

# 激光与光电子学进展

## 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展

江毅\*, 张树桓

北京理工大学光电学院信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 光纤激光干涉技术是外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)传感器动态信号解调的主要技术方案,具有测量灵敏度高、动态范围大、测量频率范围宽等优点。本文从外腔式法布里-珀罗干涉仪相对测量的基本原理出发,回顾了四种主流光纤激光干涉测量技术的解调原理、方法及优缺点,重点介绍了作者课题组提出的几种新型被动解调技术,着力解决现有解调仪仅能测量单一腔长的传感器、直流分量去除、腔长在变化甚至不知道等条件下的信号解调问题。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光干涉; 外腔式法布里-珀罗干涉仪; 相位解调

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306017

### Research Progress on Fiber Optical Laser Interferometry in Signal Demodulation of EFPI Sensor

Jiang Yi\*, Zhang Shuhuan

Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Fiber optical laser interferometry is the main technical scheme for dynamic signal demodulation of external Fabry-Perot interferometer (EFPI) sensors. It has the advantages of high measurement sensitivity, wide dynamic range, and wide measurement frequency range. Based on the measuring principle of an extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor, this article presents the demodulation principles, advantages, and disadvantages of presently used phase recovering technologies, and focuses on several new passive demodulation technologies proposed by the author's research group, it mainly solves the problems of existing demodulators which can only measure the sensor with a single cavity length, direct current component removal, and signal demodulation when cavity length changes or even unknown.

**Key words** fiber optics; fiber laser interference; extrinsic Fabry-Perot interferometer; phase demodulation

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 060.2340

## 1 引言

在光纤干涉仪测量过程中,为了实时准确地获取动态信号,必须采用一定的解调技术从光纤干涉

仪的输出信号中还原原始的被测信号<sup>[1]</sup>,解调算法在很大程度上决定了解调仪的性能。基于光纤激光干涉测量技术的外腔式法布里-珀罗干涉仪(EFPI)传感器动态信号解调,主要用于EFPI光纤

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-06-08; 录用日期: 2021-06-15

通信作者: bitjy@bit.edu.cn

传感器中测量振动和声等动态信号<sup>[2-3]</sup>,它是一种相对测量方法,用于检测动态信号调制下光纤干涉仪光程差(OPD)的变化。本文从外腔式法布里-珀罗干涉仪测量动态信号的基本原理出发,回顾了了几种主流光纤激光干涉测量技术的解调原理、方法及优缺点,重点介绍了作者课题组提出的几种新型被动解调技术,着力解决现有解调仪器仅能够测量单一腔长的传感器、直流分量去除、腔长在变化甚至不知道等条件下的信号解调问题。

## 2 光纤激光干涉基本原理

光纤白光干涉(WLI)<sup>[4-6]</sup>测量技术常被用于测量干涉仪的绝对光程差,其解调速度难以对动态信号进行高速测量。而光纤激光干涉法的解调速度相对较快,主要用于测量干涉仪光程差的变化量。光纤干涉仪主要有迈克耳孙干涉仪(MI)<sup>[7-8]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪<sup>[9-10]</sup>、法布里-珀罗干涉仪<sup>[11-12]</sup>以及外腔式法布里-珀罗干涉仪。本文主要以外腔式法布里-珀罗干涉仪传感器作为动态信号解调的研究对象。其中,EFPI的干涉原理如图1所示,光纤反射端面和目标反射端面的反射光在后向产生干涉,形成双光束干涉,干涉仪的输出信号表示为

$$f = A + B \cos(\varphi + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: $A$ 为干涉条纹的直流量; $B$ 为干涉条纹的对比度; $\varphi_0$ 为初始相位,由干涉仪的光程差决定; $\varphi$ 为被测物理量。

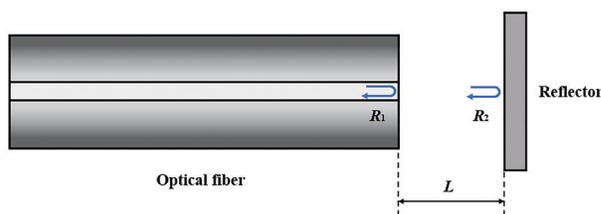


图1 基于法布里-珀罗传感器的干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of interference based on Fabry-Perot sensor

## 3 光纤激光解调技术的研究进展

目前,实现动态信号解调的光纤激光干涉测量方法可以分为两类:主动解调和被动解调。其中,主动解调方案如相位生成载波法(PGC)<sup>[13-14]</sup>,受系统有源部分的约束,限制了解调信号的频率。被动解调方案的频率解调上限不受系统中有源器件的影响,能够解调出更高频率的信号。常见的被动解

调技术包括:正交工作点直接测量法<sup>[15-16]</sup>、双波长被动解调法<sup>[17-18]</sup>、基于三波长对称解调法<sup>[19-20]</sup>等。以上提及的光纤激光干涉测量技术在外腔式法布里-珀罗干涉仪传感器<sup>[21-23]</sup>动态信号解调的实际应用中均具有各自的优点与局限性。

### 3.1 正交工作点直接测量法

正交工作点直接测量法的基本解调思想是将传感器的工作范围控制在干涉输出的线性区域,将干涉仪的光程差变化直接转化为输出信号光强的变化。图2是正交工作点直接测量法的解调原理<sup>[24]</sup>。在相位调制幅度小于 $\pi/2$ 时,双光束干涉的输出与输入之间呈余弦关系。图2中C点到B点之间的部分为线性区域,是解调系统可以正常工作的范围。

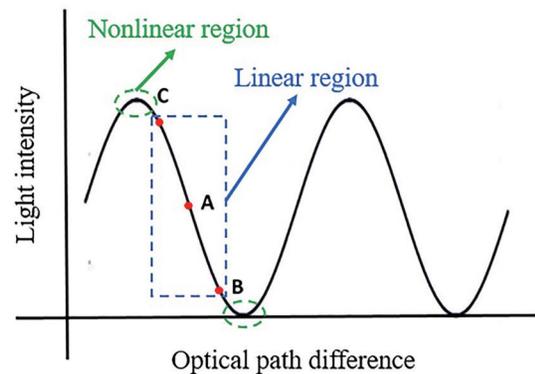


图2 正交工作点及线性区间<sup>[24]</sup>

Fig. 2 Orthogonal working point and linear interval<sup>[24]</sup>

正交工作点直接测量法在应用中存在一些问题,如动态范围窄、静态工作点不稳定等。静态工作点会随着传感器的腔长变化发生漂移,从而影响信号解调结果,因此需要设置静态工作点稳定系统,将干涉仪的工作点始终锁定在正交状态,可以采用控制激光波长的方式来达到锁定静态工作点的目的,其工作原理如图3所示<sup>[1]</sup>。干涉仪的输出经过低通滤波后,获得直流信号(传感器静态工作点),将其输送到电压比较器,与设置好的静态工作点参考电压进行比较,输出误差电压对激光器的工作温度进行调节,通过改变激光器的工作温度,改变激光器的输出波长,使传感器始终锁定在正交状态,在小信号输入时获得线性输出。正交工作点直接测量法可以方便、直接地获得待测信息,且系统搭建成本低。但是该方法的线性区间范围窄,对于EFPI只能测量大约 $1/8$ 波长的腔长变化,因此不适合较大光程差变化的物理量测量。

