

引用格式: FENG Jia-shuang, WANG Wei, ZHANG Xiong-xing, *et al.* Combined Interrogation Algorithm of Amplitude Normalization and Minimum Mean Square Error for Fiber-optic Fabry-Perot Sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 0906002

冯嘉双, 王伟, 张雄星, 等. 光纤法布里-珀罗传感器幅值归一化-最小均方差联合解调算法[J]. 光子学报, 2020, 49(9): 0906002

光纤法布里-珀罗传感器幅值归一化-最小均方差联合解调算法

冯嘉双¹, 王伟^{1,2}, 张雄星^{1,2}, 陈海滨^{1,2}, 郭子龙¹, 申佳鑫¹, 张军英¹

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

(2 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 西安 710021)

摘要: 面向光纤法布里-珀罗传感器的腔长解调, 提出一种结合幅值归一化与最小均方差的联合解调算法. 采用幅值归一化实现返回光谱信号与模拟光谱信号的等幅, 提高解调精度. 仿真结果表明, 相较于传统最小方差法, 该算法的解调精度显著提升. 实验结果表明, 采用该算法可实现优于 0.72 nm 的高分辨率.

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 最小均方差; 双峰法; 腔长解调

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0906002

Combined Interrogation Algorithm of Amplitude Normalization and Minimum Mean Square Error for Fiber-optic Fabry-Perot Sensors

FENG Jia-shuang¹, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Xiong-xing^{1,2}, CHEN Hai-bin^{1,2},

GUO Zi-long¹, SHEN Jia-xin¹, ZHANG Jun-ying¹

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

(2 Shaanxi Province Key Lab of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: A combined algorithm of amplitude normalization and minimum mean square error for the cavity length interrogation of fiber-optic Fabry-Perot sensors is proposed. An amplitude normalization method is introduced to realize the equiamplitude of both the reflected and the simulated spectral signals, which helps improving the interrogating accuracy. Significant increasing of interrogating accuracy compared with conventional algorithms is verified through numerical simulations. And, a 0.72 nm resolution of cavity length interrogation is achieved in real experiment.

Key words: Fiber-optic sensor; Fabry-Perot cavity; Least square method; Peak-to-peak method; Cavity length interrogation

OCIS Codes: 060.2370; 060.2380; 070.4790; 120.2230

0 引言

光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)传感器以其体积小、重量轻、精度高、抗电磁干扰、耐化学腐蚀等优

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(No.2020JM-560), 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(No.20JY028)

第一作者: 冯嘉双(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤法珀传感技术. Email: fengjs_ed@163.com

导师: 王伟(1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电测试技术、光纤传感技术. Email: wangwei@xatu.edu.cn

通讯作者: 张雄星(1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: zhangxiongxing@xatu.edu.cn

收稿日期: 2020-06-04; 录用日期: 2020-07-06

<http://www.photon.ac.cn>

点^[1],已在工业和军事领域得到了应用^[2].光纤 FP 传感器通过 FP 腔的腔长变化直接或间接感测温度^[3-4]、压力^[5-7]、应力/应变^[8]等外部参量的变化,因此在实际应用中,FP 腔长的高精度解调是最为关键的问题之一.

现有多种解调方法可对光纤 FP 传感器进行腔长解调,较为典型的有双峰法、快速傅里叶变换法(Fast Fourier transform, FFT)、互相关法以及最小均方差法(Minimum Mean Square Error, MMSE)等.双峰法通过提取两个不同峰值对应的波长,并根据两峰波长与腔长之间的关系解算腔长值,这种方法解调速度快,但解调精度低,仅为微米量级^[9].FFT 法先将光谱信号从波长域转换为频率域,对频率域信号进行快速傅里叶变换得到腔长.重庆大学的雷小华^[10]等通过三次样条插值 FFT 法实现了 0.06 μm 以内的腔长误差.互相关法采用互相关系数作为估计子,估计子的最大值对应的腔长估计值为目标腔长.北京理工大学的 WANG Z 等^[11]通过使用小波变换和互相关法实现了 0.375 nm 的腔长标准差.与互相关法不同,MMSE 法采用均方差作为估计子,最小估计子对应的腔长估计值为目标腔长.大连理工大学的宋世德等^[12]通过采用均方差值作为估计子,实现了 0.18 nm 的腔长分辨率.MMSE 算法对光谱带宽要求低,可对窄带宽光谱的信号进行计算,在光源光谱带宽较窄的领域,MMSE 算法较互相关法更具有优势.

