

文章编号: 0258-7025(2010)06-1413-08

# 光纤白光干涉测量术新进展

江 毅

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 与激光干涉测量技术相比, 光纤白光干涉(WLI)测量术一个最大的优势是能够绝对测量静态的物理参数。综述了近年来国内外在光谱域光纤白光干涉测量技术领域所做的研究工作, 重点阐述各种基于相位测量的光纤白光干涉测量法, 包括干涉级次法、傅里叶变换相位法、傅里叶变换相对测量法、波长扫描测量法和相移测量法。其目的是为了解决光谱获取问题、测量分辨率问题和自动测量问题, 实现光纤白光干涉测量技术的仪器化和工程化。

**关键词** 传感器; 白光干涉仪; 光谱仪; 傅里叶变换

**中图分类号** TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1413

## Progress in Fiber Optic White-Light Interferometry

Jiang Yi

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** Fiber optic white-light interferometry (WLI) possesses a considerable advantage with regard to the ability to provide absolute and unambiguous measurement, comparing to laser interferometry. The research on fiber optic white-light interferometry in recent years is reviewed in this paper, and fiber optic WLI based on phase measurement method is focused, including interference-order method, Fourier-transform WLI, Fourier-transform relative WLI, wavelength-scanning WLI, and phase-shifted WLI. The main problems, such as spectrum acquirement, measurement resolution and automatic measurement, are solved in the work in order to accelerate the technique in instrumentation and engineering application.

**Key words** sensors; white-light interferometry; spectrometer; Fourier transform

## 1 引 言

一般认为, 干涉测量术在所有物理传感器中具有较高的测量分辨率。在干涉型光纤传感技术中, 普通的光纤激光干涉测量术只能测量信号的变化量, 或者测量连续信号的变化, 即只能相对测量<sup>[1]</sup>。光纤白光干涉(WLI)测量术能够测量干涉仪两干涉臂的光程差, 因此可以测量静态量, 也可以断续测量(如关机后开机再测), 属于绝对测量。因而光纤白光干涉测量术在长度、距离、温度、压力、应变和折射率等物理量测量中较普通的光纤激光干涉测量术有明显的优势。因为这些参数都是静态量, 只能用绝对干涉测量技术测量。尽管激光干涉测量术有更高的测量分辨率, 但不能测量静态的信号。

本文综述了近年来国内外同行在光谱域光纤白

光干涉测量技术领域所做的研究工作, 从目前研究的现状和需求出发, 在讨论了光纤白光干涉测量技术面临的问题后, 介绍了一些相关的研究成果。希望能对相关的研究有所帮助, 促进我国光纤传感技术的发展和應用。

## 2 光纤白光干涉测量术的研究现状

传统上, 光纤白光干涉测量术需要一套机械装置来扫描光程, 在一个干涉仪(传感干涉仪)的光程差为零, 或两个干涉仪(传感干涉仪和补偿干涉仪)的光程差相等时出现干涉条纹最大值<sup>[2]</sup>。但这种技术明显的缺点是精度低、测量速度慢、体积大和可靠性差。这种测量手段一般的分辨率是几个微米, 最好能够达到零点几个微米的分辨率, 这主要受机械

收稿日期: 2010-03-08; 收到修改稿日期: 2010-04-12

基金项目: 国家 863 计划(2008AA04Z406)和教育部新世纪优秀人才计划资助课题。

作者简介: 江毅(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感器、光纤测量仪和光无源器件等方面的研究。

E-mail: bitjy@bit.edu.cn

扫描装置的分辨率和机械扫描时振动影响的限制。如文献[2]中使用机械扫描来完成扫描镜的位移技术,位移扫描的分辨率达到  $0.54 \mu\text{m}$ 。

通过光谱来测量干涉仪光程差称为光谱域白光干涉术,即用宽带光源,如宽带的发光二极管(LED)、超辐射发光二极管(SLD)、光纤放大自发辐射(ASE)光源等注入干涉仪,通过测量干涉仪的输出光谱,就可以测量出干涉仪的光程差。这一技术最显著的优点是系统中没有机械扫描装置,稳定性、可靠性有了极大的提高。测量所用的标准公式为<sup>[3,4]</sup>

$$d = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{2\pi(\lambda_2 - \lambda_1)n} \cdot \Delta\varphi, \quad (1)$$

式中  $n$  为介质的折射率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为光谱中的 2 个波长,  $\Delta\varphi$  为光波长从  $\lambda_1$  变化到  $\lambda_2$  时,干涉条纹的相位变化。因此,直接测量光谱中两相邻峰(相位相差  $2\pi$ )的波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 就可以得到干涉仪的绝对光程差

$$d = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{n(\lambda_2 - \lambda_1)}. \quad (2)$$

这种方法实际上是通过确定白光光谱中相位相差  $2\pi$  的 2 个波长来测量干涉仪的光程差,这一方法得到了广泛的应用。但这一方法受光强、损耗等因素的影响,需要人工干预,不便于自动测量,此外还存在如下 2 个问题:

1) 光谱域白光干涉术首先需要解决的问题是如何获取光谱。用商用的光谱仪是一种最直接的方法<sup>[5,6]</sup>,但一般商用的光谱仪体积大,价格昂贵,不便于仪器化,一般只能用于实验室中。另外一种获取光谱的技术是用平板光栅衍射或楔块 Fizeau 干涉仪相关后投射到 CCD 阵列上,用 CCD 阵列来采集光谱<sup>[7,8]</sup>。基于 CCD 阵列的光谱仪可以放入测量仪器内部,便于工程化应用。但由于 CCD 的响应波长一般小于  $1.1 \mu\text{m}$ ,与目前主流光纤系统的工作波长 ( $1.55 \mu\text{m}$ ,  $1.31 \mu\text{m}$ ) 不合,而  $1.55 \mu\text{m}$  的红外 CCD 比较昂贵。并且使用 CCD 光谱仪的另外两个问题是 CCD 光谱仪的测量分辨率不高(主要受 CCD 像元的空间距离和 CCD 像元数的限制),也不便于空分复用多个干涉仪(一般需要用光开关来切换)。

2) 光谱域白光干涉术的另外一个问题是不能准确地测量出光谱中峰值位置的波长。在获取干涉仪的白光光谱后,由于光谱成正弦分布,峰值位置的光功率变化率为零,在确定峰值位置的波长时,存在着很大的随机性,从而大大降低了波长测量的分辨

率。很显然,必须清楚,光谱测量的分辨率为  $1 \mu\text{m}$  并不意味着测量条纹峰的分辨率也是  $1 \mu\text{m}$ 。例如,在测量长度为  $3000 \mu\text{m}$  的距离时,条纹峰值位置波长测量分辨率为  $8 \mu\text{m}$ ,应用(1)式实际得到的长度测量分辨率为  $25 \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。

另外一种光谱域白光干涉测量法是测量白光光谱中某一干涉输出峰的波长随被测量的变化<sup>[10,11]</sup>,虽然可以达到较高的测量分辨率,但测量距离的变化限于  $\lambda/2$ (即  $2\pi$ )以内,实际上是一种相对测量术。

光谱域白光干涉频率分析法是将白光光谱傅里叶变换后,由一级谱的中心位置确定干涉光谱的平均条纹间隔,从而测得干涉仪的光程差<sup>[12~14]</sup>。但由于频率谱上  $1 \text{ Hz}$  对应了几十微米的空间距离,因此测量分辨率较低(如空间距离  $2300 \mu\text{m}$  所采集的光谱在傅里叶变换后的主频为  $77 \text{ Hz}$ ,空频域上  $1 \text{ Hz}$  对应空间域上约  $30 \mu\text{m}$ )。

下面的讨论主要集中在解决这些关键技术问题所做的研究工作,主要体现在光谱获取和光谱信号的分析两个方面。

### 3 光谱获取技术

光谱域白光干涉测量技术首先面临的问题是光谱的获取。光纤 Fabry-Pérot 可调谐滤波器(FFP-TF)技术的发展,使得光谱获取技术变得小巧,可以仪器化。例如线宽  $0.12 \text{ nm}$  的 FFP-TF,在  $1550 \text{ nm}$  上对应的相干长度为  $20 \text{ mm}$ ,即能够测量干涉仪的最大光程差为  $20 \text{ mm}$ 。以之为基础开发的可调谐光纤激光器的输出功率超过  $10 \text{ mW}$ ,线宽小于  $1 \text{ pm}$ ,对应的相干长度超过  $2.4 \text{ m}$ ,不仅可以测量非常大的光程差,而且由于输出功率高还便于空分复用多路传感光纤。

图 1 是三种传感方案中获取白光光谱的原理图,分别是外腔式 Fabry-Pérot 干涉仪(EFPI)结构[图 1(a)],Mach-Zehnder 干涉仪结构[图 1(b)]和 Michelson 干涉仪结构[图 1(c)]。光源为宽带掺铒光纤 ASE,经过 FFP-TF 后,变为窄带的波长扫描光,经耦合器分光后注入干涉仪。干涉仪输出经光电二极管(PIN)探测后由 A/D 卡采集输入计算机。由于 FFP-TF 存在非常大的非线性,且重复性差,因此部分波长扫描光经耦合器分光后进入由标准具和光纤光栅(FBG)组成的波长校正器,对光源的输出波长进行校正。文献[9]详细介绍了这种波长获取技术。这种波长获取技术不仅小巧,便于仪器化和多路空分复用,而且能够获得等时间间隔(采样间

隔)、等波长间隔的光谱,这样的一维数据组对于后续的数据处理,如傅里叶变换,非常方便。图 2 比较了用光谱仪(OSA)和用图 1(b)所示方法采集到的

全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的光谱。由图可见两个光谱基本一样,但条纹的对比度不同,这是由于在移动干涉仪的过程中,干涉仪的偏振态发生了改变。