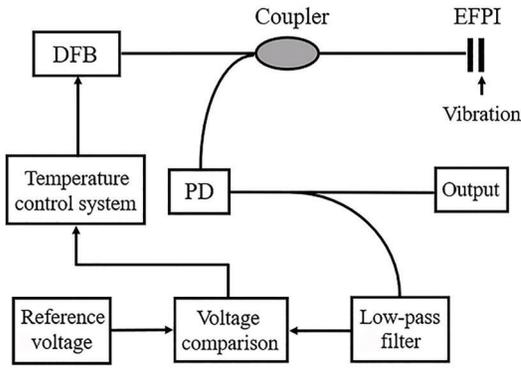


图 3 静态工作点稳定系统<sup>[1]</sup>

Fig. 3 Static working point stabilization system<sup>[1]</sup>

### 3.2 相位生成载波解调法

相位生成载波解调方法<sup>[25]</sup>是将某一频率的相位

调制引入干涉仪,然后将干涉仪输出的载有相位调制的光波信号分别与载频信号和两倍载频信号相乘,通过获得的两路正交信号得到待测信号的相位变化,两路正交信号的解调最常使用的两种算法分别为微分交叉相乘(DCM)算法与反正切(Arctan)算法。

基于PGC解调原理的EFPI传感器系统如图4所示。EFPI干涉仪输出的信号分别乘以  $G\cos\omega_0 t$  和  $H\cos 2\omega_0 t$ ,将得到的信号均经过低通滤波(LPF)后,从而滤除所有含有  $\omega_0$  的项。滤波后的两路信号在调制深度为 2.63 时,得到两路幅度相等、相位相差  $90^\circ$  的正交信号,再用DCM算法解调。方法是这两路正交信号分别乘以对方的微分结果,相减后进行积分处理,再经过高通滤波器(HPF)处理,去除环境扰动等低频信号,最终得到待测信号。

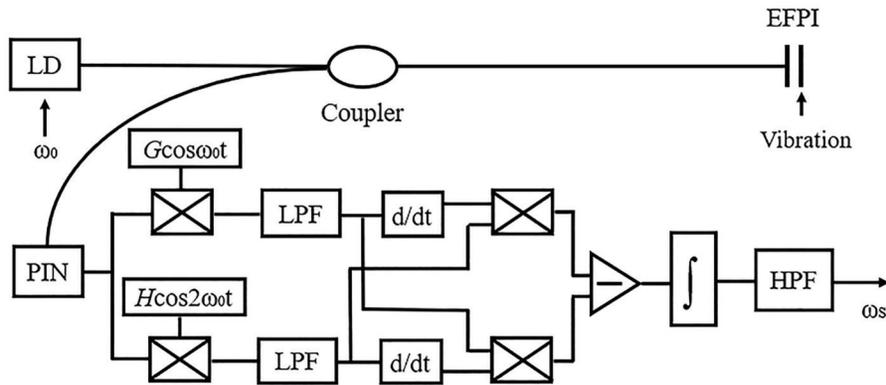


图 4 基于PGC解调原理的EFPI传感器系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of EFPI sensor system based on PGC demodulation principle

2015年,国防科技大学的Wang等<sup>[26]</sup>设计了一种路径匹配差分干涉(PMDI)与PGC相结合的解调技术,用于对非本征EFPI传感器进行动态信号

的解调,其干涉系统如图5所示。采用专门设计的光纤MI与EFPI传感器级联。实验结果表明,该方法能正确地恢复传感信号,且失真度低。

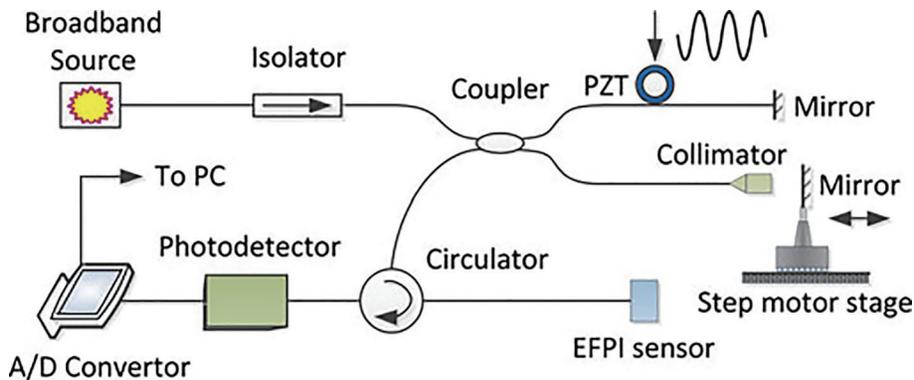


图 5 PMDI-PGC解调系统示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of PMDI-PGC demodulation system<sup>[26]</sup>

2018年,天津理工大学的Zhang等<sup>[27]</sup>改进了PGC解调算法,提出了一种非对称相除-微分自乘-

相位生成载波(PGC-AD-DSM)解调方法。图6为PGC-AD-DSM算法的解调方案,通过该算法可以

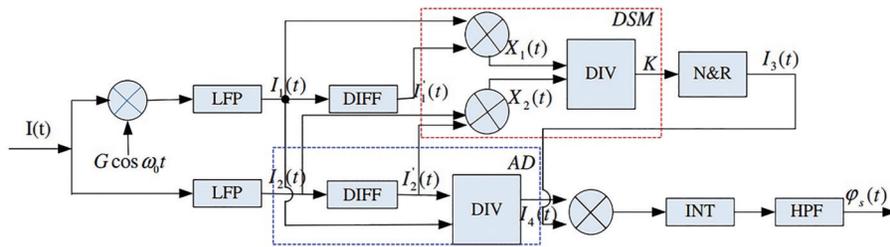


图 6 PGC-AD-DSM解调算法示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of PGC-AD-DSM demodulation algorithm<sup>[27]</sup>

去除调制深度与光强扰动的影响。实验结果表明,该算法解调的传感器信噪比可以达到 22.65 dB。

PGC解调方法的线性动态范围达  $10^7$ ,具有动态范围大、线性度好、测量相位精度高的优点。但由于边带信号的频谱通常是无限宽的,因此,滤波处理同时也对边带频谱(即被测信号的频谱)做了截断。这样,为了把信号的失真程度控制在许可的范围内,就必须提高载波的频率,并改善低通滤波器的性能。但载波频率的大小受调制器件和后续电路性能的限制,因此,这种解调方法的动态范围直接受到调制器件性能的影响。另外,这种测量方法的精度容易受到外界因素的影响,如光源功率波动、混频信号幅度的漂移和相位调制幅度变化等<sup>[1]</sup>。

### 3.3 3×3耦合器的对称解调法

基于 3×3 耦合器的对称解调方法由美国海军

研究院的 Brown 等<sup>[28]</sup>在 1991 年率先提出。该方法采用完全对称的 3×3 耦合器输出的三路互成 120° 相位差的干涉信号,其本质是引入更多的变量以降低系统的不确定性。然后,利用这三个输出信号进行一系列的运算,从而得到待测信号。

基于 3×3 耦合器对称解调技术的算法如图 7 所示<sup>[1]</sup>。其解调过程如下:首先将系统中光电探测器输出的三路干涉信号  $U_0, U_1, U_2$  相加后取平均值,即获得干涉信号的直流分量  $B$ ;再分别从  $U_0, U_1, U_2$  减去已知量  $B$ ,即获得干涉信号中的交流量  $a, b, c$ ;接着分别对  $a, b, c$  进行时间求导,得到相应的微分信号  $d, e, f$ ;然后分别将每个交流量与另外两个交流量导数的差相乘,并把三路结果相加得到  $N$ ;另外分别将  $a, b, c$  平方后相加得到  $D$ ,最后将  $N$  除以  $D$  并进行积分运算,从而获得待测信息。

