

光学学报

光纤法布里-珀罗传感器双峰-干涉级次定位联合解调算法

王东平¹, 王伟^{1,2*}, 张军英², 张雄星², 陈海滨², 郭子龙²

¹西安工业大学兵器科学与技术学院, 陕西 西安 710021;

²西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对双峰法解调低精细度光纤法布里-珀罗(FP)传感器时,峰值定位误差过大导致的解算不准确问题,提出了一种双峰-干涉级次定位联合解调算法。首先,在FP传感器的反射光谱中定位两个波峰,通过常规双峰法估算出腔长;其次,定位一个波谷并引入波谷干涉级次,得到对应不同干涉级次的腔长取值序列;最后,从该腔长序列中寻找与双峰法估算结果最接近的腔长,实现腔长解调。为验证算法的可行性与优越性,对单模光纤制作的低精细度FP传感器进行解调仿真和实验验证。所提方法的解调精度优于2.3 nm,远高于常规双峰法。该算法可用于精确解调腔长在55~135 μm范围内的低精细度FP传感器。

关键词 测量; 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 双峰法; 相位法; 腔长解调; 干涉级次

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1628001

Peak-to-Peak and Interference-Order Positioning Joint Demodulation Algorithm for Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors

Wang Dongping¹, Wang Wei^{1,2*}, Zhang Junying², Zhang Xiongxing², Chen Haibin², Guo Zilong²

¹School of Defense Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract To solve the inaccurate calculation problem caused by the large peak positioning error when the peak-to-peak (P2P) method is employed to demodulate low-finesse fiber-optic Fabry-Perot (FP) sensors, this paper proposes a P2P and interference-order positioning joint demodulation algorithm. For this purpose, two peaks are positioned in the reflection spectrum of the FP sensor, and cavity length is estimated by the conventional P2P method. Then, valley interference orders are introduced after a valley is positioned to generate a sequence of possible cavity length values corresponding to different interference orders. Finally, cavity length demodulation is achieved by retrieving the value in the cavity length sequence closest to the result estimated by the P2P method. To demonstrate the feasibility and superiority of the algorithm, this study also conducts demodulation simulations and experimental verifications of low-finesse FP sensors made from single-mode fibers. The experimental demodulation accuracy, better than 2.3 nm, is much higher than that of the conventional P2P method. The proposed algorithm can be used to accurately demodulate low-finesse FP sensors with a cavity length of 55–135 μm.

Key words measurement; fiber-optic sensor; Fabry-Perot cavity; peak-to-peak method; phase method; cavity length demodulation; interference order

1 引言

光纤法布里-珀罗(FP)传感器在高温高压、强电

磁干扰、强腐蚀性等特殊环境下的传感应用有着无可比拟的优势^[1-2],通过解调FP传感器自身腔长变化可实现对温度^[3-4]、压力^[5-7]、湿度^[8-9]等重要物理信息的监

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-03-11; 录用日期: 2022-03-29

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-438)、陕西省教育厅重点科学研究计划(20JS060)

通信作者: *wangwei@xatu.edu.cn

测。其中,低精细度 FP 传感器制作成本更低,在恶劣环境中的可靠性更高^[10],现已经被广泛应用于各个领域。FP 传感器腔长的快速、精准解调无疑是其应用和推广需要解决的关键问题之一。

FP 传感器的腔长解调方法主要有强度法、相关法和相位法。强度法^[11]利用 FP 传感器的反射光强信息进行腔长的相对解调。该方法解调速度快,但是光源不可避免的光强起伏通常会直接影响腔长测量结果,其解调精度相对较低,通常难以实现绝对量输出。相关法^[12]将待测腔长与特定范围的参考腔长进行相关运算,由相关系数最大值确定绝对腔长。该方法的解调精度较高,但运算量较大。另外,如果光源光谱过窄或者腔长过短,相关系数主峰误判的问题会导致较大误差。相位法^[13-14]通过分析 FP 传感器反射光谱的相位信息来解算绝对腔长,避免了光源光强起伏的干扰,解调精度较高。常见的相位法主要有傅里叶变换法、单峰法和双峰法。傅里叶变换法和单峰法的解调精度相对较高,但傅里叶变换法的解调速度慢,动态特性差;而单峰法所选波峰的偏移量受限于自由光谱区,算法解调范围较小。双峰法是一种能快速解算绝对腔长的算法,通过反射光谱中两个峰值信息来解算腔长,但其峰值定位误差对解调精度的影响较为显著^[15]。低精细度 FP 传感器的反射光谱趋于平缓^[16],使用双峰法解调时容易出现峰值定位不准确的问题,导致腔长解算结果的精度较低^[17]。