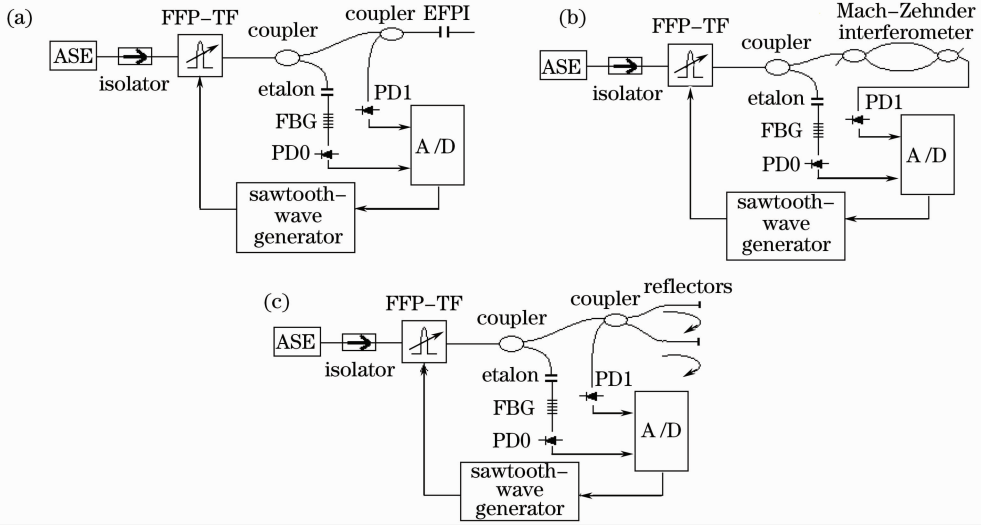


图 1 光纤白光干涉测量系统。(a) EFPI 结构; (b) Mach-Zehnder 结构; (c) Michelson 结构  
Fig. 1 Configurations of white-light interferometry. (a) extrinsic Fabry-Pérot interferometer; (b) Mach-Zehnder interferometer; (c) Michelson interferometer

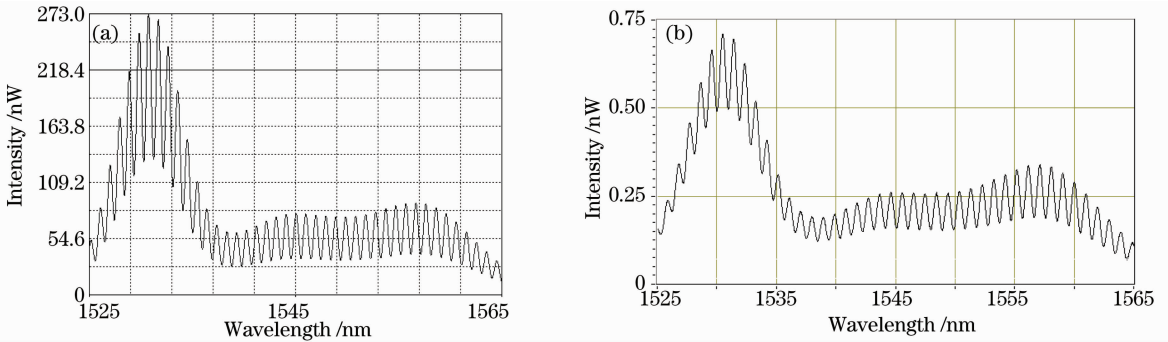


图 2 白光干涉光谱。(a)光谱仪 AQ6317C 采集;(b)扫描 FFP-TF 方案采集

Fig. 2 White-light optical spectrum. (a) obtained by an OSA AQ6317C; (b) obtained by the FFP-TF scanning

#### 4 双波长干涉级次白光干涉测量术

在白光光谱中,一个峰的波长移动随光程差的变化非常敏感,可以通过测量某一个峰的波长移动作为高灵敏度的传感器,尤其应用在光程差很小、相邻峰间的波长间隔较大<sup>[15]</sup>的测量中。但很显然,在光程差变化  $\lambda/2$  时,相位变化  $2\pi$ ,该峰就会移动到相邻的峰的波长位置,因此这样测量的动态范围仅有  $\lambda/2$ 。可以用计算干涉级次的方法,先粗略计算出干涉级次,再计算出腔长,能够在高分辨率测量的同时实现大的动态范围测量。其计算公式为<sup>[16,17]</sup>

$$d = \frac{1}{2} \text{Int} \left[ \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \cdot \lambda_1. \quad (3)$$

(3)式中取整的部分实际上就是计算干涉级次。这一方法同样需要测量正弦信号的峰值波长,但是如果干涉条纹有很高的锐度,就可以精确地测量出光谱中峰的波长。作者在光纤端面制作微透镜的方法,做成了高精度 EFPI 传感器<sup>[16]</sup>。图 3(a)是高精度 EFPI 传感器的透射光谱,图 3(b)是连续测量时腔长随温度变化的漂移。可见测量腔长变化的分辨率达到了 1 nm。但是这种计算干涉级次的方法在相位为  $2\pi$  的整数倍位置上不能判断干涉级次是在上一级还是在下一级,测量光程差可能出现  $\lambda/2$  的跳跃。