大连理工大学的 ZHOU X L 等^[13]提出了傅里叶-最小均方差(Fast Fourier transform-Minimum Mean Square Error, FFT-MMSE)联合算法,通过 FFT 确定小区间腔长范围,然后进行 MMSE 计算,此方法在避免“模式跳跃”的同时,实现了 3 mm 的大动态测量范围和高达 0.084 nm 腔长分辨率.武汉理工大学的尹嘉笛等^[14]提出了 Fibonacci-最小均方差(Fibonacci-MMSE)联合算法,基于 FFT-MMSE 算法的基础,在小区间内采用 Fibonacci 进行快速解调,可在 2.5 mm 动态范围内实现 0.15 nm 的腔长分辨率,且解调时间大幅度降低.上述方法均采取 FFT-MMSE 方法避免 MMSE 算法中存在的跳模误差,但并未考虑在“模次”内部的误差.跳模误差和模次内部误差的产生是由 MMSE 算法的特性所导致的,在 MMSE 算法中只有当两列信号完全一致,其均方差值最小,腔长解调结果最准确.但在实际情况下,受到光源光谱和传输损耗等因素影响,反射光谱信号和模拟光谱信号的幅值不相等,采用这些不等幅的信号进行计算对计算结果带来极大的误差,其中包含了跳模误差和模次内误差.

本文针对 MMSE 算法中存在的由于信号幅值不等导致的解调误差大等问题,提出一种基于幅值归一化和最小均方差的新型联合算法(Normalization-Minimum Mean Square Error, N-MMSE),通过先后提取信号上下包络然后对信号进行幅值归一化,实现实际信号和模拟信号幅值相等,避免因幅值不等导致的腔长解调误差.

1 光纤 FP 传感器工作原理

一种典型的可用于温度或应变传感的光纤 FP 传感器结构如图 1 所示,该传感器由两段垂直切割的单模光纤和毛细管熔接而成,其两个光纤端面构成 FP 腔^[15-16].当光信号由单模光纤传入,两个光纤端面均产生部分反射光,由于两束反射光之间存在相位差,会产生干涉现象.根据 FP 腔的多光束干涉原理,返回干涉光信号 $I_r(\lambda)$ 可表示为

$$I_r(\lambda) = I_i(\lambda)R_{\text{FP}} = I_i(\lambda) \frac{r_1^2 + \bar{r}_2^2 + 2r_1\bar{r}_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{\text{FP}}}{\lambda}\right)}{1 + r_1^2\bar{r}_2^2 + 2r_1\bar{r}_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{\text{FP}}}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

$$\bar{r}_2 = r_2 \cdot l(L_{\text{FP}}) \quad (2)$$

式中, $I_i(\lambda)$ 表示为入射光强, R_{FP} 表示为 FP 传感器理论反射率, L_{FP} 为传感器腔长, n 为 FP 腔介质折射率, λ 为波长, r_1 和 r_2 分别表示 FP 传感器内光纤端面和反射面的理论反射系数, \bar{r}_2 表示反射面的实际反射系数, $l(L_{\text{FP}})$ 表示从第二反射面返回的光束抵达光纤端面的损耗.根据光纤特性,由光纤端面出射的光束为发散形式射出,由于角度原因,光束在 FP 腔内的传输过程中存在不可忽略的损耗.

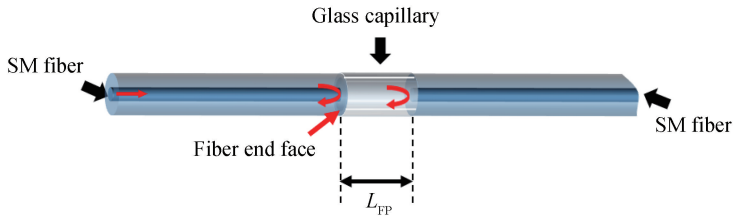


图 1 典型光纤 FP 传感器结构

Fig.1 Structure of a typical fiber-optic FP sensor

当传感器受到温度、应力或应变等外界因素影响时,毛细管产生伸缩形变,腔长发生改变,返回光谱信号也随之发生改变.通过对返回光谱信号的分析和解调可得到腔长的变化量,进而得到外界参量的变化.

2 解调算法与解调原理

为实现对 FP 传感器腔长的高精度解调,提出一种基于幅值归一化和最小均方差的 N-MMSE 算法,通过先后提取反射光谱信号上下包络,然后对其进行幅值归一化,实现实际信号和模拟信号幅值相等,减少 MMSE 计算过程中产生的误差,提高解调精度.