为了实现低精细度 FP 传感器腔长的精确解调,减小峰值定位不准确引入的误差,南京信息工程大学张

鹏等^[18]提出一种 Savitzky-Golay 卷积平滑滤波和洛伦兹局部拟合相结合的峰值解调法,得到的峰值定位误差小于 10 μm 。峰值定位误差减小后,再使用双峰法计算腔长,腔长解调的精度较高,为 0.031 μm 。但是,该算法较为复杂,腔长解调范围较小,为 42~52 μm ,并且该算法只适用于短腔 FP 传感器的解调。西北工业大学 Ma 等^[19]提出一种零交叉检测算法,选择两个零点获得光谱周期,进而解算腔长。该算法避免了双峰法峰值定位不准确带来的问题,实现了腔长范围为 150~1000 μm 、误差小于 0.083 μm 的解调结果,解调范围大,但解调精度依然较低。

本文针对双峰法解调低精细度 FP 传感器时峰值定位误差带来的腔长解算不准确问题,提出了一种双峰-干涉级次定位联合解调算法。首先定位 FP 传感器反射光谱中的两个波峰,使用常规双峰法估算腔长,同时在反射光谱中定位一个波谷,引入干涉级次及相应腔长序列,最后通过对比寻找腔长序列中与常规双峰法估值最接近的腔长,该腔长即为最终解算结果。此方法可显著减小双峰法因峰值定位不准确引入的误差,仿真和实验均证实了该方法的可行性与优越性。

2 算法原理

2.1 法布里-珀罗传感器测量原理

图 1 是一种典型的光纤 FP 传感器结构,两个垂直切割的单模光纤(SMF)穿入内径略大于光纤包层外径的中空毛细玻璃管中,并使用紫外胶固定,毛细玻璃管中两个互相平行的光纤端面构成了 FP 腔的两个反射面。

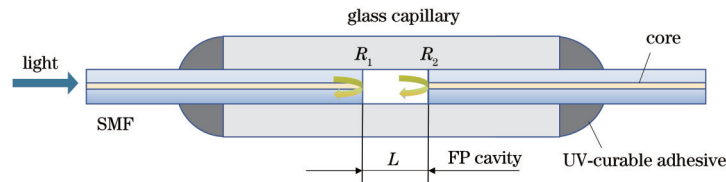


图 1 光纤 FP 传感器的典型结构

Fig. 1 Typical structure of fiber-optic FP sensor

FP 传感器的反射光强可表示为

$$I_1(\lambda) = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} I_0(\lambda), \quad (1)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 是入射光强; R_1 和 R_2 是两个反射面的反射率; φ 是反射光谱的相位,可表示为

$$\varphi = \frac{4\pi L}{\lambda} + \pi, \quad (2)$$

式中: L 为 FP 腔长; λ 为波长。传感器的精细度可表示为 $F = 4R/(1-R)^2$ (R 为反射面的反射率)。单模光纤端面反射率 $R_1 = R_2 = 0.04$,传感器精细度较低,为 0.17,则其反射光强可简化为

$$I_1(\lambda) = \left[A + B \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda} + \pi \right) \right] I_0(\lambda), \quad (3)$$

式中: $A = R_1 + R_2$, $B = 2\sqrt{R_1 R_2}$ 。

在入射光强和反射率一定时,低精细度 FP 传感器

的反射光强主要由腔长决定。如果使用宽带光源照射传感器,则反射光谱受到来自传感器 FP 干涉引起的光谱功率密度的调制,出现多个振荡峰。通过分析处理反射光谱可以解算 FP 腔长,实现对外界环境信息的测量。