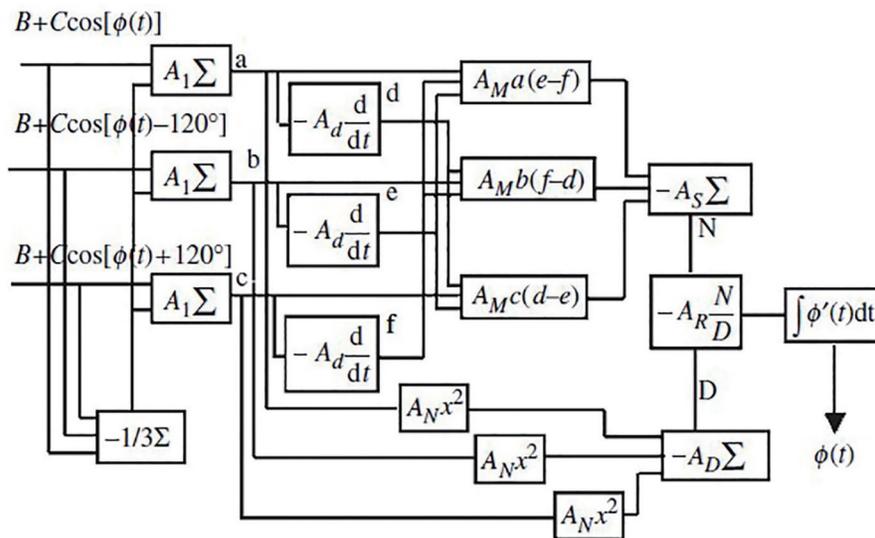


图 7 基于 3×3 耦合器对称解调方法示意图<sup>[1]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of symmetrical demodulation method based on 3×3 coupler<sup>[1]</sup>

2009 年,北京理工大学的 Jiang 等<sup>[29]</sup>提出了一种三波长对称解调技术,从而实现对外腔式法布里-珀罗干涉仪的动态测量。图 8 为实验装置示意图。放大自发辐射(ASE)光源与 3 dB 耦合器相连接,耦合

器的输出连接到 EFPI。反射光被注入一个四通道波分复用器(WDM)。波分复用器的三个输出端则分别与三个光纤布拉格光栅相连接,并由三个光电二极管检测其反射光。控制三个光纤布拉格光栅

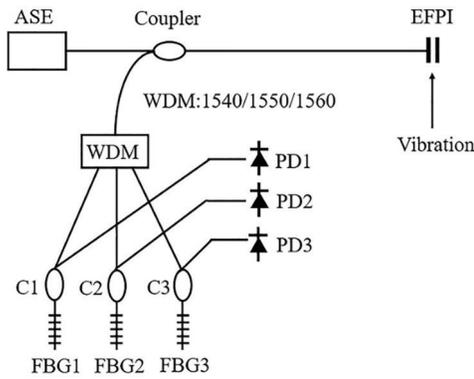


图 8 基于三波长的对称解调 EFPI 实验装置图<sup>[29]</sup>

Fig. 8 Experimental setup for interrogating an EFPI by using a three-wavelength method<sup>[29]</sup>

的波长,可以产生三路 120°移相信号。采用基于 3×3 耦合器的干涉解调技术<sup>[1]</sup>,即可解调出干涉仪的相位变化,其可检测最小相位为 0.43 μrad/Hz<sup>1/2</sup>。

实际测量过程中,基于三波长的对称解调方法可测量信号的上限频率仅受信号处理器运行速度的限制,因此非常适合对高频信号进行解调。该算法相较于 PGC 算法,其解调原理更加简单。但要求三路信号严格地遵守互成 120°的相位差,因此,EFPI 腔长须与波长形成特定的关系,且对波长的稳定性要求较高。

### 3.4 双波长正交测量激光干涉解调法

双波长正交测量法是动态信号检测中常用的解调方法。其传感器的工作范围不受线性区间大小的约束,具有很高的测量频率和较大的动态测量

范围。双波长正交测量干涉系统如图 9 所示<sup>[30]</sup>。波长为 λ<sub>1</sub>、λ<sub>2</sub> 的两束激光经过 WDM 进入 3 dB 耦合器,并注入到 EFPI 中,载有振动信息的干涉信号反射后经另一个 WDM,将两个波长的干涉信号分离,通过调整光源波长与 EFPI 腔长获得两路正交信号,再利用正交解调算法获得干涉仪的相位变化。

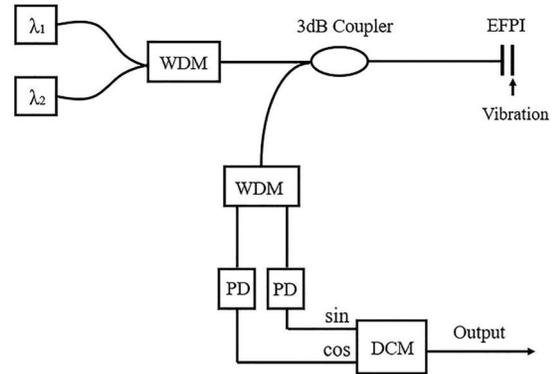


图 9 双波长无源正交解调系统<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Dual-wavelength passive quadrature demodulation system<sup>[30]</sup>

双波长正交解调算法的如图 10 所示。首先将干涉输出的两路正交信号  $f_1$  和  $f_2$  通过高通滤波器 (HPF) 后,消除其直流分量  $A$ ,即获得两路只含有交流量的信号  $V_1$  和  $V_2$ ;然后分别对其进行微分,再分别与  $V_1$  和  $V_2$  交叉相乘,将结果相减后进行积分处理;最后由  $V_1$  和  $V_2$  的平方和获得  $B^2$ ,积分后的信号除以  $B^2$ ,获得待测信号的相位信息  $\theta$ 。

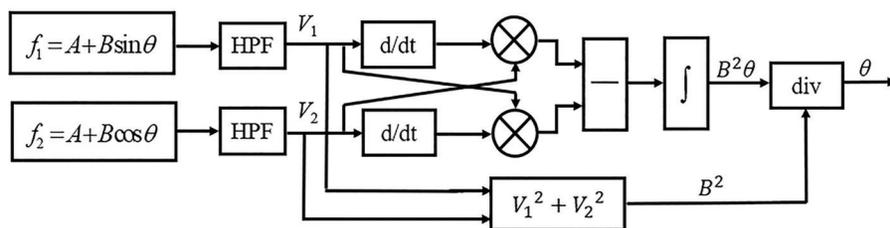


图 10 双波长正交解调算法示意图

Fig. 10 Schematic diagram of dual-wavelength orthogonal demodulation algorithm

该方法中只有当传感器的腔长和光源的波长满足一定条件时,才能获得两路正交信号。因此需要匹配干涉仪的光程差与光源的波长,只能对某些特定腔长的传感器进行解调,限制了其应用范围。当两路干涉输出信号相位差偏离 π/2 时,可以通过相位补偿的方法来获取两路正交输入<sup>[31-33]</sup>,该方法由北京理工大学的江毅等在 2010 年提出。该技术的实质是通过相位补偿使得两路偏离 π/2 相位差的干涉输出信号正交。在此基础上,双波长正交解调

