

基于双路比值条纹计数法的法布里-珀罗腔位移传感器

舒卓 童斌 徐春晖 陈凤翔 黎敏

(武汉理工大学物理系, 湖北 武汉 430070)

摘要 为了解决普通条纹计数法在余弦信号极大/极小值位置难于判向的问题,提出一种基于双法布里-珀罗(F-P)干涉仪的比值条纹计数法。利用正切信号在相位为 $\pi/2$ 整数倍时发生跳变的特点,取两路正交余弦干涉信号的比值(即为正切信号),再通过跳变脉冲计数,在测量相位差大小的同时,实现了对相位变化方向的判定。本方法对传感器两光路之间的初始相位差无严格要求,安装调试简单。实验结果表明,以位移传感为例,系统在 $0\sim 1$ mm的测量范围内,线性相关系数达到0.9999,线性度为0.306%,误差限值为 $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。

关键词 传感器; 光纤位移传感器; 法布里-珀罗干涉仪; 条纹计数法; 比值

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1005003

Dual-Fiber Fabry-Perot Displacement Sensor Based on Ratio Method Fringe Counting Demodulation

Shu Zhuo Tong Bin Xu Chunhui Chen Fengxiang Li Min

(Department of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract Conventional fringe counting method has difficulty in direction judgment, especially at the peak or valley of cosine signal. In order to overcome this problem, we present a double Fabry-Perot (F-P) interferometer using a ratio fringe counting approach. Since the value of tangent signal jumps at which phase is an integer multiple of $\pi/2$, we use two orthogonal cosine interference signal ratio to get the tangent signal. Meantime, by counting the number of pulse, we can not only measure the phase difference but also judge the direction change. This approach has no strict requirement for initial phase difference of two optic paths. It's very feasible for manufacturing, and experimental results demonstrate the linearly dependent coefficient up to 0.9999, a good linearity to 0.306% and a displacement resolution to $\pm 3\ \mu\text{m}$ within a dynamic range from 0 to 1mm of the sensor system.

Key words sensors; optical fiber displacement sensor; Fabry-Perot interferometer; fringe counting; ratio

OCIS codes 060.2370; 060.2300; 060.2310

1 引言

法布里-珀罗(F-P)干涉型光纤传感器,具有测量精度高、可单端检测和光路简单等优点,具有广阔的应用前景^[1-3]。光纤F-P传感器的信号提取可以采用强度解调^[4]或相位解调两种方法。相位解调法精确,但相对复杂、成本高^[5-7];强度解调方法,如条纹计数法,原理简单、成本低廉,因而具有一定优

势^[8-12]。但是在干涉信号极值(波峰或波谷)处不能根据光强变化来判断相位的增减,这就是条纹计数法中的判向难题。迄今,为解决该问题所提出的可行方法主要是双干涉光路法。该方法利用两路正交信号与条纹走向存在的一一对应关系实现条纹判向,其关键是如何产生两路正交信号。文献[10]提出使两光纤端面距离差保持为 $\lambda/8$ (约191 nm,工作

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(61177076)、中央高校基本科研业务费专项基金(2012-Ia-020、2013-Ia-038)

作者简介: 舒卓(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感及测量等方面的研究。E-mail: 1004817761@qq.com

导师简介: 黎敏(1970—),女,教授,硕士生导师,主要从事光纤光学与传感器等方面的研究。

E-mail: minli@whut.edu.cn(通信联系人)

波长为 1530 nm 时),则两 F-P 腔的干涉光形成具有 $\pi/2$ 固定相位差的正交信号。但是目前的光纤端面加工工艺无法满足这种精度要求。本课题组在前期工作曾提出基于随机相位差的双光纤 F-P 结构^[12-13],文献[12]重点解决了条纹判向的问题,但此方法存在两个缺陷:1) 需要事先确定传感单元类型;2) 需要动态改变判断阈值来消除腔长增加所导致的光强衰减的影响,所以系统精度不高。文献[13]利用“微分交叉相乘法”巧妙地完成信号解调,但是同样面临着 F-P 腔腔长变化导致光强衰减所引入的测量范围受限的问题。本文在原有双光纤 F-P 干涉仪基础上,将两路干涉信号直接相除,其比值信号是正切信号,正切函数在相位为 $\pi/2$ 的整数倍处跳变形成脉冲;通过脉冲的正负即可判断相位的增减。因此省去了文献[12]中繁冗的传感器类型标定、运算和判向过程,显著地降低了解调算法的复杂度的同时,测量分辨率也提高了 1 倍。且双 F-P 干涉仪的同光路结构保证了两路信号包含相同的外界环境噪声,因此通过求两路信号的比值可以有效减弱外界扰动对测量的影响,具有抗干扰能力强的优点,所以本文提出的方法比文献[12-13]在测量范围上有所扩大。

