

文章编号: 1005-5630(2011)01-0001-05

## 非平衡光纤干涉仪臂差精确测量方法研究\*

于 洋, 王建飞, 张学亮, 孟 洲

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为实现对光纤干涉仪臂差的精确测量, 提出了一种采用基于 F-P 调谐滤波技术的光纤光栅解调系统来精确测量光纤干涉仪臂长差的方法。简要介绍了 F-P 调谐滤波法的波长解调原理, 通过分析非平衡迈克尔逊干涉仪的工作原理, 指出了输出干涉谱与臂差之间的关系, 进而分析了光纤光栅解调仪对干涉仪臂差进行精确测量原理。实验表明该方法可以实现对干涉仪臂差的精确测量, 测量精度可达到  $2\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 光纤光栅; 解调; 干涉仪臂差

**中图分类号:** TN 253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2011.01.001

### Study on precise measurement of optical path difference of unbalanced optical fiber interferometer

YU Yang, WANG Jianfei, ZHANG Xueliang, MENG Zhou

(College of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A precise measurement of optical path difference of optical fiber interferometer is proposed which is based on the fiber Bragg grating demodulation system using Fabry-Perot filtering technology. The principle of Fabry-Perot filtering technology is introduced. By analyzing the principle of unbalanced Michelson's interferometer, the relationship of interferential spectrum and arm length differences are indicated, and the principle of precise measurement of arm length differences by fiber Bragg grating demodulation system are analyzed. The experiment demonstrates that the arm length differences can be measured with a accuracy of  $2\mu\text{m}$ .

**Key words:** fiber Bragg grating; demodulation; interferometer arm length differences

## 引 言

光纤 Michelson 干涉仪和 Mach-Zehnder 干涉仪在光纤传感和光纤通讯等领域应用广泛, 作为传感元件可以实现对水声、电流、磁场等物理量的传感监测<sup>[1-5]</sup>; 而作为功能器件可以解调光纤光栅和布里渊频移, 实现激光器调 Q 等<sup>[6-8]</sup>。光纤干涉仪一般可以设计成平衡(零臂差)式和非平衡式两种结构。由于光纤干涉的臂差对传感系统相位噪声、传感灵敏度、解调分辨力、光谱通道间隔等参量有直接影响, 因此在研制光纤干涉仪时, 干涉仪臂长差的精确测量与控制都非常重要。为实现对光纤干涉仪臂差的精确测

\* 收稿日期: 2010-07-25

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0925)

作者简介: 于 洋(1984-), 男, 吉林省公主岭市人, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。

量,国内外都有学者展开了相关研究。1983年,Dandridge 提出用电流调制光源和干涉条纹可见度的方法来测量干涉仪臂差,但该技术复杂<sup>[9]</sup>;近些年国内有学者提出了基于光相干域反射技术来测量干涉仪臂差的方法,测量精度可达到  $10\mu\text{m}$ <sup>[10,11]</sup>;而余有龙提出利用光谱仪观测干涉仪干涉谱的方法也获得了  $20\mu\text{m}$  的测量精度<sup>[12]</sup>。

文中提出了一种采用基于 F-P 调谐滤波技术的光纤光栅波长解调系统来精确测量光纤干涉仪臂长差的方法。由于可调谐 Fabry-Perot 腔(F-P 腔)可以实现光谱扫描滤波功能,因此可以用可调谐 F-P 腔观测干涉仪的干涉谱,通过干涉谱与臂差之间的关系便可测量出干涉仪臂差。采用基于 F-P 调谐滤波技术的光纤光栅解调仪来测量光纤干涉仪臂差,实验表明该方法可以实现对干涉仪臂差的精确测量,测量精度可达到  $2\mu\text{m}$ 。该方法拓展了光纤光栅解调仪的应用领域,使之代替价格昂贵、体积庞大的光谱仪来简单、快速地测量干涉仪臂差。

## 1 原 理

### 1.1 可调谐 F-P 腔滤波 FBG 解调原理<sup>[12-14]</sup>

可调谐 F-P 腔结构如图 1 所示:

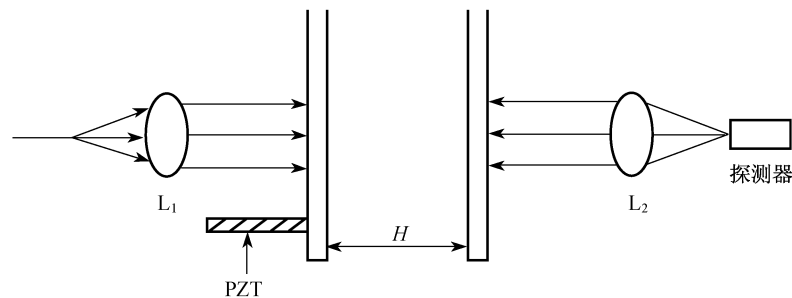


图 1 可调谐 F-P 腔结构图

Fig. 1 Structure plan of Tunable F-P

F-P 腔可以作为一个窄带滤波器,在一定波长范围内,若以平行光入射到 F-P 腔,则只有满足相干条件的某些特定波长的光才发生干涉,产生相干极大。利用 F-P 腔的这个特点可以对 FBG 传感器的反射波长进行检测。如图 2 所示,用锯齿波驱动可调谐 F-P 腔来进行波长的线性调谐,从而扫描传感 FBG 反射谱,调谐至 FBG 反射峰值波长时,在探测器处接收的反射信号光强最大,则由电压和波长关系可得到传感光纤布拉格光栅的中心反射波长。该系统适于测量静态或准静态参量。用该系统扫描光纤干涉仪的干涉信号

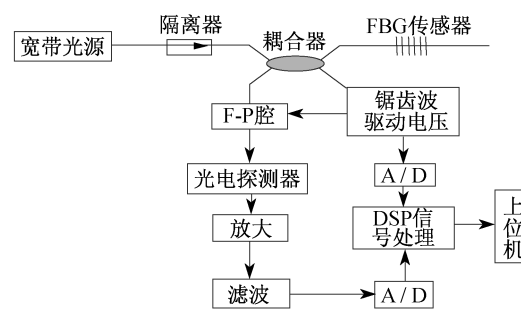


图 2 可调谐 F-P 腔滤波解调原理示意图

Fig. 2 Principle of demodulation with the F-P filter

时,即将图 2 中 FBG 传感器换成光纤干涉仪,可调谐 F-P 腔在锯齿波驱动电压线性调谐下,会产生相应的输出光谱。F-P 腔输出光进入干涉仪再反射回形成干涉信号,干涉仪干涉信号光经自聚焦透镜  $L_1$  会变成平行光入射到 F-P 腔,出射光再经自聚焦透镜  $L_2$  汇聚到探测器上,便可将输入干涉仪特定光波长的干涉信号探测出来,因此 F-P 腔在驱动电压线性调谐下便可扫描出干涉仪的干涉谱。

### 1.2 光纤干涉仪臂差测量原理

根据光纤干涉仪工作原理可知,非平衡光纤 Michelson 干涉仪两臂的相位差  $\Delta\phi$  可表示为:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n_{\text{eff}} \Delta L}{\lambda} \quad (1)$$

其中  $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率,  $\Delta L$  为干涉仪臂差,  $\lambda$  为光波波长。而干涉仪输出的归一化光强  $I$  可表示为:

$$I = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2)$$

因此干涉仪输出光功率是波长的函数。当  $\Delta\phi$  为  $2\pi$  整数倍时, 输出光功率最小, 相邻最小值(谷值)对应的波长间隔为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\Delta L n_{\text{eff}}} \quad (3)$$

其中  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ , 对于光纤 Mach-Zehnder 干涉仪也可以得到类似的关系式。可见确定相邻最小光功率对应的波长差便可确定干涉仪臂差, 而该波长间隔可以由可调谐 F-P 腔光谱扫描滤波得到, 因此采用基于 F-P 调谐滤波技术的光纤光栅解调仪可以实现对光纤干涉仪臂长差的精确测量。图 3 为 FBG 解调仪测光纤 Michelson 干涉仪臂差示意图, 若测量 Mach-Zehnder 干涉仪臂差, 将干涉仪输入光路和输出光路分别与两个解调光路端口相连即可, 实验所用光纤光栅解调仪有四路信号解调端口, 图中微动控制台用于改变干涉仪臂差, 以验证解调仪测量干涉仪臂差的精确性。