所提出 N-MMSE 算法的流程如图 2 所示,具体过程为:

第一步,滤除光源光谱施加给返回光光谱的调制,将返回光信号 I_r 转换为实际反射率信号 R_a ,并且通过归一化得到归一化实际反射率信号 R_{aN} ;

第二步,采用双峰法对归一化信号进行初步计算得到粗略腔长 L_0 ,依据粗略腔长和设定的 d 值确定模

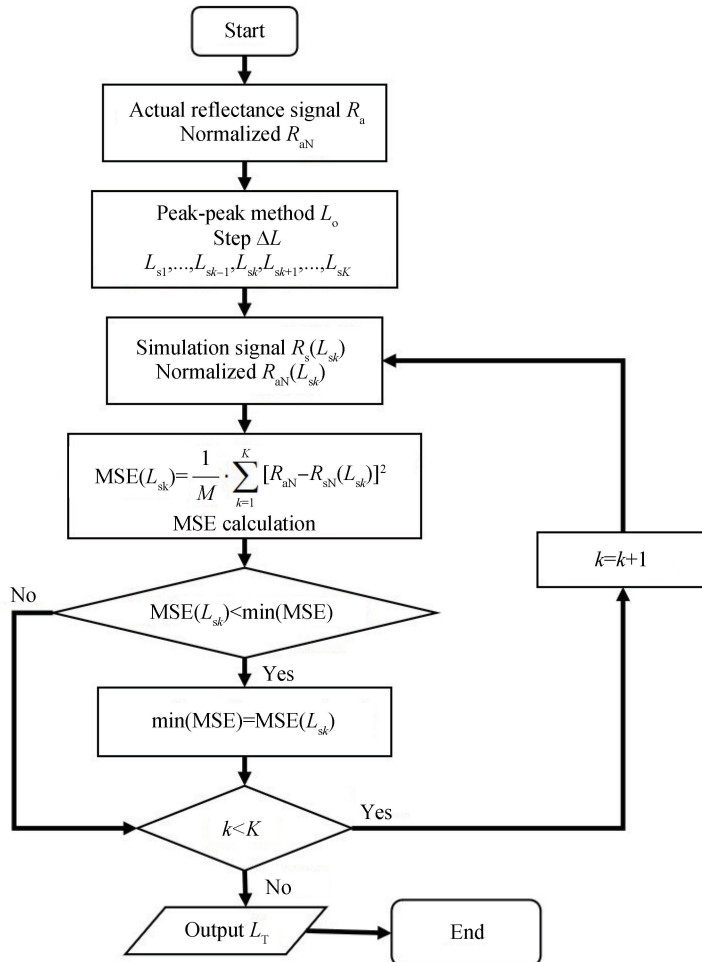


图 2 MMSE 算法流程

Fig.2 Flow chart of MMSE algorithm

拟腔长的取值范围,根据设定的步长 ΔL 生成总数为 K 的模拟腔长序列 $L_{s1}, \dots, L_{sk-1}, L_{sk}, L_{sk+1}, \dots, L_{sK}$;
 第三步,由模拟腔长得模拟反射率信号 $R_s(L_{sk})$,并对模拟反射率信号进行归一化得到 $R_{sN}(L_{sk})$;
 第四步,将归一化后的实际反射率信号和模拟反射率信号进行最小均方差计算(MMSE),得到对应的均方差值 $MSE(L_{sk})$;

第五步,将得到的均方差值同最小均方差 $\min(MSE)$ 比大小,若 $MSE(L_{sk}) < \min(MSE)$,则对应的均方差值为新的最小均方差,反之,最小均方差不改变;

第六步,判断当前模拟腔长序号 k 是否超出模拟腔长总数 K ,若没有超出,则序号 $k+1$ 进入下一轮循环,若等于上限 K ,则输出最终的最小均方值对应的腔长为目标腔长 L_T .

2.1 最小均方差算法原理

MMSE 算法属于腔长匹配法,其流程为:首先选取适当的范围 $L_{s1} = L_o - d, L_{sK} = L_o + d$ 和步长 ΔL ,生成一系列的模拟腔长 $L_{s1}, \dots, L_{sk-1}, L_{sk}, L_{sk+1}, \dots, L_{sK}$;然后依据模拟腔长构建模拟信号 $I_s(L_{sk})$;最后将不同的模拟信号和实际信号分别进行均方差计算(MSE)得到对应的均方差值 $MSE(L_{sk})$,并选取最小均方差值 $\min[MSE(L_{sk})]$ 对应的腔长为目标腔长 L_T . $MSE(L_{sk})$ 作为评判模拟腔长 L_s 和真实腔长 L_{FP} 趋近程度的估计子,公式为

$$MSE(L_{sk}) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=1}^K [I_r - I_s(L_{sk})]^2 \quad (3)$$

式中, I_r 表示反射光谱信号, $I_s(L_{sk})$ 表示模拟光谱信号, M 是光谱信号的总采样点数.