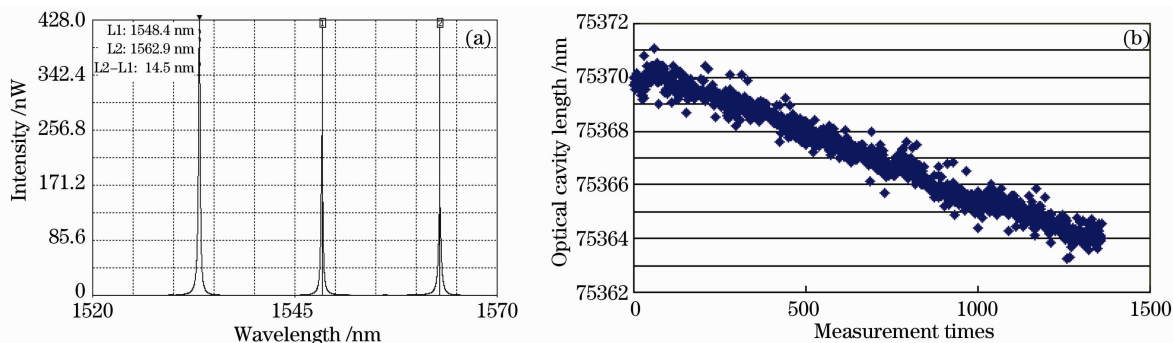


图3 (a)高精度EFPI的透射光谱;(b)连续测量时腔长随温度变化的漂移

Fig. 3 (a) Transmission spectrum of a high-finesse EFPI; (b) continuous test of the optical cavity length

## 5 傅里叶变换白光干涉测量术

在(1)式中,已知  $\Delta\varphi = 2\pi$ , 然后找到相位相差  $2\pi$  的两个峰的波长, 就可以求出干涉仪的绝对光程差。但正如前面所述, 在确定峰值波长时存在着很大的随机性, 限制了测量的分辨率。反向思维, 在(1)式中, 如果精确地确定两个波长  $\lambda_1, \lambda_2$ , 而计算出从  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  的相位变化, 也可以计算出干涉仪的绝对光程差。因此提出傅里叶变换白光干涉测量术<sup>[18]</sup>, 其工作原理是: 对采集到的光谱数组序列做快速傅里叶变换(FFT), 滤波, 提取主频再反FFT后, 做对数运算, 取其虚部做相位反包裹运算, 获得相位再由(1)式得到干涉仪的光程差。由于标准具的光谱具有非常高的锐度, 因此可以精确地确定扫描的初始波长  $\lambda_1$  和终止波长  $\lambda_2$ , 从而达到很高的测量分辨率, 目前已经达到了纳米量级的测量分辨率。

傅里叶变换白光干涉测量术的数学描述如下。白光光谱可以写为

$$g(\lambda) = a(\lambda) + c(\lambda) \cos(2\pi f_0 \lambda + \pi), \quad (4)$$

式中  $a(\lambda)$  为直流分量,  $c(\lambda)$  为条纹对比度,  $f_0$  为信号的主频, 可表示为

$$f_0 = \frac{d}{\lambda^2}, \quad (5)$$

做傅里叶变换后, (4)式的频谱写为

$$G(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*(f + f_0), \quad (6)$$

对频谱中的主频滤波, 相当于提取出(6)式中的  $C(f - f_0)$  项, 再对  $C(f - f_0)$  做反傅里叶变换, 得到

$$h(\lambda) = -\frac{1}{2}c(\lambda) \exp(j2\pi f_0 \lambda), \quad (7)$$

对(7)式求对数, 再取虚部, 就可以获得相位信息

$$\varphi(\lambda) = 2\pi f_0 \lambda = \frac{2\pi d}{\lambda}, \quad (8)$$

(8)式中光程差  $d$  携带在相位中, 因此解调出相位  $\varphi(\lambda)$  后, 便可以直接求出  $d$ 。图4是实际测量波长从

1525.139~1565.491 nm 的一个腔长为  $2298.7 \mu\text{m}$  的EFPI输出相位变化。

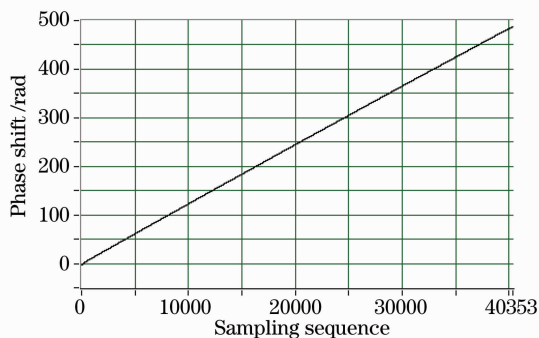


图4 傅里叶变换白光干涉测量术输出相位随采样顺序(即波长)的变化曲线

Fig. 4 Phase of Fourier transform WLI output changed with the sampling index (i. e. wavelength)