2.2 双峰-干涉级次定位联合解调算法原理

采用常规双峰法进行解调时,假设所选两个波峰干涉级次分别为 m 和 $m+q$,对应的波长分别为 λ_m 和 λ_{m+q} ,则对应的相位满足

$$\begin{cases} \varphi_m = \frac{4\pi L}{\lambda_m} + \pi = 2\pi m \\ \varphi_{m+q} = \frac{4\pi L}{\lambda_{m+q}} + \pi = 2\pi(m+q) \end{cases}, \quad m, q = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

式中: q 为对应的干涉级次之差。通过式(4)可得反射光谱中两个峰值对应的波长、干涉级次之差和腔长之

间的关系为

$$q = 2L \left(\frac{1}{\lambda_{m+q}} - \frac{1}{\lambda_m} \right), \quad m, q = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

记双峰法解算腔长结果为 L_{P2P} , 则

$$L_{P2P} = \frac{q}{2} \left(\frac{\lambda_m \lambda_{m+q}}{\lambda_m - \lambda_{m+q}} \right), \quad m, q = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

使用双峰法时, 反射光谱中应至少包含两个波峰, 当光源光谱范围为 1524~1570 nm, 则双峰法可解算的最短腔长为 52 μm 。腔长解算结果的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta L_{P2P}}{L} \right| = \sqrt{2} m \left| \frac{\Delta \lambda_m}{\lambda_m} \right|, \quad m, q = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

式中: ΔL_{P2P} 为双峰法的解调误差; $\Delta \lambda_m$ 为 m 级次波峰的定位误差。由式(7)可知, 双峰法的解调误差与峰值定位误差直接相关, 而峰值定位误差通常与传感器精细度有关。

不同精细度的 FP 传感器的反射光谱如图 2 所示, 其中, F 表示 FP 传感器的精细度。当 $F=200$ 时, 波峰平缓波谷尖锐, 可以通过确定两个波谷的位置推算波峰; 但是当 $F=0.2$ 或者更小时, 波峰与波谷都相对平缓, 不能准确判断波峰位置, 导致双峰法解调误差增大。

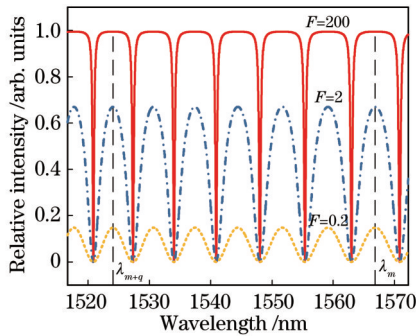


图 2 不同精细度的 FP 传感器反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of FP sensors with different fineness

为解决常规双峰法解算低精细度 FP 传感器腔长时峰值判断不准确造成的问题, 本文提出了一种双峰-干涉级次定位联合解调新算法。该算法以常规双峰法估算结果为基础, 再选取一个波谷, 确定其中心波长并引入一组干涉级次序列及相应的腔长序列, 对腔长序列与双峰法的估值结果进行比对匹配, 最终准确解算腔长。

将 $\lambda = c/v$ (其中, v 是光频, c 是真空光速) 代入式(3), 则可将反射光谱转换至频域, 则有

$$I_1(v) = \left[A + B \cos \left(\frac{4\pi L}{c} v + \pi \right) \right] I_0(v). \quad (8)$$

由式(8)可知, FP 传感器的频域反射光谱是等周期信号, 其周期可表示为

$$T = \frac{2\pi}{4\pi L/c} = \frac{c}{2L}. \quad (9)$$

在频域中任意选择一个波谷, 假设该波谷对应的

干涉级次为 N , 中心频率为 ν_N 。由于 N 等于 $0 \sim \nu_N$ 频率范围内波谷出现的次数, 频域光谱信号周期也可表示为

$$T = \frac{\nu_N}{N}, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

腔长与波谷的中心频率之间满足

$$L = \frac{Nc}{2\nu_N}, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

腔长与波谷中心波长之间的关系为

$$L = \frac{N}{2} \lambda_N, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

式中: λ_N 为干涉级次 N 对应波谷的中心波长。如果可以准确判定干涉级次 N , 则由 N 及其对应波谷的中心波长 λ_N 可以直接准确计算腔长。然而, 通常通过观测光谱无法直接判定干涉级次 N 。