2 双路比值条纹计数法原理

图 1 是光纤双 F-P 干涉仪传感单元的结构示意图。两根单模光纤(SMF)固定在同一个玻璃夹具中,端面磨平。两光纤端面和被测物体表面之间构成双光纤 F-P 腔。光纤端面抛磨工艺误差决定了两光纤端面始终存在随机位置差 d 的大小。

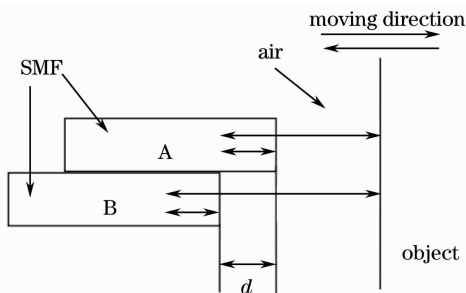


图 1 传感单元结构示意图

Fig. 1 Structure of the sensor unit

两光纤端面的反射光分别和被测物体表面的反射光产生干涉,将接收到的光强信号滤除直流项后,A、B 两根光纤内的干涉光强信号可分别表示为

$$I_A = I_{A0} \cos[\varphi(t)], \quad (1)$$

$$I_B = I_{B0} \cos[\varphi(t) + \varphi_0], \quad (2)$$

式中

$$\varphi(t) = 2\pi \frac{2nL(t)}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\varphi_0 = 2\pi \frac{2nd}{\lambda}, \quad (4)$$

I_{A0} 和 I_{B0} 表示两路信号光强幅值。 $\varphi(t)$ 表示腔长 $L(t)$ 变化引起的相位变化, φ_0 代表两光路的初始相位差,由端面抛磨工艺决定。 n 表示 F-P 腔介质折射率,实验中介质为空气 $n = 1$ 。直接用(2)式除以(1)式得

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{I_{B0}}{I_{A0}} \{ \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0 \tan[\varphi(t)] \}. \quad (5)$$

滤去直流项,得 $\frac{I_B}{I_A} = k \cdot \tan[\varphi(t)]$, 其中 $k = -(I_{B0}/I_{A0}) \sin \varphi_0$ 为一常数。

图 2 为归一化处理后两路干涉光存在某一随机初始相位差的标准正弦波(没有添加噪声)直接相除得到的信号波形,可以看出:当相位 $\varphi(t)$ 增大时,两路信号光强的比值随相位增加出现由 +1 到 -1 的脉冲;而当相位 $\varphi(t)$ 减小时,波形将出现由 -1 到 +1 的脉冲,脉冲周期为 π 。通过记录脉冲个数,得到对应的相位变化量,从而通过(3)式计算出对应的被测量。其原理也可以这样来理解,余弦函数周期为 2π ,其波形关于 $\varphi = j\pi$ (j 为整数)对称,即在极值点处($\varphi = j\pi$),当相位增加或者减少时,波形图是一致的;而正切函数周期为 π ,其波形不具有对称性,即当相位增加或者减少时,波形图不同,正是利用这种不同,实现了条纹判向。

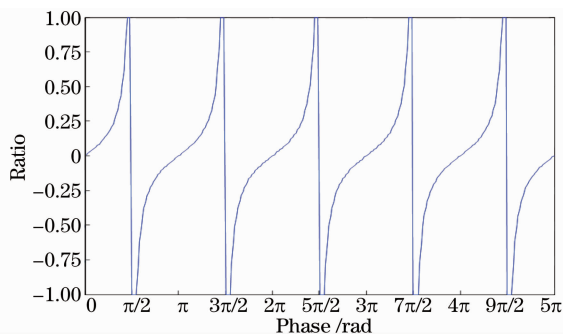


图 2 比值与相位关系示意图

Fig. 2 Analog diagram of ratio and phase relationship

信号解调系统中,设置寄存器 p_1 、 p_2 分别记录前一时刻和当前的采样值,设阈值为 m ($m > k$, 用于脉冲标定,需要由第一次测量采集的数据来确定)。当 $p_1 > +m$ 且 $p_2 < -m$ 时,计数器值加 1;反之,当 $p_1 < -m$ 且 $p_2 > +m$ 时,计数器值减 1;而其他情况下计数器均不计数;最后,由计数值得到的相位变化量,再通过(3)式计算出相对应的被测量输出显示。

为保证系统的测量精确度,采样速率须保证两个采样点相位差不超过 $\pi/4$,即在一个周期(2π)内,至少要采样 8 次。

3 双光纤 F-P 腔干涉仪的位移传感实验

为了验证上述方法的可行性,搭建双光路 F-P 腔位移传感器,如图 3 所示。系统包括一台波长 1530 nm 的分布反馈(DFB)半导体激光器(LD)、光纤隔离器、3 dB 耦合器、传感单元、PIN 光电探测器