傅里叶变换白光干涉测量术一个很大的优势就是可以制作高精度空域频分复用传感器<sup>[19]</sup>。只要各个传感器间光程差的间距足够大(如大于  $300 \mu\text{m}$ ), 每个光谱在傅里叶变换后的频谱就可以分得足够开, 将它们分别滤出, 再计算出每个干涉仪由于输入光源的波长从初始波长  $\lambda_1$  和终止波长  $\lambda_2$  扫描所产生的相位变化, 就可以分别求出每个干涉仪的绝对光程差。图5(a)是2个腔长为  $1007 \mu\text{m}$  和  $3000 \mu\text{m}$  的EFPI传感器通过一个3 dB耦合器并联连接到图1(a)中采集得到的白光光谱, 图中的横坐标是采样序列, 实际上也是波长, 因为采样间隔为  $1 \text{ pm}$ 。将白光光谱傅里叶变换后得到的频谱如图5(b)所示, 两个频率成分分别由两个EFPI的光程差所决定。分别滤波后, 计算相位, 即可解调出每个干涉仪由于波长扫描所产生的相位变化。以前的空域频分复用技术是探测傅里叶变换后主频的频率移动<sup>[20]</sup>, 测量灵敏度较低; 基于相位测量技术的空域

分复用技术能够达到很高的测量灵敏度,但由于需要滤波,要求各个主频成分间有足够的间隔,及各个

传感器间的光程差的间距要足够大,才能有效地滤出每一个频率成分。

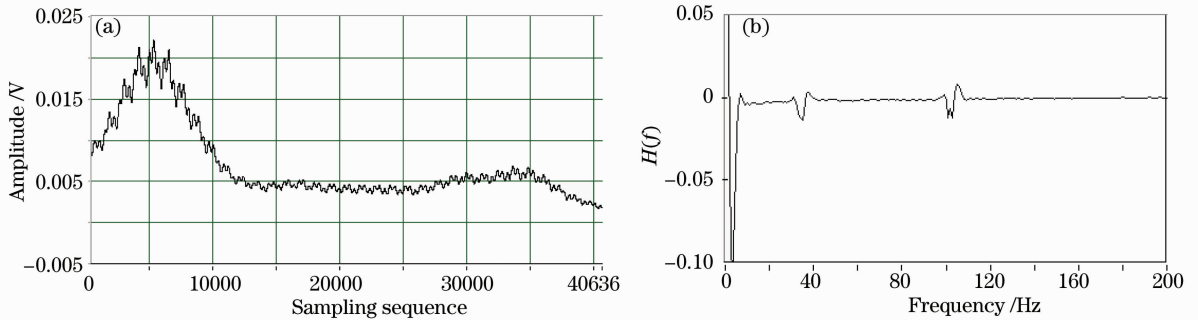


图 5 两个 EFPI 传感器的空频分复用。(a) 白光光谱;(b) 光谱傅里叶变换后的频谱

Fig. 5 Spatially multiplexed of two EFPIs. (a) white-light optical spectrum of two EFPIs; (b) Fourier spectrum of the optical spectrum

## 6 傅里叶变换白光干涉相对测量法

利用相位测量技术还可以直接获得两个信号间的相位差。如在传感器的起始位置采集一次白光光谱,作为参考点,后面进行测量时所采集的光谱与初始光谱进行相位比较,获得两路信号间的相位差,就可以得到开始测量后被测量的变化<sup>[21]</sup>。还可以将一个传感器作为参考,感受公共的干扰,如温度和测量系统的随机波动,而另外一个传感器测量出被测量,计算两个传感器间的相位差的变化,就可以在测量出被测量的同时,去除其他外界扰动对测量的影响<sup>[22]</sup>。

图 6 是一个相对测量的实际结果。两个光程相差  $57.1 \mu\text{m}$  的干涉仪同时放置在半导体制冷器上,改变制冷器的温度,这两个干涉仪的光程差几乎没有变化。每个温度点测量 100 次再取平均值后,测量结果波动限制在  $1 \text{ nm}$  范围内,可见达到了非常高的测量分辨率,同时克服了外界温度对测量的影响。

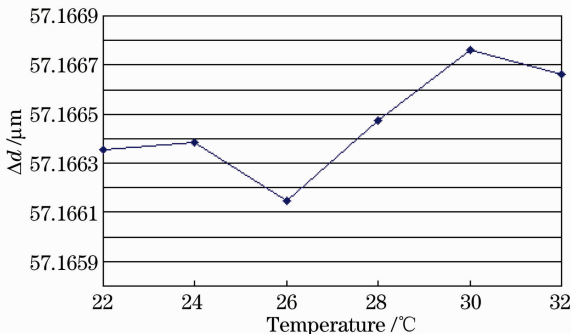


图 6 用傅里叶变换相对测量法去除温度对测量结果的影响

Fig. 6 A result of the relative Fourier transform WLI in which the temperature influence is removed

