准参数形式,在对坐标轴进行变换后,进行椭圆曲线拟合,对得到的光谱数据进行 EMD 分解,并在去基线之后求得光谱的极值点进而求得椭圆相关参数。利用相位处理,完成了 EFPI 传感器的解调,选用腔长为 $298\mu\text{m}$ 的 EFPI 传感器,分别采用了五次相移进行解调,并用 $206\mu\text{m}$ 的 EFPI 传感器进行横向负载实验,分析了横向负载下 EFPI 传感器腔长的解调结果并与实际相对比,计算了两者之间的误差,验

证了解调算法的精确度。但还有一些不足,比如在相移实验中,当相移超过 $0.3T$,解调将失去准确度,这是因为此时相移 α 已超过信号的周期,选取的极值点经过平移落在了下一个波峰(波谷)中。在后续的研究中,可以尝试制作更多不同腔长不同类型的 EFPI 传感器的进行椭圆曲线的解调,提高其精度。

参考文献:

- [1] Zhao S Y, Chui J W, Chen M M, et al. Review on optical fiber shape sensing technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 10-29. (in Chinese)
- [2] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jing-xiong high speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210603. (in Chinese)
- [3] Liu F K, Cui M X, Ma J J, et al. An optical fiber taper fluorescent probe for detection of nitro-explosives based on tetraphenylethylene with aggregation-induced emission [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 98-104.
- [4] Li J S, Zhu Y, Wang N, et al. An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic fabry-perot nonscanning correlation demodulation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 91-97. (in Chinese)
- [5] Zhao W T, Song N F, Song J M, et al. Demodulation error and influencing factor of three-wavelength digital phasdemodulation method [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(8): 1654-1661. (in Chinese)
- [6] Jiang X H, Tao C Y, Xiao J J, et al. Fiber-ring laser strain sensing system with two-wave mixing interferometric demodulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306021. (in Chinese)

- [7] Tian P T, Zhao Y L, Wang L M, et al. Signal demodulation algorithm based on EFPI geoaoustic sensor [J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(11): 20-23. (in Chinese)
- [8] He W T, Zhao G Z, Ning J C, et al. Multi-cavities demodulation algorithm of EFPI pressure based on FFT and complex domain correlation [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(3): 17-21. (in Chinese)
- [9] Jia J S, Jiang Y, Huang J B, et al. Symmetrical demodulation method for the phase recovery of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9149-9157.
- [10] Liu Q, Jing Z G, Li A, et al. Common-path dual-wavelength quadrature phase demodulation of EFPI sensors using a broadly tunable MG-Y laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27873.
- [11] Wang W, Tang Y, Zhang X X, 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): 0606001. (in Chinese)
- [12] Liu F W. Study of key technology of random phase shifting interferometry [D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences, 2017: 4-6. (in Chinese)
- [13] Zhang L L. ECG signal denoising method based on EMD and experimental verification[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)