(PD)和数据采集与处理设备(DAQ)。本实验设置数据采集卡的采样速率为 $6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$,精度为 12 bit,采用双通道采样。

LD 发出的激光经过隔离器和 3 dB 耦合器 1 被分为两束,分别耦合进入两路 F-P 传感单元,干涉形成两路具有某一固定相位差的余弦光强信号,返回分别经过 3 dB 耦合器 2 和 3 后,被两个同型的 PIN 光电探测器实现光电转换并放大后,通过采集卡提交处理器处理,得到条纹计数值,进而计算出被测位移量。

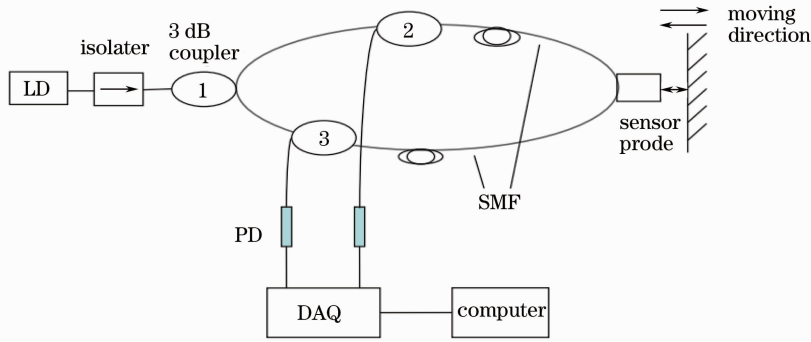


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Experimental system

位移实验的步长为 $50 \mu\text{m}$,位移测量范围为 $0 \sim 1 \text{ mm}$,并完成 3 轮正反向交替测量。图 4 是测量结果与实际位移的关系曲线。由图 4 可以看出,在 $0 \sim 1 \text{ mm}$ 范围内,测量值和实际位移具有良好的线性关系,且重复性非常好。

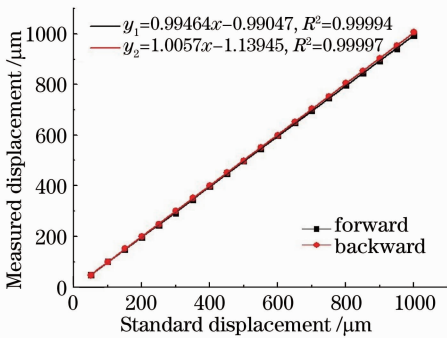


图 4 测量结果与实际位移关系图

Fig. 4 Relationship between measured displacement and standard displacement

对于正、反向位移的测量值,拟合方程分别为

$$\begin{cases} y_1 = 0.99464x - 0.99047 \\ y_2 = 1.0057x - 1.13945 \end{cases} \quad (6)$$

由拟合结果可以看出,拟合曲线与理想曲线的相关系数优于 0.9999,且线性度优于 0.306%,误差限值为 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

4 误差来源和讨论

4.1 比值条纹计数法的测量分辨率

普通条纹计数法采用全波长计数,理论分辨率为 $\lambda/2$,即可分辨被测物体 $\lambda/2$ 的位移变化量,对应的两光路光程差误差为一个波长;而比值条纹计数法在光程差改变一个波长时,计数器计数 2 次,说明比值条纹计数法的理论分辨率是一般条纹计数法的 2 倍。考虑到 F-P 初始腔长的影响,故比值条纹计数法的理论分辨率最低为 $\lambda/2$ 。

4.2 光强衰减对测量的影响

由于上述解调分析中忽略了外界环境变化的影响,而干涉仪在实际测量中不可避免地会遇到光源强度变化、光纤弯曲损耗和连接损耗、F-P 腔长变化引起光强幅度的变化等问题,本设计从原理上避免了这些问题,具有本质抗干扰的优势。将探测到的两路信号相除,由于第一路探测到的光强信号受到外界影响,这些影响同样会出现在第二路光强信号中,通过求两路光信号强度的比,即可消除外界扰动对测量的影响,从中可以提取出相位信号。

该方法引发的问题是两路信号中的噪声相除后也被放大,甚至影响测量。故应对采样信号进行滤波处理。由于有用信号幅度远大于噪声幅度,通过

设置采样触发器,即当探测光强达到某一阈值才触发采样。采样终止之后,若需要重新开始,可以再次触发模数采样。这样处理可以显著抑制噪声。滤波和触发器可以采用软件实现,以减少系统硬件数量,提高系统稳定性。