假设所选波谷对应的波长为 1550 nm, 由式(12)可知, 每错判一个干涉级次, 就会额外引入 775 nm 的严重解调误差。为避免级次错判问题, 在此引入一组干涉级次序列 $\{i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots$ (要求 i 覆盖干涉级次 N), 并由此产生一个腔长序列 $\{L_i\}$, 其中, $L_i = i\lambda_N/2$ 。当且仅当 $i = N$ 时, 腔长序列对应值为实际腔长。

为准确判断干涉级次 N , 可以先通过常规双峰法估算 FP 传感器腔长, 将其与 $\{L_i\}$ 中所有腔长进行对比。用 ΔL_i 表示 $\{L_i\}$ 中干涉级次 i 对应腔长与腔长估值之差的绝对值, 则有

$$\Delta L_i = |L_i - L_{P2P}|, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

仅当 ΔL_i 取最小值时, $i = N$, $L_N = L_i$, L_N 为算法最终解算的腔长结果。由此可以准确判断波谷实际干涉级次, 并准确解算腔长。

为了确保该算法的准确性, 双峰法的解调误差应小于相邻干涉级次对应腔长之差的一半。当光源光谱范围为 1524~1570 nm、所选波谷中心波长为 1550 nm 时, 该算法得到的解调腔长的理论上限为 420 μm 。实际应用中难以达到该解调范围上限, 通过实验验证, 发现腔长在 55~135 μm 范围内时算法的稳定性最好。

由式(12)可得该算法的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta L_N}{L} \right| = \left| \frac{\Delta \lambda_N}{\lambda_N} \right|, \quad (14)$$

式中: $\Delta \lambda_N$ 为波谷的中心波长定位误差, 与波峰定位误差相等; ΔL_N 为该算法的解调误差。联立式(7)和(14), 可得双峰-干涉级次定位联合解调算法的相对误差与双峰法的相对误差之比为

$$\left| \frac{\Delta L_N}{\Delta L_{P2P}} \right| = \left| \frac{\lambda_m}{\sqrt{2} m \lambda_N} \right|. \quad (15)$$

当 FP 传感器的腔长为 55~135 μm 、光源带宽为 1524~1570 nm 时, λ_m/λ_N 小于 1.03, m 的最小取值为 71, 双峰-干涉级次定位联合解调算法的理论误差小于双峰法理论误差的 1.02%。对该算法进行仿真和实验验证。由仿真结果可知: 该算法的解调误差小于双峰法解调误差的 1.4%; 由实验结果可知: 该算法的解

调误差小于双峰法解调误差的 2.5%。该算法可显著减小双峰法解算低精细度 FP 传感器腔长时的误差。

3 算法仿真

根据算法原理及分析,双峰-干涉级次定位联合解调算法流程图如图 3 所示。该解调算法流程主要分为 3 个步骤:

1) 传感器的反射光谱幅值校正。放大自发辐射 (ASE) 光源的光谱不平坦, FP 传感器的反射光谱起伏较大。为使反射光谱接近标准的余弦函数形式, 利用反射光谱信号 $I_1(\lambda)$ 除以光源信号 $I_0(\lambda)$ 进行光谱幅值校正。

2) 通过双峰法估算出 FP 传感器腔长。首先, 通过 Matlab 软件自带的 findpeaks 函数对反射光谱进行寻峰操作, 再选取两个波峰, 将两个波峰对应波长代入式 (6) 中, 采用常规双峰法估算腔长。

3) 选择任意波谷, 确定波谷的干涉级次用于解算腔长。首先, 在反射光谱中任意选择一个波谷, 确定波谷中心波长; 其次, 通过引入干涉级次序列, 得到对应不同干涉级次的腔长序列; 最后, 以双峰法估算结果为基础, 对比寻找腔长序列中与双峰法最接近的腔长, 从而确定波谷干涉级次, 准确解算腔长。

为验证算法的有效性和精确性, 模拟单模光纤制作的低精细度 FP 传感器的信号解调。在仿真中设置光源光谱范围为 1524~1570 nm, 反射光谱的采样点数为 10001, 设置 FP 腔端面反射率为 0.04, 设置产生精细度为 0.17 的传感器反射光谱, 采用该算法进行解调仿真。仿真模拟参数与后续实验一致。