依据 MMSE 算法原理和式(3),只有当两列信号完全一致时,其均方差值最小.但在实际情况中,由于光源光谱为非平坦光谱^[17-18],返回光谱信号 I_r 受到光源光谱的调制和传输损耗等因素影响,导致幅值同模拟光谱信号不等,如图 3 所示.采用幅值不等的两列信号进行计算会对计算结果带来误差.为减小计算误差,在实际计算中,通常采用实际反射率信号 R_a 和模拟反射率信号 $R_s(L_{sk})$ 取代 I_r 和 $I_s(L_{sk})$ 信号. R_a 和 $R_s(L_{sk})$ 公式分别为

$$R_a = \frac{I_r}{I_{LS}} = A(\lambda) \cdot R_{FP} = A(\lambda) \cdot \frac{r_1^2 + \bar{r}_2^2 + 2r_1\bar{r}_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{FP}}{\lambda}\right)}{1 + r_1^2\bar{r}_2^2 + 2r_1\bar{r}_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{FP}}{\lambda}\right)} \quad (4)$$

$$R_s(L_{sk}) = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{sk}}{\lambda}\right)}{1 + r_1^2\bar{r}_2^2 + 2r_1\bar{r}_2 \cos\left(\frac{4\pi nL_{sk}}{\lambda}\right)} \quad (5)$$

式中, $A(\lambda)$ 表示在光信号从光源出发抵达光纤 FP 传感器过程中,光束经过光学器件产生的损耗, L_{sk} 为模拟 FP 传感器腔长, $R_s(L_{sk})$ 为模拟 FP 传感器的反射率信号. $A(\lambda)$ 并非恒值,对于不同的波长其大小不同.

由式(4)可知,实际反射率信号 R_a 的幅值仍然受到两个未知量 $A(\lambda)$ 和 $l(L_{FP})$ 的影响,其幅值和模拟反射率 $R_s(L_{sk})$ 信号幅值不相等.为进一步提高计算精度,消除幅值不等所导致的误差,对两列反射率信号分别进行幅值归一化.

2.2 幅值归一化原理

幅值归一化是通过提取原信号的上下包络信号,并采用包络信号对原信号进行处理进而得到归一化信号的方法.将实际反射率信号 R_a 视为

$$R_a = S_1(\lambda) \cdot R_{aN} + S_2(\lambda) \quad (6)$$

式中, R_{aN} 为归一化后的实际反射率信号,其波峰恒为 1、波谷恒为 0, $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 为干扰信号.如图 4(a)所

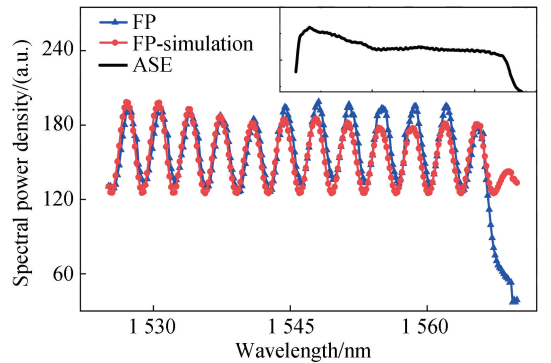


图 3 光纤 FP 传感器的反射光谱
 Fig.3 Reflected spectrum of fiber-optic FP sensor

示,由 R_{aN} 信号的特性可知, $S_2(\lambda)$ 为 R_a 信号的下包络(Lower envelope)曲线,可通过寻峰拟合得到 $S_2(\lambda) = E_L(R_a)$.如图 4(b)所示, $S_1(\lambda)$ 为 $R_a - S_2(\lambda)$ 信号的上包络(Upper envelope)曲线,通过寻峰拟合得到 $S_1(\lambda) = E_U[R_a - S_2(\lambda)]$.如图 4(c)所示,最终归一化反射率信号 R_{aN} 可表示为

$$R_{aN} = N(R_a) = \frac{R_a - S_2(\lambda)}{S_1(\lambda)} = \frac{R_a - E_L(R_a)}{E_U[R_a - E_L(R_a)]} \quad (7)$$