4.3 位移实验的系统误差和随机误差

实验采用的微位移调节架的精度是 $10\ \mu\text{m}$,分辨率是 $5\ \mu\text{m}$ 。腔长每改变 $10\ \mu\text{m}$,对应脉冲数为 13,所以测量过程中,人为造成的随机误差不容忽视;传感单元的震动对实验结果也有较大影响。

实验发现,当光纤 F-P 腔腔长过大或过小时,实验结果误差较大,原因在于:当腔长过大时,反射信号强度很弱,干涉相位信号淹没在噪声信号中;腔长过小时,噪声信号的幅度接近干涉相位信号,这样都会造成误判。

5 结 论

本文提出了一种基于双 F-P 干涉仪的比值条纹计数法,用于 F-P 干涉型位移传感器的信号解调。简单的解调方案解决了复杂的条纹计数法判向问题,具有测量精度高、结构简单和成本低等优点。实验结果表明,该传感器在 $0\sim 1\ \text{mm}$ 的测量范围内,相关系数达到 0.9999 以上,线性度为 0.306%,误差限值为 $\pm 3\ \mu\text{m}$,重复实验验证了解调方案的正确性。该方案可以以较高精度非接触测量位移、厚度、震动幅度、距离等物理量,如果增加在单个周期的反正切运算或通过算法补偿震动对实验的影响,则有望提高系统测量分辨率,最大理论分辨率可达 $0.3825\ \mu\text{m}$,即 $\lambda/4$ 。

参 考 文 献

- 1 Wang Guocheng, Sun Dongsong, Du Hongliang, *et al.*. Analysis of Doppler wind lidar detecting data based on Fabry-Perot etalon [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0314002.
王国成, 孙东松, 杜洪亮, 等. 基于法布里-珀罗标准具的测风激光雷达探测数据分析[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0314002.
- 2 Xue Junwen, Pei Xuedan, Su Binghua, *et al.*. Study of F-P etalon using in lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 031402.
薛竣文, 裴雪丹, 苏秉华, 等. 激光器中 F-P 标准具的研究[J].

- 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 031402.
- 3 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of FBG Fabry-Perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406006.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤震动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406006.
- 4 Luo Yufeng, Liu Zhilin, Zhao Zhonghua. High precision and continuous optical fiber F-P cavity liquid level sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(1): 72-75.
骆宇锋, 刘志麟, 赵中华. 高精度连续型光纤 F-P 腔液位传感器[J]. 光电工程, 2006, 33(1): 72-75.
- 5 Yixian Ge, Ming Wang, Haitao Yan, *et al.*. A MEMS pressure sensor based on a phase demodulation method[J]. J Functional Materials and Devices, 2008, 14(2): 472-474.
- 6 Wang Yibin, Tian Qian, Zhang Enyao. Influence of light intensity on measurement accuracy of laser diode multiplexing optical fiber displacement sensor[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(3): 183-187.
王屹滨, 田芊, 章恩耀. 半导体激光器多路光纤位移传感中光强对测量精度的影响[J]. 中国激光, 1994, 21(3): 183-187.
- 7 Wang Lin, He Jun, Li Fang, *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for the fiber sensors[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405001.
王林, 何俊, 李芳, 等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405001.
- 8 Zhao Zhonghua. Research on Fiber Fabry-Perot Cavity Liquid Level Sensor by Using Fringe Counting Technique [D]. Guangzhou: Jinan University, 2006.
赵中华. 条纹计数法光纤 Fabry-Perot 腔液位传感器研究[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
- 9 Wang Weiwei. Research on Liquid Level Measurement Technique Based on Fiber Sensor[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
王微微. 基于光纤传感器的液面高度测量技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- 10 Zhao Zhonghua, Gao Yingjun. An optical fiber fiber Fabry-Perot cavity liquid level sensor using interference fringe counting technique[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(7): 1369-1372.
赵中华, 高应俊. 干涉条纹计数法光纤 Fabry-Perot 腔液位传感器[J]. 光子学报, 2008, 37(7): 1369-1372.
- 11 Li Min, Liao Yanbiao. Optical Fiber Sensor and Its Application Technology[M]. Wuhan: Wuhan Univeisity Press, 2008.
黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- 12 Bin Tong, Min Li, Yunlin Li. Double-fiber Fabry-Perot interferometry optical fiber liquid level sensor[C]. SPIE, 2012, 8351: 83510T.
- 13 Guo Jingjing, Li Min, Tong Bin. Dual-fiber displacement sensor based on direct phase demodulation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0805005.
郭晶晶, 黎敏, 童斌. 基于直接相位解调的双光纤法布里-珀罗位移传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805005.

栏目编辑:何卓铭