以腔长为 125 μm 的 FP 传感器反射光谱解调仿真为例, 仿真过程如图 4 所示, 首先模拟 FP 传感器的反射光谱, 对其进行幅值校正, 接着采用常规双峰法估算腔长, 再任意选取一个波谷, 确定波谷的中心波长, 引入干涉级次序列, 得到相应的腔长序列。如图 4(b) 所示, 为了准确判断所选波谷的干涉级次, 避免干涉级次判断错误引入的误差, 对比寻找腔长序列中最接近双峰法估算结果的腔长, 计算每个干涉级次对应腔长与双峰法估值之间的偏差, 偏差最小时确定干涉级次并解算腔长。

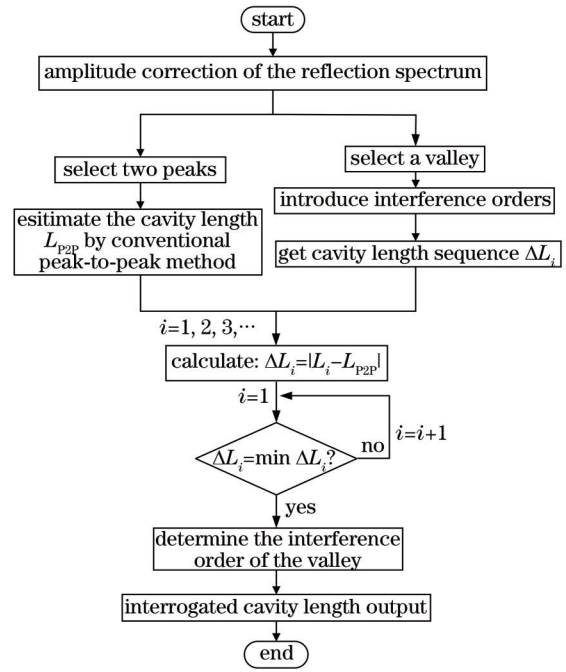


图 3 双峰-干涉级次定位联合解调法流程图
Fig. 3 Flow chart of peak-to-peak (P2P) and interference-order-positioning joint demodulation algorithm

采用双峰-干涉级次定位联合解调算法得到的解算腔长结果为 124.9997 μm , 与模拟腔长的绝对误差为 0.3 nm; 而常规双峰法解算的腔长结果为 124.9274 μm , 与模拟腔长的绝对误差为 72.6 nm。可见, 该算法显著提升对低精细度 FP 传感器腔长的解调精度。

继续模拟腔长 55~135 μm 范围内的其他 8 个 FP 传感器的反射光谱, 并进行解调仿真, 仿真结果如表 1 所示。其中: L 为模拟的 FP 腔长; L_{P2P} 为双峰法解算结果, 其绝对误差为 ΔL_{P2P} ; L_N 为双峰-干涉级次定位联合解调算法的解算结果, 其绝对误差为 ΔL_N 。可以发现: 在所考虑的解调范围内, 常规双峰法的解调误差在数十纳米量级, 最大为 98.2 nm, 而双峰-干涉级次定位联合解调算法的解调误差则为亚纳米量级, 最大为 0.5 nm。很显然, 该算法的解调误差远小于常规双峰

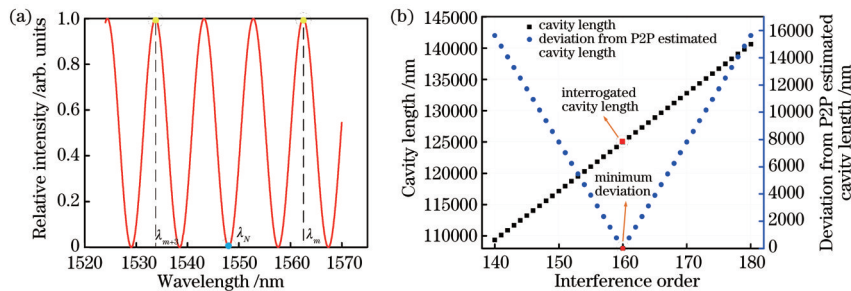


图 4 双峰-干涉级次定位联合解调算法仿真。(a) 腔长为 125 μm 时的反射光谱; (b) 不同干涉级次对应的腔长及其与双峰法估值之差
Fig. 4 Simulation of P2P and interference-order-positioning joint demodulation algorithm. (a) Reflection spectrum for cavity length of 125 μm ; (b) cavity lengths corresponding to different interference orders and their deviations from P2P estimated cavity length