方法不仅获得了较高的解调精度,而且拓展了其应用范围。

其双波长正交相位补偿解调算法的示意图如图 11 所示。将干涉输出的两路不完全正交信号  $I_1$  和  $I_2$ ,去除直流分量并归一化,即获得信号  $I_{D1}$  和  $I_{D2}$ ;将  $I_{D1}$  和  $I_{D2}$  相乘,并通过低通滤波器后,获得  $\Delta\phi$ ;用  $\Delta\phi$  构建出一路新的信号与另一路原始信号正交,然后通过一系列运算,得到与  $I_{D2}$  正交的信号  $\cos \theta$ ;最后利用 DCM 或 Arctan 算法获得待测信号。

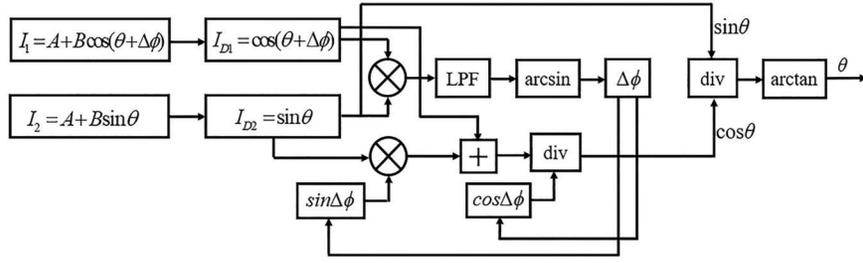


图 11 双波长正交相位补偿解调算法示意图

Fig. 11 Schematic diagram of dual-wavelength quadrature phase compensation demodulation algorithm

上述两种解调方法,均是利用滤波的手段去除干涉条纹的直流信息,但该方法只有在相位调制幅度大于  $2\pi$  时才能得到正确的直流分量。因此,当相位调制深度小于  $2\pi$  时,对动态信号进行解调容易产生失真。针对以上存在的问题,Jia 等<sup>[34]</sup>又提出了一种双波长直流补偿激光干涉解调方法。利用直流补偿和相位补偿算法,可以得到完全正交的干涉输出信号。从而在不同腔长和调制深度条件下,实现了动态信号的解调。

双波长直流补偿激光干涉解调算法如图 12

所示。为了获得干涉条纹的直流分量,需要利用 WLI 测量技术获得传感器的原始腔长  $d_0$ 。在未加载信号的情况下,由于  $d_0, \lambda_1, \lambda_2$  为已知量,  $F_1, F_2$  则通过解调系统直接获得。通过运算可以得到干涉条纹对比度  $B$ ,从而获得直流量  $A$  如图 12(a) 所示。在加载信号时,将未加载被测信号时获取的直流参量代入到图 12(b) 算法流程图中,可以得到两路不含直流量的信号,通过相位补偿技术以及 DCM 或者 Arctan 算法,便可以获得待测信号。

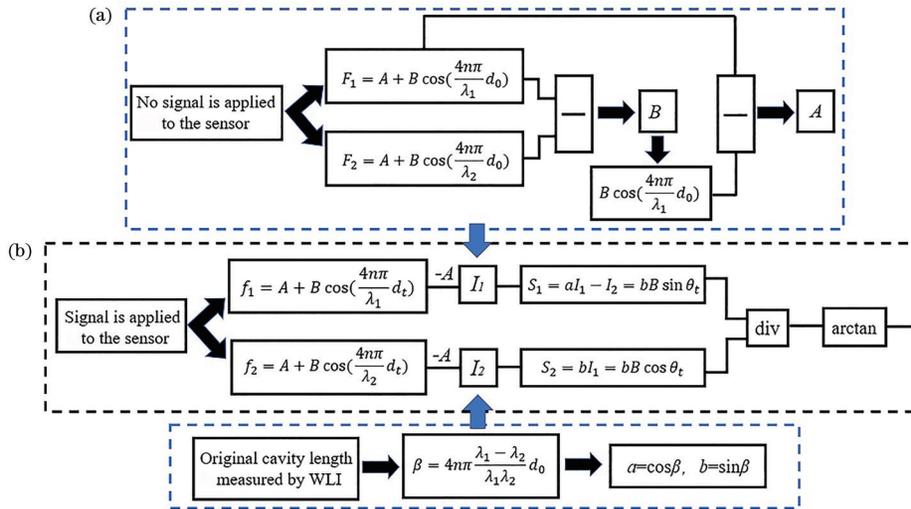


图 12 双波长直流补偿激光干涉解调算法示意图

Fig. 12 Schematic diagram of dual-wavelength direct current compensation laser interference demodulation algorithm

利用双波长直流补偿激光干涉解调技术对 EFPI 传感器进行测试。图 13 为  $129.946 \mu\text{m}$  腔长的传感器加载  $1 \text{ kHz}$  信号的实验结果。图 13(a) 为干涉仪输出的两路干涉信号,对应的李萨如图如图 13(b) 所示,其相位调制深度不到  $\pi/3$ 。图 13(c) 为传感器的解调信号,其功率谱如图 13(d) 所示,可见一个小幅度的调制信号被正确地解调出来了。

双波长直流补偿激光干涉解调技术,不需要考虑传感器的腔长与激光器的波长相互匹配的问题。

该技术可以对不同腔长和调制深度的 EFPI 传感器进行解调。但是该算法也存在一些问题,直流补偿只能在传感器未加载信号的情况下进行,从而限制其使用范围;在信号测量过程中,无法实时获取直流量的变化,从而降低了应用的广泛性。

### 3.5 三波长被动解调激光干涉法

由于双波长正交解调需要匹配光源波长与 EFPI 的腔长关系,不能用于解调任意腔长的 EFPI 传感器,北京理工大学江毅团队又提出了一种三波

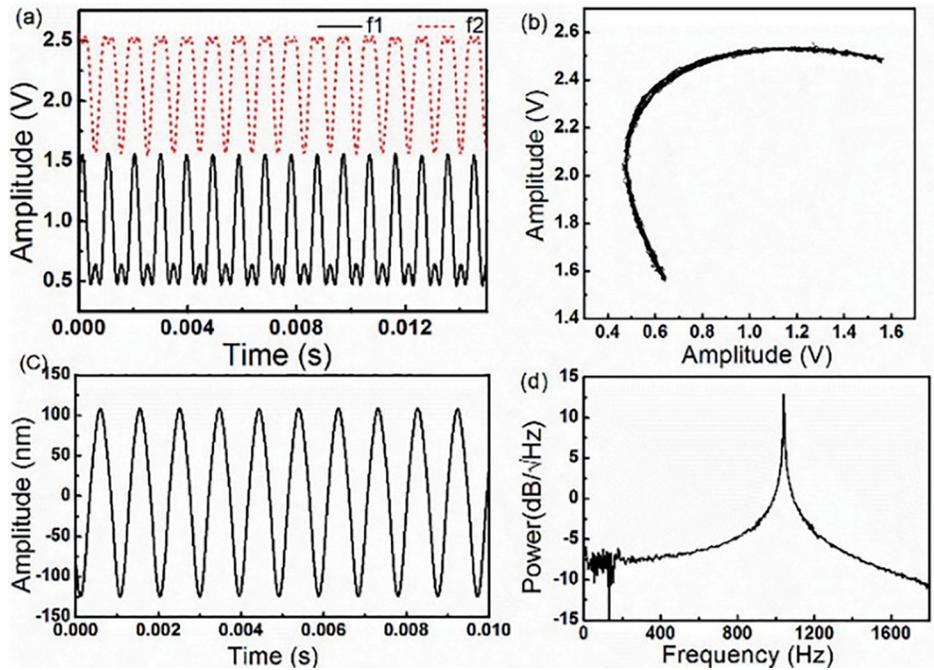


图 13 腔长为 129.946 μm 的 EFPI 传感器加载 1 kHz 信号的实验示意图<sup>[34]</sup>

Fig. 13 Experimental results of the EFPI with a cavity length of 129.946 μm at 1 kHz<sup>[34]</sup>