相对测量法还可以直接测量出光纤耦合器各输出端的相位差<sup>[23]</sup>。例如  $3 \times 3$  耦合器存在着严重的不对称性,这种不对称性会引起测量误差,甚至导致解调信号畸变。若能得到耦合器的输出相位关系,则可以补偿掉耦合器不对称引入的相位误差。

## 7 波长扫描白光干涉测量术

利用全光纤结构的  $3 \times 3$  耦合器构成的光纤干涉仪可以直接将波长扫描所引起的相位变化解调出来,就构成波长扫描白光干涉测量术<sup>[24]</sup>。其测量系统如图 7(a)所示,与傅里叶方法不同的是,这个系统中需要同时获取 3 路白光干涉信号,输出的 3 路信号互成  $120^{\circ}$  的相位差,图 7(b)是其中 2 路信号的李萨如图,非常明显地显示了  $120^{\circ}$  的相位关系,但由于 ASE 光源轮廓不平坦,所以椭圆呈现不同大小。3 路干涉白光光谱可以写为

$$I_k = a(\lambda) + c(\lambda) \cos \left[ \varphi - (k-2) \frac{2\pi}{3} \right], \quad (k = 1, 2, 3) \quad (9)$$

信号解调采用对称解调技术,其原理如图 8 所示,这种解调不需要做傅里叶变换,而且可以用硬件实现,因此可以满足高频率测量的要求。图 9 是波长扫描白光干涉测量术与傅里叶变换白光干涉测量术测量结果的比较,由图可见两种方法的解调结果完全一样。

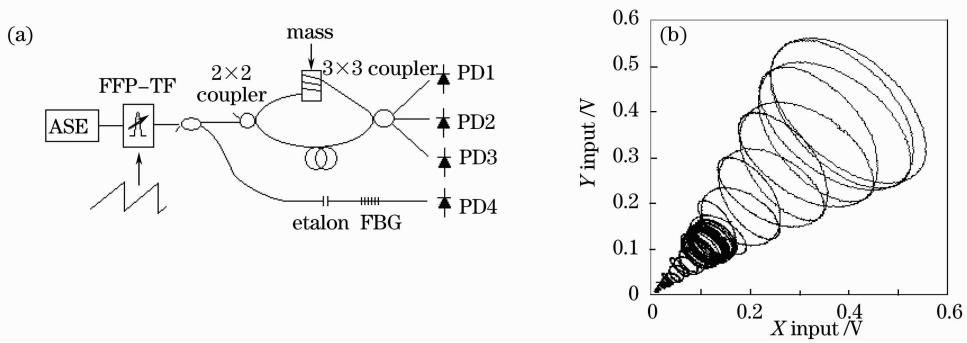


图 7 波长扫描白光干涉测量术。(a)测量原理;(b)李萨如图

Fig. 7 Wavelength scanning WLI. (a) schematic of measurement principle; (b) Lissajous plot