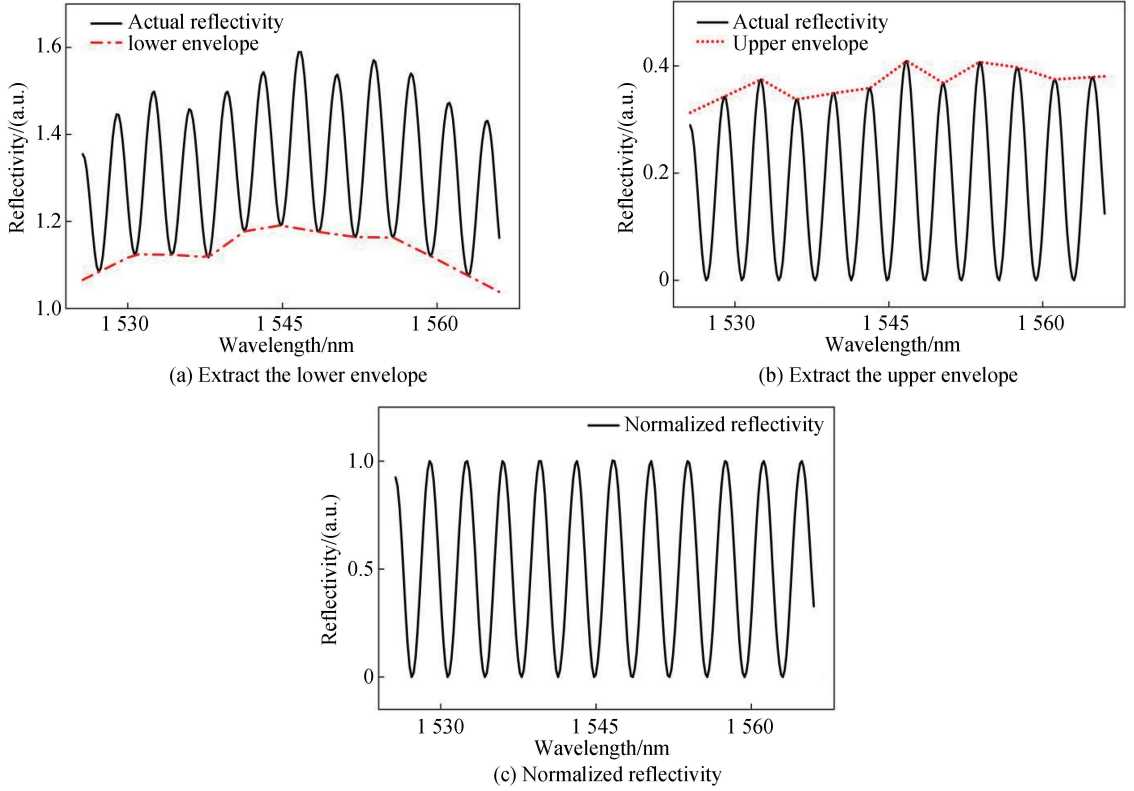


图4 信号幅值归一化

Fig.4 Amplitude normalization of the signal

同理可得到归一化模拟反射率信号 $R_{sN}(L_{sk})$

$$R_{sN}(L_{sk}) = N[R_s(L_{sk})] \quad (8)$$

将 R_{aN} 和 $R_{sN}(L_{sk})$ 带入式(3)中进行 MMSE 计算,可得到目标腔长 L_T .

3 仿真和实验

3.1 仿真分析

为验证 N-MMSE 联合算法在光纤 FP 传感器解调的可行性,首先进行了仿真研究.依据 FP 传感器原理,建立 R_a 和 $R_s(L_{sk})$ 信号模型.波长 λ 的范围为 1 524~1 564 nm,采样点数共 500 点,模拟的实际腔长 L_{FP} 的变化范围 330~350 μm ,采样点数为 100 点.如图 5(a)所示,采用经过偏置并且加入 35 dB 高斯白噪声的反射率信号来模拟受到 $A(\lambda)$ 和 $l(L_{FP})$ 的影响的实际反射率信号 R_a ,根据式(5)生成模拟反射率信号 $R_s(L_{sk})$,采用 N-MMSE 算法进行解调.

如图 5(b),当腔长从 330 μm 增大到 350 μm 时,N-MMSE 算法的腔长误差 L_{error} 的标准差为 0.312 nm.同时,采用经过 FFT-MMSE 算法解调的腔长误差作为对照,其腔长误差的标准差为 1.565 nm.由 FFT-MMSE 算法的腔长误差的标准差是 N-MMSE 算法的 5 倍可知,N-MMSE 同 FFT-MMSE 算法一样具备避免“跳模误差”的能力,并且较 FFT-MMSE 精度提升了 5 倍.