法。仿真结果在理论上验证了该算法的可行性,该算法可实现对低精细度 FP 传感器的精确解调。

表 1 腔长为 55~135 μm 的 FP 传感器解调仿真结果

Table 1 Simulated cavity length demodulation results for FP sensors with cavity lengths of 55~135 μm

$L/\mu\text{m}$	$L_{\text{P2P}}/\mu\text{m}$	$\Delta L_{\text{P2P}}/\text{nm}$	$L_{\text{N}}/\mu\text{m}$	$\Delta L_{\text{N}}/\text{nm}$
55	55.0214	21.4	55.0003	0.3
65	65.0236	23.6	65.0002	0.2
75	74.9745	25.5	74.9998	0.2
85	85.0359	35.9	84.9998	0.2
95	94.9498	50.2	95.0004	0.4
105	104.9428	57.2	104.9995	0.5
115	115.0602	60.2	114.9996	0.4
125	124.9274	72.6	124.9997	0.3
135	134.9018	98.2	134.9996	0.4

4 实验验证

为验证双峰-干涉级次定位联合解调算法的实际解调效果,使用单模光纤(包层直径为 125 μm ,纤芯直径为 8 μm)和毛细玻璃管(内径为 128 μm)制作图 1 所示的光纤 FP 传感器(精细度为 0.17),并搭建 FP 传感器解调实验系统进行实验验证。解调实验系统如图 5 所示,包括 ASE 光源(光谱范围为 1524~1570 nm)、光纤环行器、FP 传感器、光谱分析仪(OA,最小分辨率为 30 pm,型号为 MS9740A, Antitsu 公司,日本)和计算机。光源发出的光通过光纤环行器耦合到 FP 传感器中,携带腔长信息的反射光经过环行器进入光谱仪,

通过光谱仪采集反射光谱并将其传输到计算机上。最后根据双峰-干涉级次定位联合解调算法编写程序,对 FP 传感器的腔长进行解调。

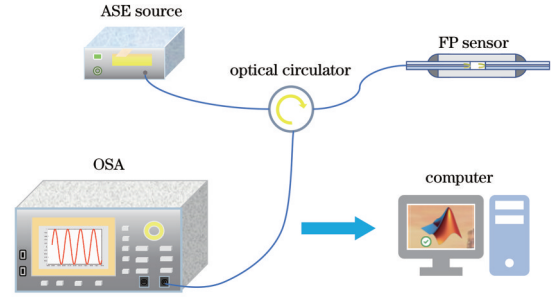


图 5 FP 传感器腔长解调系统实验装置

Fig. 5 Experimental setup of cavity length demodulation system for FP sensors

在腔长为 55~135 μm 的范围内,制作了 9 个不同腔长的 FP 传感器,在常温常压状态下,对每个传感器的反射光谱进行 100 次反复采集,采用双峰-干涉级次定位联合解调算法对采集到的反射光谱进行解调,将 100 组解调结果的均值视为传感器的真实腔长。

选取第 4 个传感器的解调作为示例,该传感器的一组反射光谱的解调过程如图 6 所示。首先对反射光谱进行幅值校正。然后选取两个波峰,采用常规双峰法估算腔长。选取任意一个波谷并确定波谷中心波长,并引入干涉级次序列及相应腔长。最后对比寻找腔长序列中与双峰法估值最接近的腔长,确定所选波谷干涉级次,从而精准解算腔长。