长激光干涉测量技术<sup>[35]</sup>,该解调技术的原理如图 14 所示。波长分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  的三路激光由分布式反馈(DFB)激光器产生,经过 WDM1 以及耦合器入射到 EFPI 传感器,载有待测信息的反射光经由耦合器进入 WDM2,将三个波长的干涉光信号分开,三路干涉输出信号由光电二极管转化为电压信号  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ,最后通过运算获得待测信号。

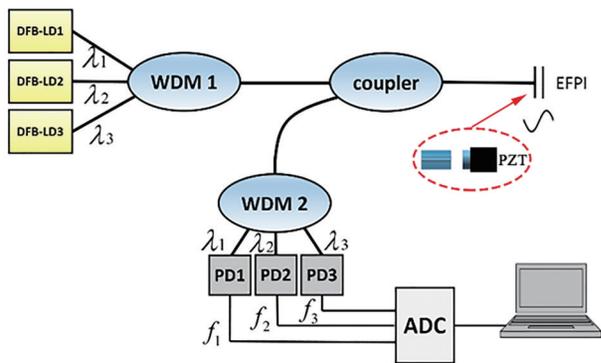


图 14 三波长被动解调激光干涉系统示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of three-wavelength passive demodulation laser interference system<sup>[35]</sup>

三波长被动解调激光干涉算法原理如图 15 所示。测量前首先由 WLI 技术获得传感器的原始腔长为  $d_0$ ,并通过运算得到直流流量  $A$ (测量过程中,可实时计算  $A$  的变化);然后分别去除  $A$  得到交流信号  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ ,最后由 DCM 算法获取待测动态信息。

实验测试了该解调方法可以测量 EFPI 的最小以及最大腔长分别为 22.96 μm 和 1002.3 μm。当对 22.96 μm 腔长的传感器加载 200 Hz 的正弦信号时,图 16(a)为三路干涉输出信号,图 16(b)为其解调信号。当对 1002.3 μm 腔长的传感器加载 200 Hz 的正弦信号时,图 16(c)为三路干涉输出信号,图 16(d)为其解调信号。实验表明,该解调方法可以对腔长为 22.96~1002.3 μm 的不同腔长的 EFPI 传感器的动态信号进行解调。

在该解调算法中引入了三个不同波长的激光,增加了系统的稳定性。此外,利用三路干涉输出信号实时计算直流流量,从而及时准确地获得直流流量的变化。提供了一种具有抗干扰能力以及更加广泛实用的干涉解调技术。

### 3.6 三波长移相解调激光干涉法

为了进一步简化算法,提高系统的解调速度。北京理工大学的江毅团队又提出了一种光纤激光移相解调法<sup>[36-37]</sup>,通过对三路干涉输出信号的运算,直接获取待测动态信号。移相解调算法的流程图如图 17 所示。已知三路干涉输出信号分别为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ,通过对三路信号进行运算,可以直接将干涉条纹直流流量  $A$  和对比度  $B$  的影响抵消;在这里,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  为已知量,由传感器腔长与激光器波长计算获得;通过对  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  的三角函数运算可以推导出  $D$ 、 $E$ 、 $F$  及  $G$  的值,再经过简单的计算获得待测信号。

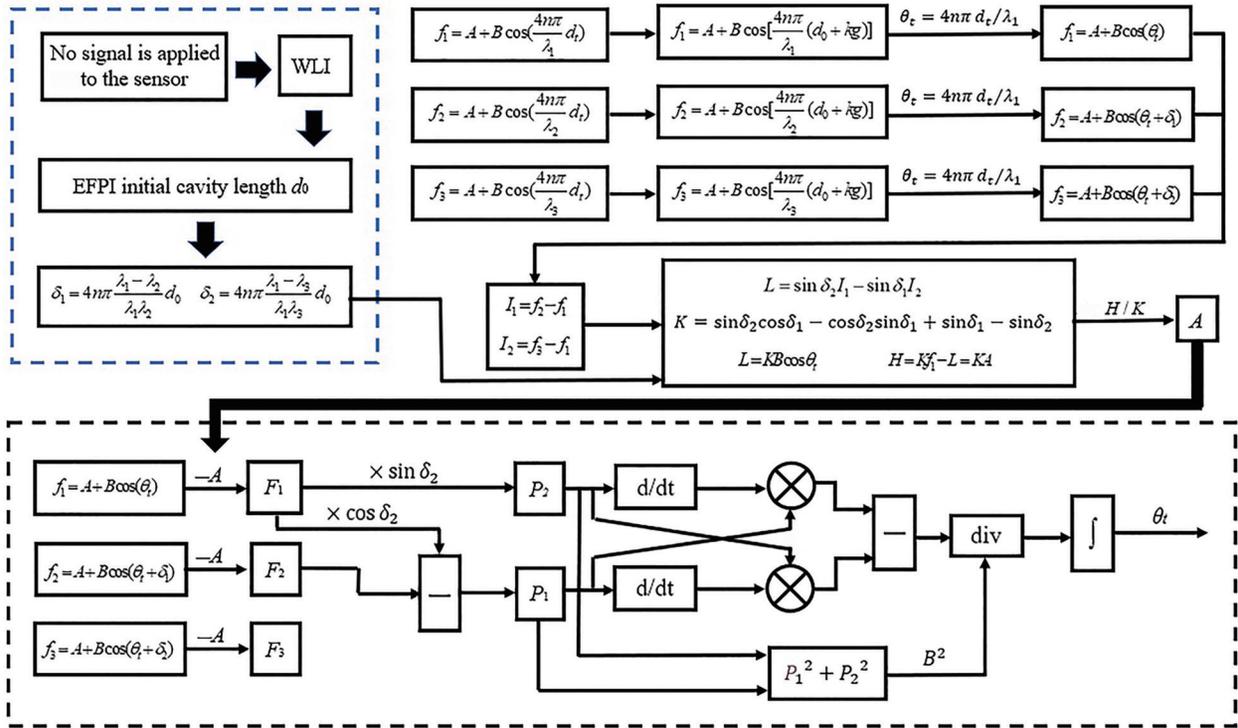


图 15 三波长被动解调激光干涉算法示意图

Fig. 15 Schematic diagram of three-wavelength passive demodulation laser interference algorithm