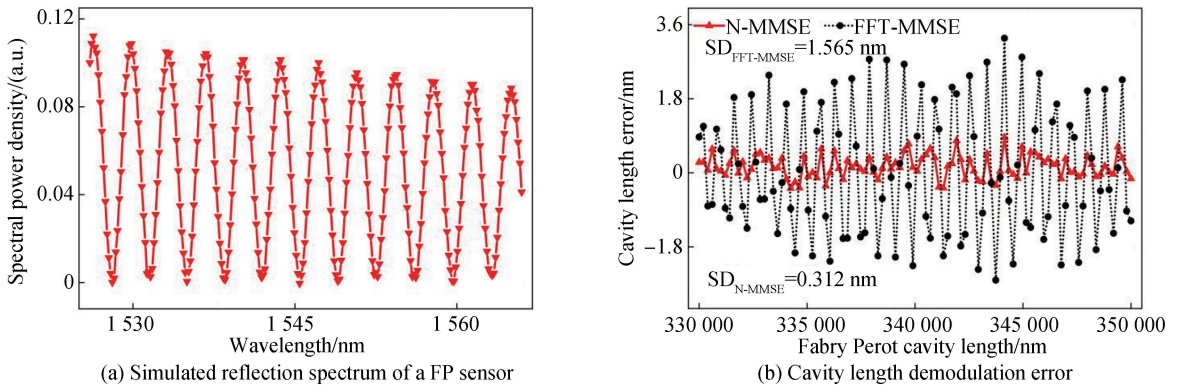


图 5 N-MMSE 算法解调仿真
Fig.5 Demodulation simulation of the N-MMSE algorithm

3.2 实验验证

为了研究所提出 N-MMSE 方法的实际性能,建立了白光光纤 FP 传感系统的实验装置,如图 6 所示.该系统由自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源、光纤环形器,光纤 FP 传感器和光谱仪组成. ASE 光源波长范围为 1 524~1 564 nm,光谱仪为日本 Antitsu 公司的 MS9740A 型号.其中,光纤 FP 传感器为采用玻璃毛细管和单模光纤制备的空气隙 FP 腔结构. OSA 所获取的反射光谱如图 7(a)所示,由于光源光谱不均匀以及 FP 腔反射面的倾斜、衍射损耗等因素,反射光谱信号表现出非等幅的多峰振荡特征.

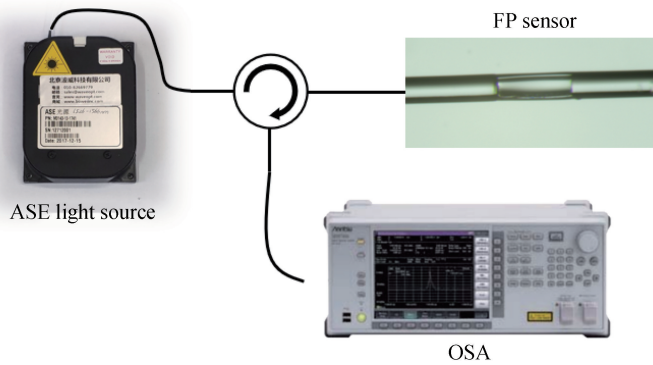


图 6 用于光纤 FP 传感器腔长解调的白光解调系统
Fig.6 A white light interrogation system for the cavity length extraction of fiber-optic FP sensors

在加热实验中,对 FP 传感器进行加热改腔长,进而改变干涉光谱.利用光谱仪采集光谱信号,采用 N-MMSE 算法进行解调和分析.实验中温度变换范围为 125~178 °C,平均每分钟升温 1 °C,采样率为 1/60 Hz.

如图 7(a)所示,当温度增大时,实际反射率信号向右漂移,采用 N-MMSE 算法对实际反射率信号进行计算.由图 7(b)和(c)所示,当温度变化为 125~178 °C,通过 N-MMSE 算法解调得到的热膨胀系数为 $4.50 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$,作为对照的 FFT-MMSE 算法得到的热膨胀系数为 $2.36 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$. SiO_2 材料的理论热膨胀系数为 $5.0 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, N-MMSE 算法的结果更接近于理论值,精度优于 FFT-MMSE 算法.

在分辨率实验中,由于 MS9740A 光谱仪采样时间较长,采用 Ibsen 公司 I-MON 256 OEM 模块接收光谱信号,采样率为 100 Hz.如图 8 所示,在室温条件下, N-MMSE 算法的腔长平均值为 342 494.80 nm,标准差为 0.358 71 nm, FFT-MMSE 算法的腔长平均值为 342 452.22 nm,标准差为 0.293 54 nm. N-MMSE 和 FFT-MMSE 算法的分辨率分别为 0.717 42 nm 和 0.587 08 nm,两者相近.两个实验可以证明,在光源带宽较窄的条件下, N-MMSE 算法可用于光纤 FP 传感器的腔长解调,具有高精度和高分辨率的优点.