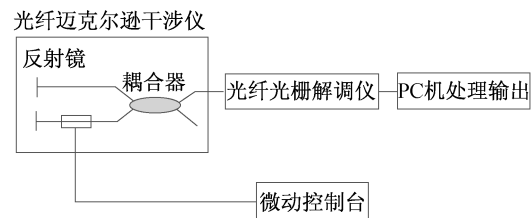


图3 FBG解调仪测光纤 Michelson 干涉仪臂差示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of measuring optical path difference of optical fiber Michelson interferometer by FBG demodulation system

考虑到光纤在拉伸过程中会出现弹光效应, 所引起纤芯折射率发生的变化  $\Delta n$  为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta n = -\frac{n_{\text{eff}}^3}{2}\epsilon_i[(1-\mu)p_{12} - \mu p_{11}] \quad (4)$$

式(4)中,  $\epsilon_i = \Delta l/l$  为轴向应变变量,  $l$  为拉伸段光线长度,  $\Delta l$  为拉伸量,  $\mu$  为石英光纤泊松比,  $p_{11}$ 、 $p_{12}$  为石英光纤的弹光系数。这样对于光纤 Michelson 干涉仪, 在拉伸光纤过程中相邻最小光功率对应的波长差可修正为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2[n_{\text{eff}}\Delta l_i + (l + \Delta l)\Delta n]} \quad (5)$$

## 2 试验结果及分析

如图 4 所示, 实验系统所用干涉仪为非平衡全光纤迈克尔逊干涉仪, 干涉仪两臂平群长度约为 30cm。系统所用光纤光栅解调仪为 MICRON OPTICS 公司生产的 sm125 型光纤光栅解调仪, 该解调仪波长测量精度为 1pm。干涉仪短臂局部被固定在微动控制台上, 用于调节干涉仪的臂差。固定在微动控制台上被拉伸的光纤长度为  $l = 20.56\text{mm}$ , 微动控制台的最小步进长度为  $0.1\mu\text{m}$ 。

光纤光栅解调仪测得的迈克尔逊干涉仪输出谱如图 5 所示, 图 6 为干涉仪输出谱的局部拓展图。实验所用的光纤光栅解调仪波长扫描范围为 80nm, 因此图 5 所示干涉谱十分密集, 实际测量中可以只观测 0.5nm 波长范围, 便可精确读出输出谷值功率对应的波长。

在自由状态下, 通过观测图 6 中两相邻谷值对应的波长, 考虑  $n_{\text{eff}} = 1.4489$ , 由式(3)可求得试验用干涉仪臂差为 1.252 mm。在拉伸干涉仪短臂的过程中, 设置微动控制台步进长度为  $1\mu\text{m}$ , 缓慢拉伸短臂。在该过程中需要考虑弹光效应, 通过式(5)可以计算出拉伸值与干涉仪两臂光程差关系。拉伸短臂时, 臂差测量预期值应等于自由状态下臂长差值减去受弹光效应作用的拉伸值。实验对干涉仪从  $100\mu\text{m}$  到  $500\mu\text{m}$  之间的拉伸量进行了详细观测, 并对 100、200、300、400 和  $500\mu\text{m}$  拉伸量进行了观测计算, 测量结果与预期值基本一致, 图 7 分别为 200、300 和  $400\mu\text{m}$  拉伸量下干涉仪的输出谱图。由于环境温度变化、外界振动和气流扰动等会对干涉仪臂差产生影响, 因此测量时在相对封闭的环境测量结果会更好一些。

该方法的测量精度主要由解调仪波长测量精度决定,同时也与工作波长有关<sup>[12]</sup>,试验所用解调仪波长测量精度为 1 pm,在 1530nm 附近测量精度可达到 2 $\mu$ m。通过干涉仪拉伸测量臂差试验表明,该方法可以直观精确地测量干涉仪臂差。