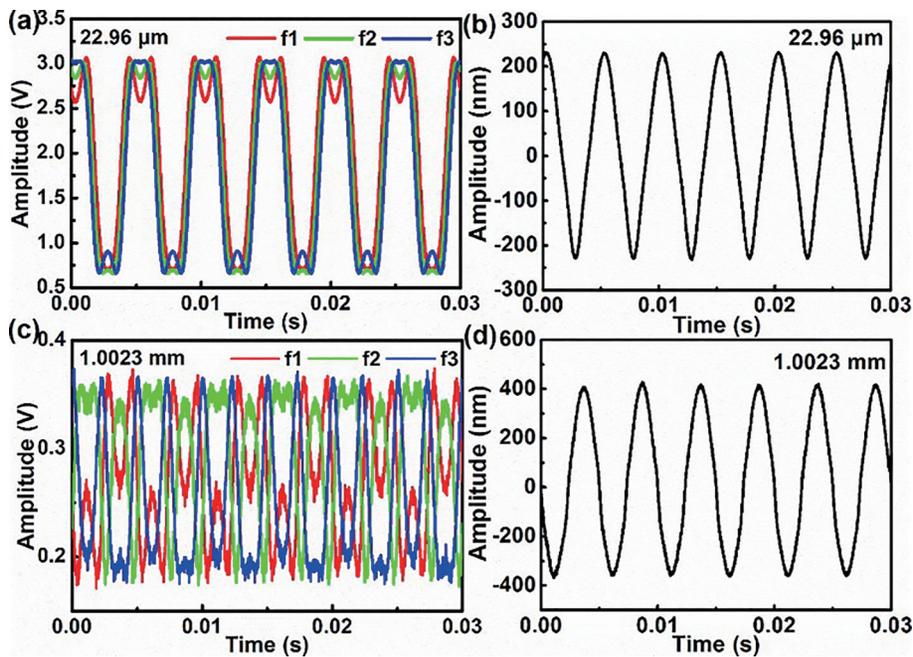


图 16 三波长被动解调激光干涉实验结果示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 16 Schematic diagram of experimental results of three-wavelength passive demodulation laser interference<sup>[35]</sup>

当对 239.785  $\mu\text{m}$  腔长的传感器加载 20 kHz 的正弦信号时, 其实验结果如图 18 所示。图 18(a) 为三路干涉输出信号, 图 18(b) 为  $f_1$  与  $f_2$ 、 $f_1$  与  $f_3$  的李萨如图, 图 18(c) 为获得的解调信号, 图 18(d) 为该解调信号的功率谱。由图 18(a) 和

(b) 可知, 测量过程中传感器相位调制深度小于  $2\pi$ 。由图 18(c) 和 (d) 可知, 解调信号与驱动信号具有相同的频率。

该解调方案不需要干涉信号之间具有恒定相位差, 因此对传感器腔长和光源波长没有严格的限

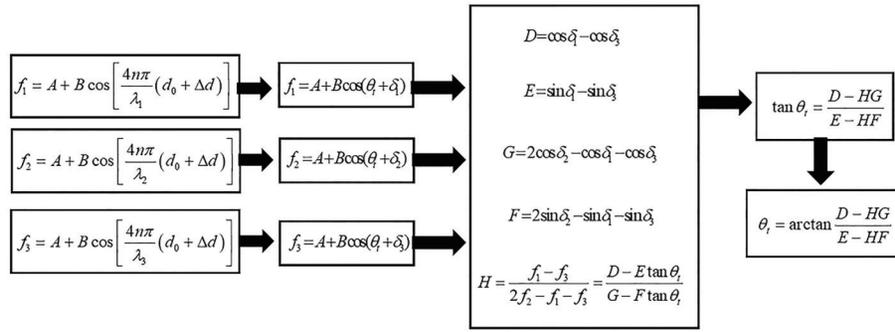


图 17 移相解调算法示意图

Fig. 17 Schematic diagram of phase shift demodulation algorithm

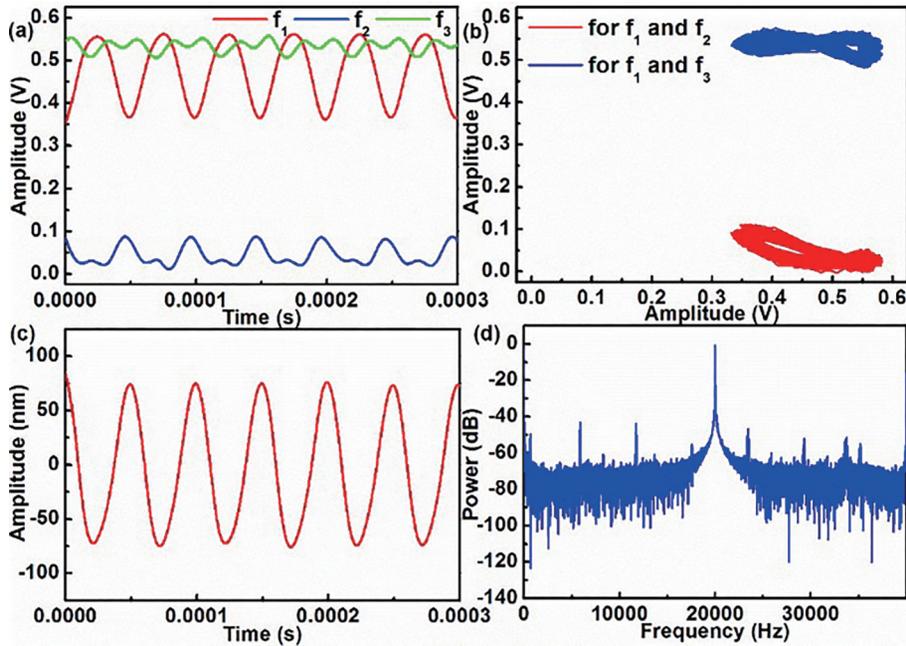


图 18 移相解调实验结果示意图<sup>[37]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of the experimental results of phase-shift demodulation<sup>[37]</sup>

制。此外,该算法不需要计算直流量的值,而是通过对干涉信号的运算直接去除直流量的影响。三波长光纤激光移相解调法具有更宽广的适用范围。

### 3.7 三波长对称解调激光干涉法

北京理工大学江毅团队提出的光纤激光三波长对称解调技术<sup>[38]</sup>可以在传感器腔长未知的前提下,对不同腔长和调制深度的EFPI传感器进行解调。三波长对称解调算法的流程图如图 19 所示。三路干涉信号分别为  $f_1, f_2, f_3$ , 在波长对称时,得到三路信号分别为

$$f_1 = A + B \cos(\varphi_1 - \delta), \quad (2)$$

$$f_2 = A + B \cos(\varphi_1), \quad (3)$$

$$f_3 = A + B \cos(\varphi_1 + \delta), \quad (4)$$

其中,

$$\delta = 4n\pi d_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} = 4n\pi d_1 \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_3 \lambda_2}, \quad (5)$$

式中:  $d_1$  为受待测信号调制的 EFPI 腔长。通过 (5) 式可得出  $\lambda_3$  与  $\lambda_1, \lambda_2$  的关系,

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\lambda_1 - \lambda_2}, \quad (6)$$

式中: 信号  $f_1$  与  $f_2$  之间的相位差应该与信号  $f_3$  与  $f_2$  之间的相位差相等, 即信号  $f_1, f_3$  关于信号  $f_2$  对称。为了精确控制激光的工作波长, 需要仔细控制半导体激光器的工作温度, 通过控制激光器的工作温度, 可以将工作波长精确控制在 2 pm 的误差范围内。

信号  $f_1, f_2, f_3$  通过加减运算得到  $F_1, F_2$ , 其中, 信号  $F_1$  的幅度为  $A_F$ , 信号  $f_2$  的幅度为  $A_I$ 。将  $A_F$  与  $A_I$  进行运算可以得到  $\sin \delta$  与  $\cos \delta$ 。进而, 可以计算出