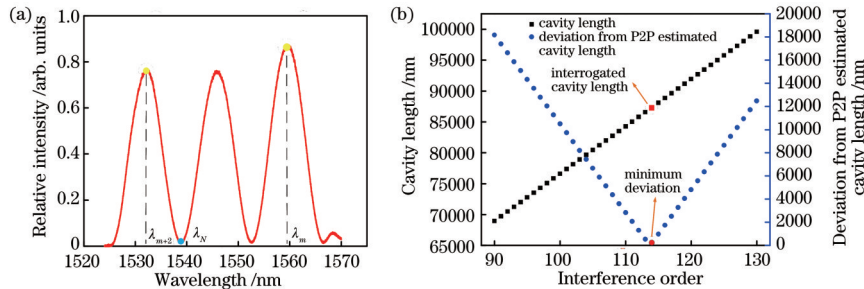


图 6 双峰-干涉级次定位联合解调算法实验结果。(a) 第 4 个 FP 传感器解调的反射光谱;(b) 不同干涉级次对应的腔长及其与双峰法估值之差

Fig. 6 Experimental results of P2P and interference-order-positioning joint demodulation algorithm. (a) Reflection spectrum of demodulated by 4th FP sensor; (b) cavity lengths corresponding to different interference orders and their deviations from P2P estimated cavity length

对此传感器的 100 组反射光谱逐一进行解调。常规双峰法和双峰-干涉级次定位联合解调法的解算结果如图 7 所示,双峰-干涉级次定位联合解调算法所得结果明显比常规双峰法稳定。通过计算可得双峰-干涉级次定位联合解调算法的标准差为 0.7 nm,而常规双峰法的解调标准差为 52.6 nm。

对其余传感器的反射光谱采取相同方法进行解

调,解调结果如表 2 所示。 L_{PPA} 为双峰法解算均值,其标准差为 ΔL_{PPA} , L_{NA} 为双峰-干涉级次定位联合解调法的解算均值,其标准差为 ΔL_{NA} 。在 55~135 μm 范围内,双峰-干涉级次定位联合解调算法的解调标准差最大为 2.3 nm,即解调精度优于 2.3 nm,远小于常规双峰法的 129.6 nm,解调精度显著提高。实验结果表明该算法可实现低精细度 FP 传感器的高精度解调。

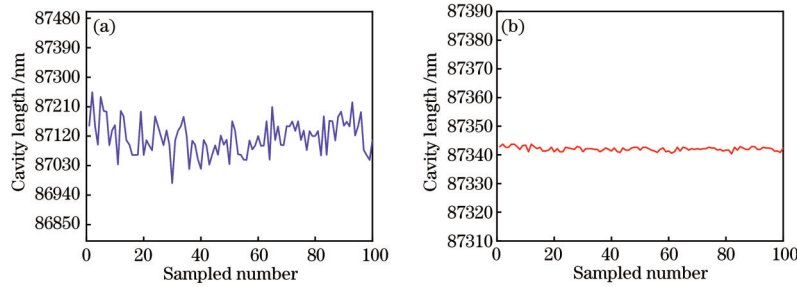


图 7 100 次重复实验的解调结果。(a) 双峰法解调结果; (b) 双峰-干涉级次定位联合解调结果

Fig. 7 Demodulation results of 100 repeated experiments. (a) Demodulation results of P2P method; (b) demodulation results of P2P and interference-order-positioning joint demodulation algorithm

表 2 腔长为 55~135 μm 的 FP 传感器的解调实验结果

Table 2 Demodulation experimental results for FP sensors with cavity lengths of 55~135 μm

Group No.	$L_{\text{PPA}} / \mu\text{m}$	$\Delta L_{\text{PPA}} / \text{nm}$	$L_{\text{NA}} / \mu\text{m}$	$\Delta L_{\text{NA}} / \text{nm}$
1	57.6939	65.8	57.7389	0.4
2	69.4785	51.3	69.5705	0.5
3	78.2213	61.4	78.1849	0.4
4	87.1176	52.6	87.3466	0.7
5	96.7040	113.7	96.7752	0.8
6	103.9930	109.9	103.9064	0.5
7	113.0358	90.0	112.6620	2.3
8	123.8196	98.1	123.6546	0.9
9	130.7285	129.6	130.7694	1.5