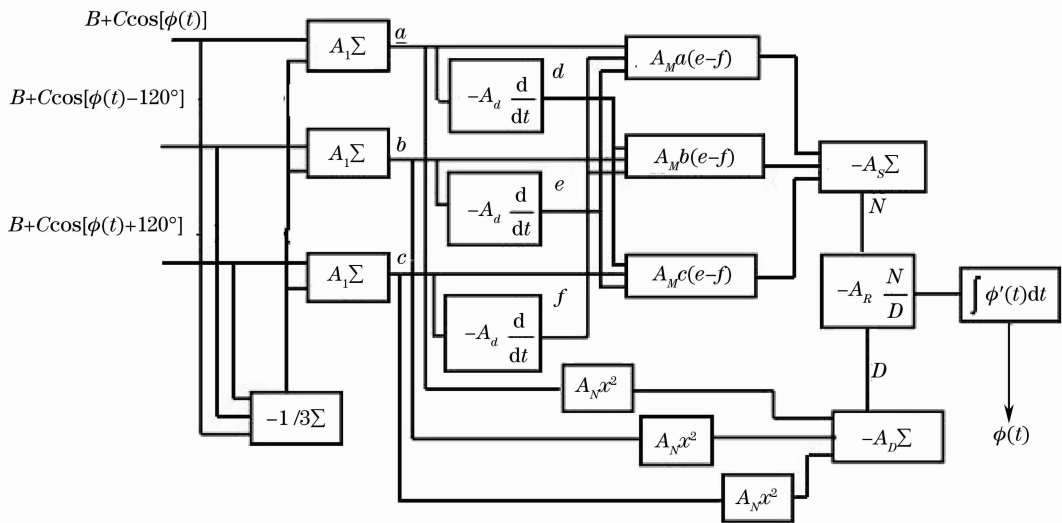


图 8 对称解调原理

Fig. 8 Principle of symmetrical demodulation

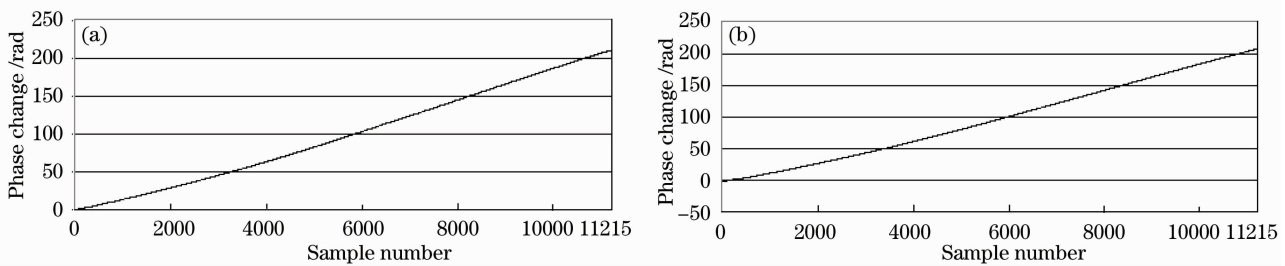


图 9 测量相位的比较。(a)波长移动白光干涉术;(b)傅里叶变换白光干涉术

Fig. 9 A comparison of the measurement phase. (a) wavelength-shifted WLI; (b) Fourier transform WLI

### 8 相移光纤白光干涉测量术

相移光纤白光干涉测量术的测量系统与波长移动白光干涉测量术一样,只是利用了移相的原理来解调相位的变化。(9)式是 3 路相位相差 120°的信号,可以看成是一路信号移相 120°得到第 2 路信号,再移相 120°得到第 3 路信号,因此相位可以解调为

$$\varphi = \arctan\left(-\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right). \quad (10)$$

另外,还可以由公式构筑出一对正交的信号,即

$$g_1 = -\frac{I_1 - I_3}{\sqrt{3}} = c(\lambda) \sin \varphi, \quad (11)$$

$$g_2 = \frac{2I_2 - I_1 - I_3}{3} = c(\lambda) \cos \varphi. \quad (12)$$

再用正交相位解调法就可以解调出相位。图 10 是由 3 路白光光谱构造出的 2 路正交信号的李萨如图, 两路信号的相位差是  $90^\circ$ 。图 11 是两种相移白光干涉测量术解调得到的相位变化与傅里叶变换白光干涉测量法得到的结果比较, 3 种方法的测量结果完全重叠在一起, 说明得到了完全相同的结果。

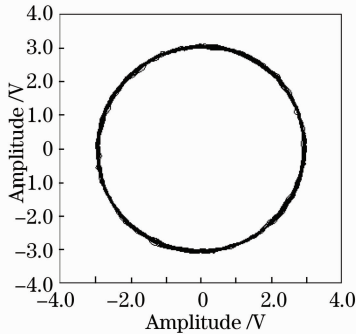


图 10 由 3 路白光光谱构造出的 2 路正交信号的李萨如图

Fig. 10 Lissajous plot of two signals constructed with three interferometric white-light spectra

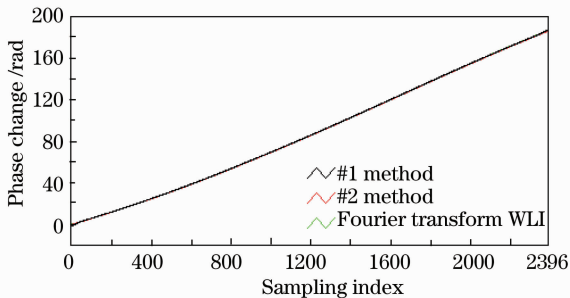


图 11 两种相移白光干涉测量术解调得到的相位变化与傅里叶变换白光干涉测量法得到结果的比较

Fig. 11 A comparison of the phase between two kinds of phase-shifted WLI and Fourier transform WLI

## 9 结 论

应用光谱域光纤白光干涉测量术需要注意的是, 干涉仪的光程差必须小于光源的相干长度, 否则得不到白光光谱。图 1 中, 光源的相干长度由 FFP-TF 的线宽决定, 也可以用 FFP-TF 构成窄线宽的可调谐光纤激光器, 获得功率高、相干长度大的波长扫描光源。白光干涉光谱的条纹对比度由 2 个因数限制——相干涉的两束光的功率比和偏振态。对于 EFPI 传感器, 没有偏振态的问题, 但光程差超过  $500 \mu\text{m}$  后, 传感光束的功率一般要远小于参考光束, 需要提高传感端面的反射率。对于全光纤双光束干涉仪, 一般两路干涉光的功率可以保证相近, 但偏振态的影响严重, 可以通过调整一个干涉臂的偏