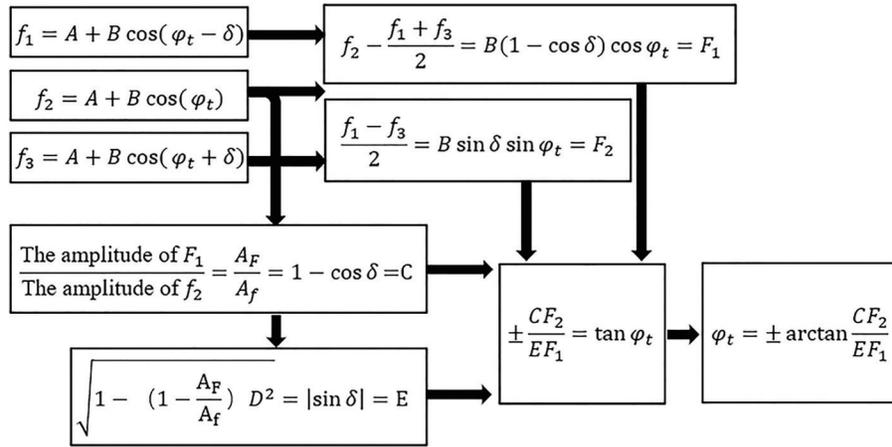


图 19 三波长对称解调算法示意图

Fig. 19 Schematic diagram of three-wavelength symmetric demodulation algorithm

待测信号的正切值,并通过 Arctan 算法得到待测信号。

为了与三波长对称解调技术获取的传感器腔长信息进行比较,需要在实验前后,分别利用 WLI 技术测得 EFPI 腔长为 301.252 μm 和 264.427 μm。即实验前后 EFPI 腔长变化量为 36.8 μm。实际测量过程中,对 EFPI 传感器加载 300 Hz 的正弦信号,并改变传感器腔长大小,其解调结果如图 20(a)所示。

其中,图 20(b)~(d)分别为传感器腔长调整前、中、后的解调信号局部放大图。图 20(b)和(d)中信号的振幅分别为 837.3 nm 和 836.6 nm,即传感器腔长调整前后解调信号的振动幅度基本一致。此外,将图 20(b)与(d)中解调信号直流量相减,其差值为 36.6 μm,该值与 WLI 技术测量得到的腔长变化量(36.8 μm)基本相同。实验结果表明,在腔长未知的情况下,该算法可以对不同腔长的传感器进行信号解调。

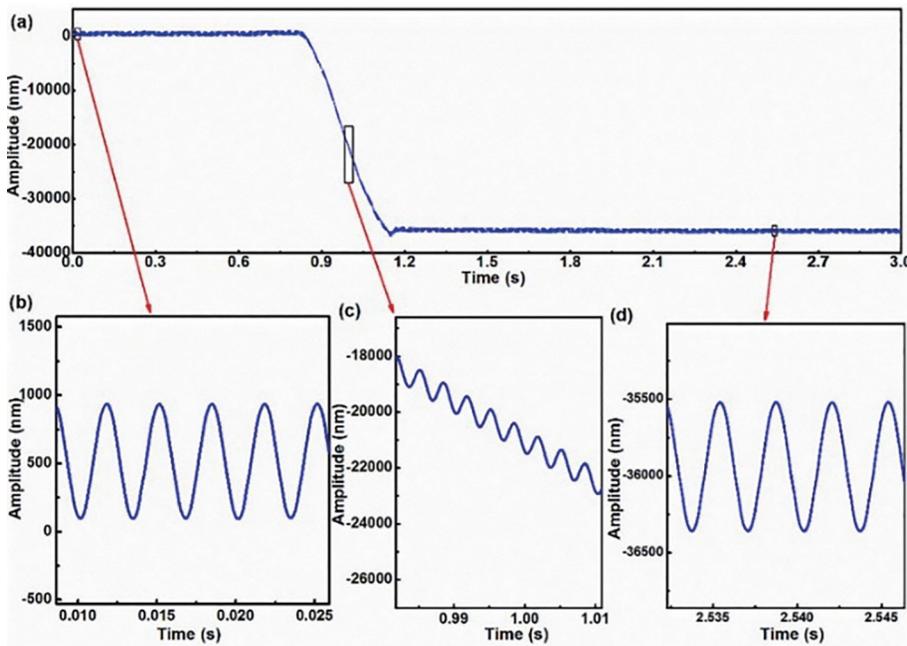


图 20 解调结果。(a)腔长从 301.252 μm 变为 264.427 μm 时的输出信号;(b)~(d)图(a)中实线框区域的局部放大<sup>[38]</sup>

Fig. 20 Demodulation results. (a) Output signal when the cavity length is changed from 301.252 μm to 264.427 μm;

三波长对称解调技术无需获取传感器原始腔长,即可实现对传感器动态信息的解调。因此,该

技术适用于腔长无法判断或波动较大的场合,算法简单可靠,有助于在实际应用中得到推广。

四种新型光纤激光干涉测量技术的对比如表 1 所示。通过提出的双波长直流补偿激光干涉解调法和三波长激光干涉被动解调法,对干涉信号进行直流补偿及相位补偿,从而获得两路正交信号;而光纤激光移相解调法,通过对干涉信号的运算直接

消除干涉条纹直流量及对比度的影响,从而获得待测信号的正切值;光纤激光三波长对称解调法可以在传感器腔长未知的前提下,对不同腔长和调制深度的 EFPI 传感器进行解调。

表 1 四种不同解调方案的对比

Table 1 Comparison of four different demodulation methods

Demodulation method	Demodulation condition	Demodulation idea	Solved problem
Dual-wavelength DC compensation laser interferometry	EFPI cavity length and source wavelength are known	DC compensation, phase compensation, signal recovery	Dual-wavelength demodulation method can be used to interrogate EFPIs with any cavity length and any phase modulation
Three-wavelength passive demodulation laser interferometry	EFPI cavity length and source wavelength are known	DC compensation, phase compensation, signal recovery	DC component is compensated online, the EFPI demodulation with any cavity length and any phase modulation can be realized
Three-wavelength phase shift demodulation laser interferometry	EFPI cavity length and source wavelength are known	Interferometric signal, tangent of the signal, signal recovery	DC and phase compensation are eliminated directly; the EFPI demodulation with any cavity length and any phase modulation can be realized
Three-wavelength symmetric demodulation laser interferometry	Two interferometric signals are symmetrical about the third interferometric signal	Interferometric signal, tangent of the signal, signal recovery	Under the condition of unknown cavity length, it can be used to interrogate EFPIs with any cavity length and any phase modulation

## 4 结束语

光纤激光干涉测量作为一种动态信号测量方法,其解调算法在很大程度上决定了信号解调仪的性能。各种各样的解调技术在实际应用中均具有优缺点。其中,正交工作点直接测量法、相位生成载波法、 $120^\circ$ 相位对称解调法等常见的解调技术,无法对不同腔长和调制深度的传感器进行解调。针对这些技术存在的问题,我们对新型光纤激光干涉测量方法进行研究,提出了双波长直流补偿激光干涉解调法、三波长激光干涉被动解调法、光纤激光移相解调法、三波长对称解调法等信号解调技术。

综上所述,光纤激光干涉测量技术采用不同类型的解调算法,以满足对不同应用条件下信息的高效、实时、精确获取。在利用该技术进行动态信号测量的应用中,解调方法的正确使用极其重要。这些解调方法可分为主动解调与被动解调两大类。其中,主动解调方案受系统有源部分的限制,解调频率有限。而作为应用主流的被动解调方案(正交工作点直接测量法、多波长解调法)则以其高解调频率、高精度、系统简洁紧凑等优点得到广泛应用。