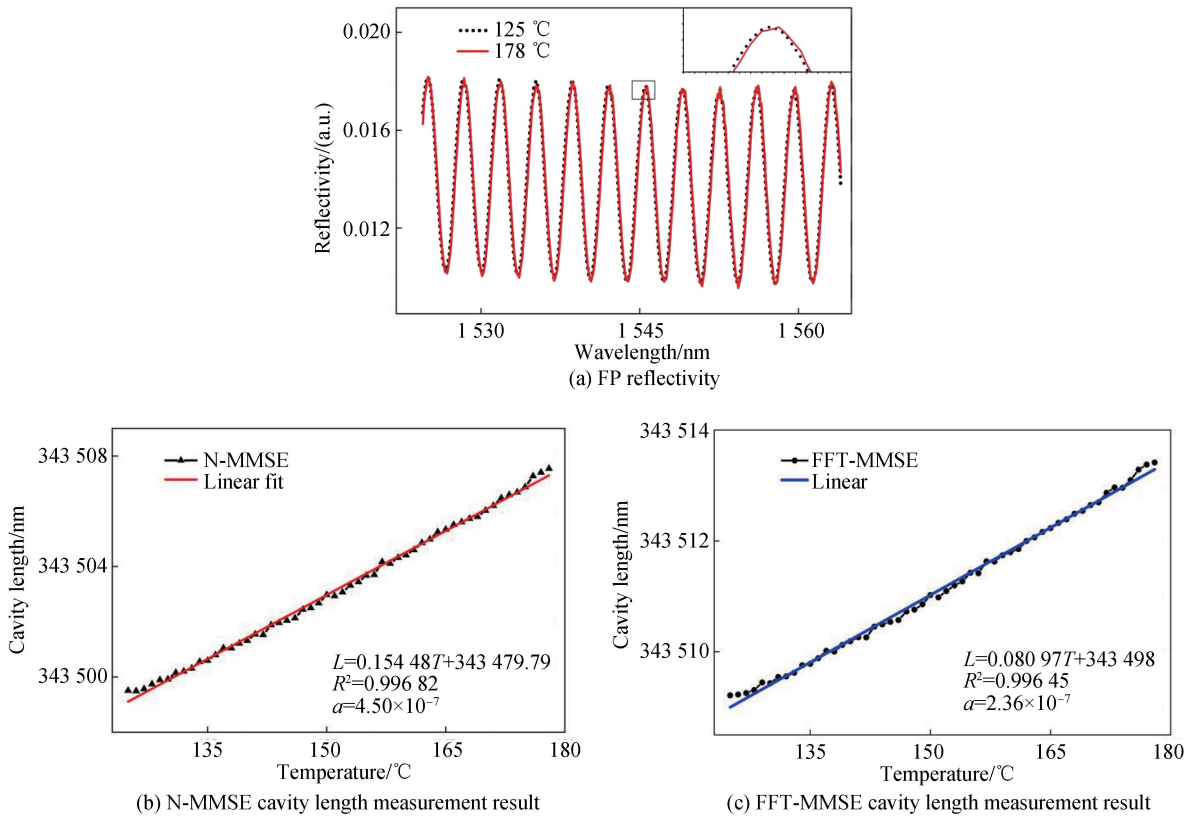


图7 加温腔长测量实验
Fig.7 Cavity length measurement with temperature increasing

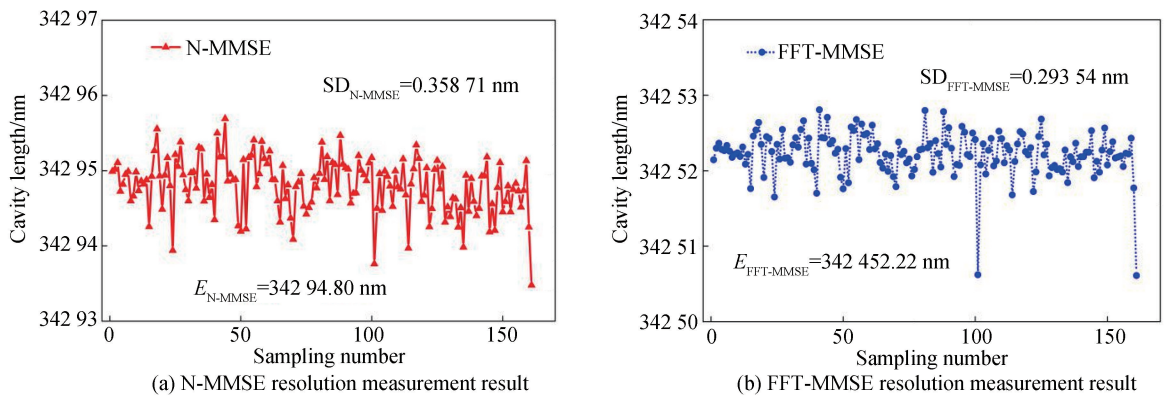


图8 腔长分辨率测量实验
Fig.8 Measurement experiment of cavity length resolution

4 结论

提出了基于幅值归一化的 N-MMSE 算法,可实现对光纤 FP 传感器腔长的高精度解调.该算法以 MMSE 算法为基础,通过对反射光谱信号和模拟信号进行幅值归一化,实现两列信号等幅,减少了幅值不等产生的误差,最终实现了高精度解调.仿真证明该算法可避免跳模误差且模次内误差较 FFT-MMSE 算法提升了 5 倍;实验证明该算法腔长解调分辨率优于 0.72 nm,具有高精度和高分辨率特性.该算法在光源带宽较窄、光源光谱不平坦等情况下,对单 FP 腔解调具备较大的应用价值.

参考文献

- [1] RAO Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 227-237.
- [2] YU Qing-xu, WANG Xiao-na, SONG Shi-de, et al. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic Fabry-Perot

- interferometer for high temperature oil well measurement[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, **18**(3): 299-302.
于清旭,王晓娜,宋世德,等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. 光电子·激光,2007,**18**(3):299-302.
- [3] PINTO A M, FRAZAO O, SANTOS J L, *et al.* Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength raman fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(21): 3149-3155.
- [4] ZOU H, MA L, XIONG H, *et al.* Fiber ring laser sensor based on Fabry-Perot cavity interferometer for temperature sensing[J]. *Laser Physics*, 2018, **28**(1): 015102.
- [5] JIANG Li-juan, JIANG Jun-feng, LIU Tie-gen, *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.
- [6] YU Q X, ZHOU X L. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 72-83.
- [7] LI H, ZHAO Q, JIANG S, *et al.* FP cavity and FBG cascaded optical fiber temperature and pressure sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **17**(4): 43-47.
- [8] HAO L, PING L, LIU L, *et al.* Phase demodulation of short-cavity Fabry-Perot interferometric acoustic sensors with two wavelengths[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 1-9.
- [9] 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.