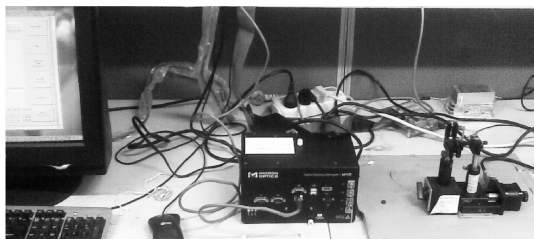


图 4 实验装置实物图  
Fig. 4 Picture of testing apparatus

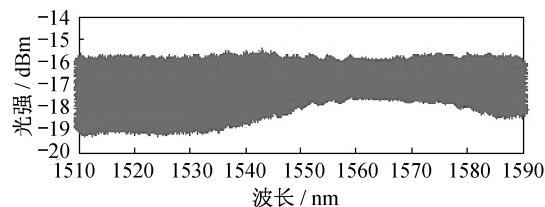


图 5 解调仪测得的干涉仪输出信号  
Fig. 5 Output signal of optical fiber interferometer

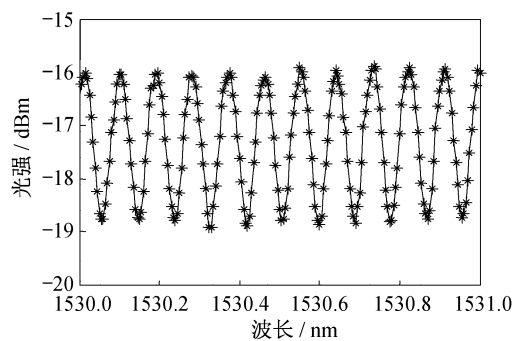


图 6 干涉仪输出信号局部图  
Fig. 6 Enlarged drawing of output signal of optical fiber interferometer

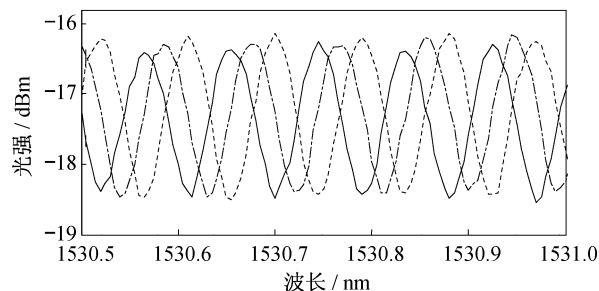


图 7 不同臂差干涉仪的输出信号  
Fig. 7 Diverse output signal of optical fiber interferometer with different optical path difference

### 3 结 论

利用基于 F-P 调谐滤波技术的光纤光栅波长解调系统来精确测量光纤干涉仪臂长差,实验表明该方法可以实现对干涉仪臂差的精确测量,测量精度可达到 2 $\mu$ m。该方法拓展了光纤光栅解调仪的应用领域,使之代替价格昂贵、体积庞大的光谱仪,简单、快速地测量干涉仪臂差。在光纤干涉仪的研制过程中,该方法可以实时监测臂差的变化,有利于研制高质量的传感型和功能型光纤干涉仪,特别是在制作短臂差或零差光纤干涉仪过程中可以发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] JACKSON D A. Recent progress in monomode fiber-optic sensors[J]. *Meas Sci Technol*, 1994, 5(3): 621—638.
- [2] FRIEBLE E J, KERSEY A D. Fiberoptic sensors measure up for smart structures[J]. *Laser Focus World*, 1994, 30(5): 165—171.
- [3] 曹家年, 张立昆, 李绪友, 等. 干涉型光纤水听器相位载渡调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, 19(11): 1536—1540.
- [4] 张学亮, 周晓军, 胡永明, 等. 全保偏光纤地磁传感器[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1515—1518.
- [5] 童睁蝶, 冯德军, 杨石泉, 等. 基于全光纤马赫—曾德尔干涉仪的电流传感研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2002, 35(3): 70—73.
- [6] 江 轻, 陈淑芬. 用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1487—1490.
- [7] 扬 志, 李永倚, 何玉钧, 等. 分布式光纤布里渊散射温度传感实验系统[J]. *光子学报*, 2003, 32(1): 14—17.
- [8] 吕福云, 樊亚仙, 刘玉洁, 等. 全光纤调 Q 激光器的实验研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 1999, 32(1): 74—76.
- [9] DANDRIDGE A. Zero, path-length difference in fiber-optic interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, LT-1(3): 514—516.
- [10] 李毛和, 张美敦. 光纤干涉仪臂差的测量[J]. *光子学报* 1999, 28(8): 740—743.