振态, 获得高对比度白光干涉光谱条纹。傅里叶相位分析法的一个优势是在条纹对比度很小时也可以准确地提取出相位信息。

白光干涉测量技术除了用于测量长度一类的物理量外, 还是测量光纤色散的有力工具, 如保偏光纤的双折射色散<sup>[25]</sup>和微结构光纤的色散<sup>[26]</sup>等。但目前主要使用机械扫描方式的白光干涉测量术。应用光谱域光纤白光干涉测量技术, 可以非常简单地精密测量出光纤中的各种色散, 同时光谱域光纤白光干涉测量技术也是测量光学相位的有力工具, 文献<sup>[23]</sup>就是一个光学相位测量的很好例子。光谱域光纤白光干涉测量技术也可能应用到光学相干成像 (OCT) 上, 不再需要纵向光学扫描, 能极大地提高检测效率。

本文系统性地综述了近年来在光纤光谱域白光干涉传感领域所做的研究工作, 在分析目前技术的基础上, 重点阐述了各种基于相位测量的白光干涉测量法, 其目的是为了实现白光干涉测量技术的仪器化和工程化, 主要解决光谱获取问题、测量分辨率问题和自动测量问题。希望这些研究成果能对国内同行有所帮助, 促进我国光纤传感技术事业的发展。

## 参 考 文 献

- Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728
- 葛 强, 徐长春, 吴许强 等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728
- Libo Yuan. Multiplexed white light interferometric fiber optic sensor matrix using a long cavity Fabry-Pérot resonator [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4460~4466
- Jiang Yi. *Advanced Fiber Optic Sensing Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2009. 206
- 江 毅. *高级光纤传感技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 206
- Rao Yunjiang, Li Hong, Zhu Tao *et al.*. High temperature strain sensor based on in-line Fabry-Pérot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1484~1492
- 饶云江, 黎 宏, 朱 涛 等. 基于空芯光子晶体光纤的法-珀干涉式高温应变传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1484~1492
- Y. J. Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 227~237
- Li Kun, Wen Hongqiao, Li Hui. A study on miniature interferometer strain sensor based on EFPI [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3282~3285
- 李 坤, 文泓桥, 李 慧. 光纤法布里-珀罗结构的微型应变传感器的研制[J]. *光学学报*, 2006, **29**(12): 3282~3285
- J. S. Leung, A. Asundi. Real-time cure monitoring of smart composite material using extrinsic Fabry-Pérot interferometer and fiber Bragg grating sensors [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2002, **11**(2): 249~255
- Y. Zhu, Z. Huang, F. Shen *et al.*. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements

- [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 711~713
- 9 Yi Jiang. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors by peak-to-peak method[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(6): 925~932
- 10 V. Bhatia, K. A. Murphy, R. O. Claus *et al.*. Recent developments in optical-fiber-based extrinsic Fabry-Pérot interferometric strain sensing technology [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1995, **4**(4): 246~251
- 11 Rao Yunjiang, Deng Ming, Zhu Tao. Visibility-enhanced in-line Fabry-Pérot interferometers by the use of femtosecond lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1459~1462  
饶云江, 邓明, 朱涛. 飞秒激光加工的高对比度法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1459~1462
- 12 T. Liu, M. Wu, Y. J. Rao *et al.*. A multiplexed optical fibre-based extrinsic Fabry-Pérot sensor system for in-situ strain monitoring in composites [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1998, **7**(4): 550~556
- 13 Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Demodulation of the optical fiber Fabry-Pérot sensor based on Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186~189  
章鹏, 朱永, 唐晓初等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 186~189
- 14 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Pérot multiplexing system [J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(10): 1353~1357  
唐庆涛, 饶云江, 朱涛等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1353~1357
- 15 V. Bhatia, M. B. Sen, K. A. Murphy *et al.*. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(3): 247~249
- 16 Y. Jiang, C. J. Tang. High-finesse micro-lens fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2008, **17**(5): 055013
- 17 B. Qi, G. R. Pickrell, P. Zhang *et al.*. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer [J]. *Opt. Eng.*, **42**(11): 3165~3171
- 18 Yi Jiang. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **30**(2): 75~77
- 19 Y. Jiang, C. J. Tang. Fourier transform white-light interferometry based spatial frequency-division multiplexing of extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**: 106105
- 20 T. Liu, G. F. Fernando. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Pérot sensor system for strain and displacement measurements [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2000, **71**(3): 1275~1278
- 21 Y. Jiang. Fourier-transform phase comparator for the measurement of extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors[J]. *Microwave and Optics Technology Letters*, 2008, **50**(10): 2621~2625
- 22 Y. Jiang, C. J. Tang. High-resolution interrogation technique for the measurement of extrinsic Fabry-Pérot interferometer (EFPI) using a compensating EFPI[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2008, **19**(6): 065304
- 23 Yi Jiang, Pengjuan Liang, Tianfu Jiang. Direct measurement of optical phase difference in a 3×3 fiber coupler [J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, **16**(3): 135~139
- 24 Yi Jiang. Wavelength-scanning white-light interferometry with a 3×3 coupler-based interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1869~1871
- 25 F. Tang, X. Z. Wang, Y. M. Zhang *et al.*. Characterization of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers by use of white-light interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4073~4080
- 26 Q. Ye, C. Xu, X. Liu *et al.*. Dispersion measurement of tapered air-silica microstructure fiber by white-light interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4467~4470