5 结 论

针对低精细度光纤 FP 传感器反射光谱峰值定位不准确造成的腔长解算误差大的问题,提出了一种双峰-干涉级次定位联合解调算法。该算法在双峰法的基础上定位单个波谷,并引入干涉级次序列及相应腔长序列,通过对比寻找腔长序列中与常规双峰法估值最接近的腔长,确定波谷的干涉级次,准确解算腔长。仿真与解调实验结果证明:对于腔长为 55~135 μm 的 FP 传感器,该算法的解调精度优于 2.3 nm,该精度高于常规双峰法。该算法显著提升了常规双峰法的解调精度,预期可在实际应用中提升低精细度光纤 FP 传感器的传感精度与动态范围。

参 考 文 献

- [1] Song Z Y, Wang N, Zhu Y, et al. Characteristics and analysis of fiber Fabry-Perot force sensor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1930(1): 012016.
- [2] 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.
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.
- [3] 刘铁根,于迅,王双,等. 高温环境下光纤法布里-珀罗微腔传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306002.
Liu T G, Yu X, Wang S, et al. Fiber-optic Fabry-Perot sensing technology in high-temperature environments: a review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306002.
- [4] Zhang H, Wang D N, Rahman B M A. Parallel structured fiber in-line multiple Fabry-Perot cavities for high temperature sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 313: 112214.
- [5] 白浪,郑刚,张雄星,等. 调频连续波光纤压力传感器及其测量特性分析[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0328002.
Bai L, Zheng G, Zhang X X, et al. Optical fiber pressure sensor based on frequency-modulated continuous-wave and analysis of its measurement characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0328002.
- [6] Feng F, Jia P G, Qian J, et al. High-consistency optical fiber Fabry-Perot pressure sensor based on silicon MEMS technology for high temperature environment[J]. Micromachines, 2021, 12(6): 623.
- [7] 王宁,田文昊,张昊生,等. 石墨烯量子点法布里珀罗光纤湿度传感器[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 0906003.
Wang N, Tian W H, Zhang H S, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor by graphene quantum dots [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 0906003.
- [8] 李嘉丽,洪婉玲,赵春柳,等. 基于阵列波导光栅的光纤法布里-珀罗干涉仪型多点氢气传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306013.
Li J L, Hong W L, Zhao C L, et al. Multi-point optical fiber hydrogen sensor with Fabry-Perot interferometers using arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306013.
- [9] Wang N, Tian W H, Zhang H S, et al. An easily fabricated high performance Fabry-Perot optical fiber humidity sensor filled with graphene quantum dots[J]. Sensors, 2021, 21(3): 806.
- [10] Ma C, Wang A B. Signal processing of white-light interferometric low-finesse fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. Applied Optics, 2013, 52(2): 127-138.
- [11] 李春成,王鸣,夏巍,等. 基于 F-P 腔强度解调的微小位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
Li C C, Wang M, Xia W, et al. A novel Fabry-Perot

- micro-displacement sensor based on intensity demodulation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0628001.
- [12] 张雄星, 吕文涛, 张天阳, 等. 光纤法珀传感器光楔式解调系统设计[J]. *中国光学*, 2021, 14(5): 1259-1272.
Zhang X X, Lü W T, Zhang T Y, et al. Design of optical wedge demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1259-1272.
- [13] 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.
- [14] 刘嘉静, 涂子维, 周次明, 等. 基于最小二乘法的光纤法布里-珀罗传感器相位校正解调算法[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0906004.
Liu J J, Tu Z W, Zhou C M, et al. Algorithm of phase correction based on least square estimation for optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0906004.
- [15] Jiang Y. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 925-932.
- [16] Bonilla J T G, Bonilla H G, Betancourt V M R, et al. Low-finesse Fabry-Perot interferometers applied in the study of the relation between the optical path difference and poles location[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 453.
- [17] 许亨艺, 雷小华, 陈伟民, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的条纹计数法解调误差研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(12): 1207003.
Xu H Y, Lei X H, Chen W M, et al. Demodulation error of fringe counting method for optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1207003.
- [18] 张鹏, 葛益娴, 顾钦顺, 等. 短腔干涉式光纤微压传感器解调方法研究[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(5): 609-614.
Zhang P, Ge Y X, Gu Q S, et al. Research on demodulation method of short cavity interferometric optical fiber micropressure sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(5): 609-614.
- [19] Ma Z B, Song Z C, Huang X R, et al. A zero-cross detection algorithm for cavity-length interrogation of fiber-optic Fabry-Perot sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 3868.