- [11] 扬 军,裴雅鹏,刘志海,等. 光纤 Mach-Zehnder 干涉仪臂长差的精确测量[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007,28(8):740-743.
- [12] 余有龙,刘盛春,刘士奎,等. 非平衡全光纤干涉仪臂长差测量方法的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报,2005,22(2):216-218.
- [12] 张 键,刘 波,开桂云,等. 实现高精度、高稳定性的工程化光纤光栅解调系统的研究[J]. 光子技术,2006,2(6):88-91.
- [13] 梁有程,江绍基,余志强,等. 基于非对称 F-P 滤波器的光纤光栅解调技术[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):906-909.
- [14] 乔学光,王 瑜,傅海威,等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. 光学学报,2008,28(5):853-855.

## 消 息

### 我国铯原子光钟关键技术研究取得进展 “高准确度原子光学频率标准仪的研制与开发”课题通过验收

不久前,由中国计量科学研究院等单位共同承担的“高准确度原子光学频率标准仪的研制与开发”课题顺利通过了国家质检总局组织的专家验收。该课题建立了铯原子塞曼减速器和激光冷却囚禁装置,研制了宽带钛宝石飞秒光梳和铷光纤光梳,完善了多个次级光学频率标准,掌握了铯原子光钟和光纤光梳研究的一系列关键技术,为铯原子光晶格钟和光纤光梳的进一步研究奠定了技术基础。

该课题是国家“十一五”科技支撑计划重大项目“科学仪器设备研制与开发”项目中的一项目,由中国计量科学研究院、中国科学院武汉物理与数学研究所、北京大学和国防科技大学等 4 家单位共同承担。主要围绕国际计量学时间频率标准领域的热点前沿方向——冷原子光钟和飞秒光梳,开展铯原子光晶格钟、飞秒光梳和次级光学频率标准 3 个子课题的研究。

时间频率作为一个重要的基本物理量,在国民经济、大众生活、国防建设和基础科学研究中起着重要的作用。高准确度时间频率基准钟的研制,是保证国家时间频率计量体系独立完整性的关键,关系到国家的核心利益。与现行的铯原子钟比较,光钟具有实现更高准确度的潜力,被公认为下一代时间频率基准。开展光钟研究已成为近年来国际计量科学研究的新热点,目前全球已有 30 多家单位开展此类研究。用光钟替代现行的铯原子喷泉钟来重新定义秒,可以显著提高卫星导航系统的定位精度。

据课题负责人中国计量科学研究院方占军研究员介绍,光钟主要包括冷原子光晶格钟和单离子光钟两大类。经过 3 年的科技攻关,目前该课题组掌握了铯原子光钟和掺铷光纤光梳研究的一系列关键技术,并实现了多项技术创新:研究建立了铯原子塞曼减速器和激光冷却囚禁装置,首次实现 461nm 蓝 MOT;研制了窄线宽 689nm 外腔半导体激光器,初步实现 689nm 红 MOT,转换效率达到 20%;研制了掺铷+光纤飞秒激光振荡器、放大和高非线性光纤扩谱装置,在国内首次得到载波包络频移信号  $f_0$ ,信噪比 40dB;完善了 633nm、543nm、612nm 和 532nm 次级光学频率标准建立了完整的光学频率量值传递体系,等等。

高准确度原子光学频率标准仪的研制与开发课题的顺利完成,为我国铯原子光晶格钟基准装置的进一步研究、建立我国基于光钟的新一代时间频率计量体系奠定了理论和技术基础,对于我国在 2019 年后秒的重新定义问题上争得发言权和主动地位具有重要意义。

(摘自《科学时报》)