然而,各种解调技术都有其自身的缺陷,如无法对不同腔长和调制深度的 EFPI 传感器进行解调,这在很大程度上限制了其进一步的应用。我们提出了双波长直流补偿激光干涉解调法、三波长激光干涉被动解调法、光纤激光干涉移相解调法、三波长对称解调法等技术,这些技术增强了 EFPI 传感器的信号解调能力,大大提升了激光干涉测量技术的工程适应性。

以上提出的几种新型被动解调技术实现了对不同腔长和调制深度的传感器的信号解调。但其也存在一些不足,需要进一步的展开研究工作。本文所研究的激光干涉测量技术只针对双光束干涉仪的解调,未涉及多光束干涉传感器的解调;而基于多光束干涉仪的传感器,如高精度 FP 传感器,通常拥有高灵敏度,因此,需要对能够解调多光束干涉仪的激光干涉测量技术展开研究。此外,本文研究的激光干涉测量技术在实验室环境中进行了大量的实验及测试,但是,在工程实践的应用还很少;因此,需要针对工程应用进一步优化,如降低系统噪声、减小系统尺寸等,同时需要解决实际应用中遇到的问题。

## 参 考 文 献

- [1] Jiang Y. Advanced optical fiber sensing technology [M]. Beijing: Science Press, 2009.  
江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] Allen T J, Ogunlade O, Zhang E, et al. Large area laser scanning optical resolution photoacoustic microscopy using a fibre optic sensor[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(2): 650-660.
- [3] Liu J, Yuan L, Lei J, et al. Micro-cantilever-based fiber optic hydrophone fabricated by a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2459-2462.
- [4] Gao H C. Fiber optical spectral-domain white-light interferometry[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.  
高红春. 光谱域光纤白光干涉测量技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- [5] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [6] Jiang Y, Ding W H, Liang P J, et al. Phase-shifted white-light interferometry for the absolute measurement of fiber optic Mach-Zehnder interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3294-3299.
- [7] Zhu S, He T X, Fang C, et al. A new method of vibration phase measurement based on the laser interference wave demodulation[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(11): 20-22, 43.  
朱沙, 何天祥, 方超, 等. 激光干涉波形解调测量振动相位新方法[J]. 中国测试, 2015, 41(11): 20-22, 43.
- [8] Zumberge M A, Hatfield W, Wyatt F K. Measuring seafloor strain with an optical fiber interferometer[J]. Earth and Space Science, 2018, 5(8): 371-379.
- [9] Zong S Y, Wen X Y, Zhang D S. Mach-Zehnder interferometer based on fiber core mismatch and core-offset splicing for the simultaneous sensing of temperature and refractive index[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170607.  
宗书尧, 文晓艳, 张东生. 基于纤芯失配与错位熔接的光纤 Mach-Zehnder 温度折射率双参量传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170607.
- [10] Zhao L L, Liu B, Wu Y F, et al. Photonic crystal all-fiber Mach-Zehnder Interferometer sensor based on phase demodulation[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102059.
- [11] Zhang S, Jiang Y. Optical fiber high-temperature pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(1): 10-12, 70.  
张硕, 江毅. 一种光纤高温压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2018(1): 10-12, 70.
- [12] Acharya A, Kawade N. A fabry-perot interferometer-based fiber optic dynamic displacement sensor with an analog in-phase/quadrature generator[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 14764-14771.
- [13] He J, Wang L, Li F, et al. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3258-3265.
- [14] Xu F, Shi J H, Gong K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [15] Fischer B. Optical microphone hears ultrasound[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 356-358.
- [16] Wang Y P, Ni X Q, Wang M, et al. Demodulation of an optical fiber MEMS pressure sensor based on single bandpass microwave photonic filter[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 644-653.
- [17] Pinto A M R, Frazão 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.
- [18] Dahlem M, Santos J L, Ferreira L A, et al. Passive interrogation of low-finesse Fabry-Perot cavities using fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 990-992.
- [19] Song M J, Yu T K. Optical fiber phase demodulation algorithm based on  $3 \times 3$  coupler[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(5): 51-53.  
宋美杰, 于廷宽. 一种基于  $3 \times 3$  耦合器的光纤相位解调算法[J]. 光通信技术, 2019, 43(5): 51-53.
- [20] Chen F, Jiang Y, Jiang L.  $3 \times 3$  coupler based interferometric magnetic field sensor using a TbDyFe rod[J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2085-2090.
- [21] Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0606002.  
黄炳森, 高社成, 黄新成, 等. 高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0606002.
- [22] Shen S, Wei H M, Wang J, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.  
沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D 打印光纤法布里-珀罗腔

- 声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
- [23] Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. High-speed airflow measurement system based on optical fiber Fabry-Perot sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206005.  
王超, 张学智, 江俊峰, 等. 基于光纤法布里-珀罗传感的高速气流测量系统[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206005.
- [24] Zhang Y X. Research on the stability of quadrature point of fiber Fabry-Perot sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.  
张玉雪. 光纤 F-P 传感器正交工作点稳定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [25] Bo L H, Liao Y B, Zhang M, et al. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(9): 1324-1327.  
柏林厚, 廖延彪, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1324-1327.
- [26] Wang F Y, Xie J H, Hu Z L, et al. Interrogation of extrinsic Fabry-Perot sensors using path-matched differential interferometry and phase generated carrier technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2392-2397.
- [27] Zhang A L, Li D. Interferometric sensor with a PGC-AD-DSM demodulation algorithm insensitive to phase modulation depth and light intensity disturbance [J]. Applied Optics, 2018, 57(27): 7950-7955.
- [28] Brown D A. A symmetric  $3 \times 3$  coupler based demodulator for fiber optic interferometric sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1584: 328-335.
- [29] Jiang Y, Tang C J. Passive interrogation of an extrinsic Fabry-Pérot interferometer using a three-wavelength method[J]. Optical Engineering, 2009, 48(6): 064401.
- [30] Jia J S. Fiber optic interferometer based demodulation techniques and vibration/acoustic sensors[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020.  
贾景善. 光纤激光干涉测量技术及干涉型振动/声传感器的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2020.
- [31] Jiang Y, Tang C J, Guo G R. Note: phase compensation in the fiber optical quadrature passive demodulation scheme[J]. The Review of Scientific Instruments, 2010, 81(4): 046108.
- [32] Guo G R. A study on optical fiber vibration sensors for the safety monitoring of power generators[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.  
郭桂榕. 大型发电机安全监测光纤振动传感器的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- [33] Jiang Y, Guo G R. Phase compensation method of passive homodyne quadrature demodulation technology: 101713685A[P]. 2010-05-26.  
江毅, 郭桂榕. 一种无源零差正交解调技术的相位补偿方法: 101713685A[P]. 2010-05-26.
- [34] Jia J S, Jiang Y, Zhang L C, et al. Dual-wavelength DC compensation technique for the demodulation of EFPI fiber sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(15): 1380-1383.
- [35] Jia J S, Jiang Y, Gao H C, et al. Three-wavelength passive demodulation technique for the interrogation of EFPI sensors with arbitrary cavity length[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8890-8899.
- [36] Jiang Y, Jia J S, Jiang L, et al. Phase shifting demodulation method of optical fiber laser interference type sensor: 105865500A[P]. 2016-08-17.  
江毅, 贾景善, 姜澜, 等. 一种光纤激光干涉型传感器的移相解调法: 105865500A[P]. 2016-08-17.
- [37] Jia J S, Jiang Y, Cui Y. Phase demodulator for the measurement of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors with arbitrary initial cavity length[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3621-3626.
- [38] 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.