- [10] LEI Xiao-hua, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, *et al.* Demodulation method based on Fourier transform with cubic spline interpolation for optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 705-708.
雷小华,陈伟民,章鹏,等. 基于三次样条插值的光纤 F-P 传感器傅里叶变换解调研究[J]. 光子学报,2008,**37**(4):705-708.
- [11] WANG Z, JIANG Y, DING W, *et al.* A cross-correlation based fiber optic white-light interferometry with wavelet transform denoising[C]. Asia Pacific Optical Sensors Conference 2013, International Society for Optics and Photonics, 2013, **8924**: 1-4.
- [12] SONG Shi-de, WANG Xiao-na, YU Qing-xu, *et al.* A signal demodulating algorithm for extrinsic Fabry-Pérot interferometer sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 332-334.
宋世德,王晓娜,于清旭,等. 一种非本征光纤法布里-珀罗传感器的信号解调算法[J]. 光学学报,2008,**28**(s2):332-334.
- [13] ZHOU X L, YU Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(7): 1602-1606.
- [14] YIN Jia-di, ZHOU Ci-ming, OU Yi-wen, *et al.* Combined algorithm of fibonacci-MMSE for optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **44**(9): 0906002.
尹嘉笛,周次明,欧艺文,等. 光纤 Fabry-Perot 传感器的 Fibonacci-MMSE 联合解调算法[J]. 光子学报,2015,**44**(9): 0906002.
- [15] SIRKIS J, BERKOFF T A. In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1256-1263.
- [16] DOMINGUEZFLORES C E, MONZONHERNANDEZ D, MORENOBASULTO J I, *et al.* Real-time temperature sensor based on in-fiber Fabry-Perot interferometer embedded in a resin[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, **37**(4): 1084-1090.
- [17] ZHANG T, WANG W, CHEN H, *et al.* Extrinsic Fabry-Perot interferometric cavity-based fiber-optic spectrum equalization filter for the Gaussian spectrum of superluminescent diodes[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(23): 6228-6232.
- [18] TIAN J J, YAO Y, SUN Y X, *et al.* Flat broadband erbium-doped fiber ASE source based on symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(8): 1760-1766.