

文章编号 1004-924X(2017)04-0820-07

采用相位调制方法的光纤干涉仪

倪 畅, 张 鸣*, 朱 煜

- (1. 清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;
2. 清华大学 精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了实现小巧紧凑且使用灵活的大量程位移测量, 提出了一种采用相位调制方法的光纤干涉仪。首先, 介绍相位调制方法, 分析内调制与外调制的特点, 指出由于内调制的局限性, 外调制更适于较大量程的位移测量。然后, 用数学推导和 MATLAB 仿真对已有的位移解算算法中的反正切法与微分交叉相乘法进行分析, 证明在毫米级量程的位移测量中反正切法优于微分交叉相乘法。最后, 搭建了采用相位调制方法的光纤干涉仪, 并进行了实验验证。实验结果表明: 相比于微分交叉相乘法, 反正切法更适用于毫米级以上量程的位移测量, 基于相位调制的光纤干涉仪在毫米级步进运动中的相对误差最大为 255.21 nm, 标准差为 78.56 nm, 基本满足高精度大量程的位移测量需求。

关键词: 光纤干涉仪; 相位调制方法; 相位调制; 位移解算; 反正切法

中图分类号: O436.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0820

Fiber interferometer based on phase generated carrier method

NI Chang, ZHANG Ming*, ZHU Yu

- (1. State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
 2. Beijing Lab of Precision/Ultra-Precision Manufacture Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
- * Corresponding author, E-mail: zm01@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: In order to realize compact and flexible wide-range displacement measurement, a fiber interferometer with the Phase Generated Carrier (PGC) method was proposed. First, the PGC method was detailed. The analysis on the internal and external modulations revealed the limitation of internal modulation and indicated that the external modulation was more suitable for wide-range displacement measurement. Then, two existing displacement calculation algorithms were analyzed by mathematical deduction and MATLAB simulation, proving that PGC-ATAN algorithm is better than PGC-DCM algorithm in millimeter-scale displacement measurement. A fiber interferometer based on the PGC method was established and tested experimentally. The results indicate that compared to PGC-DCM algorithm, PGC-ATAN algorithm is a better candidate for millimeter-scale displacement measurement. The maximum relative error of the interferometer in a millimeter-scale step motion is 255.21

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2017-01-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51677104)

nm with a standard deviation of 78.56 nm. It can satisfy the system requirements of high-precision and wide-range in displacement measurements.

Key words: fiber interferometer; Phase Generated Carrier (PGC); phase modulation; displacement calculation; arc-tangent method

1 引言

干涉仪作为一种重要的高精度测量仪器,在现代高精度测量任务中受到广泛重视^[1-3],低成本化、小型化和易用性是其重要的发展方向之一。

目前,用于位移测量的干涉仪主要分为零差和外差两种。零差干涉仪需要多个光电探测单元获取多路相位不同的信号,才可以实现高精度的位移测量和辨向^[2],这种干涉仪的整体尺寸较大。外差干涉仪需要特殊的双频激光源或者移频器件等^[4],其配置复杂、成本较高。相位调制^[5](Phase Generated Carrier, PGC)是一种不同于零差和外差的干涉测量方法,该方法以其特别的位移解算流程和硬件结构,被广泛应用于光纤水听器、振动传感等微位移测量领域^[6-15]。

相比于自由空间光干涉仪,光纤干涉仪使用光纤及光纤器件进行传感,其结构小巧紧凑,便于布置。Renishaw公司的光纤激光尺使用光纤连接激光器干涉仪,无需额外的转向镜或分光镜,应用在复杂场合中易于安装和使用^[16]。但该测量系统为零差结构,需要4个光电探测单元获取相位相差 90° 的4路信号,才能实现位移测量和辨向。Attocube公司提出的光纤干涉仪使用全光纤结构,易于集成和多路复用,减小了干涉仪的整体尺寸和布置难度,但该全光纤结构存在保偏光纤激光耦合效率不稳定的问题,需要额外进行校准与补偿^[8-10]。

本文对PGC法进行深入分析,并提出了一种采用相位调制方法的光纤干涉仪。该干涉仪满足小巧紧凑、便于布置和使用方便等位移测量需求。

2 相位调制方法

2.1 内调制与外调制

图1所示为零差干涉仪的基本结构,它主要由激光源、分光镜、参考镜、测量镜和光电探测器组成。激光源发出线偏振光,被分光镜分为参考

光和测量光2路,2路光经固定的参考镜和移动的测量镜反射再重合,在光电探测器前形成干涉条纹。

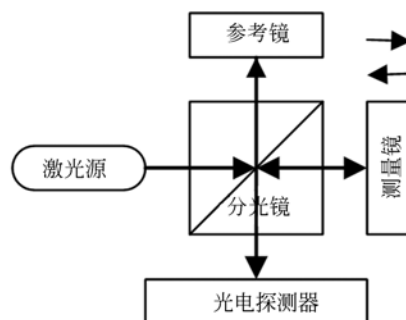


图1 零差干涉仪的基本结构

Fig. 1 Schematic diagram of homodyne interferometer

光电探测器的电压信号为:

$$s_0 = A + B \cos(4\pi x(t)/\lambda), \quad (1)$$

其中: A , B 分别为直流分量和交流分量的幅值, λ 为激光源的波长, $x(t)$ 为测量镜的位移, t 为时间。

调制方法有相位调制和频率调制(调制波长)两种,但在数学表达上可统一表示为相位调制。根据调制位置的不同,调制方法分为内调制和外调制。以图1为例,内调制是对激光源进行调制,外调制是对参考光进行调制^[6]。

若进行内调制,则电压信号为^[11]:

$$s_i = A + B \cos(4\pi x(t)/\lambda + m_i \cos(\omega_b t)), \quad (2)$$

其中: m_i 为内调制的调制深度, ω_b 为相位调制信号的角频率。 m_i 可以表示为:

$$m_i = 2x(t) e_0 \omega_b / c, \quad (3)$$

其中: e_0 为相位调制信号的幅值, c 为光速。

若进行外调制,则电压信号为^[5]:

$$s_e = A + B \cos(4\pi x(t)/\lambda + m_e \cos(\omega_b t)), \quad (4)$$

其中: m_e 为外调制的调制深度,且 $m_e = e_0$ 。

由式(2)和式(3)可知,内调制的调制深度 m_i 带有 $x(t)$, 当位移变化时,其调制深度会不断变化;但在位移解算时,调制深度会被当成一个固定值。通常,设定 $x(t) = x_0 + \Delta x$, x_0 为较大的初始值, Δx 为较小的测量范围,如此在计算 m_i 时可以将 $x(t)$ 估计为 x_0 。因此,内调制可以应用于光

纤水听器等微位移测量领域^[14-15]。此外,内调制相对于外调制的最大优势在于,被调制的激光源可以分成多路复用,从而很方便地实现多轴测量^[17]。但随着被测位移的不断增大,内调制对 $x(t)$ 的估计会越来越不准确,从而带来一定的解算误差,且 x_0

$$s_e = A + B \cos(4\pi x(t)/\lambda + m_e \cos(\omega_0 t)) = A + B \left\{ \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(m_e) \cos(2n\omega_0 t) \right] \times \cos(4\pi x(t)/\lambda) - \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(m_e) \cos((2n+1)\omega_0 t) \right] \times \sin(4\pi x(t)/\lambda) \right\}, \quad (5)$$

其中 $J_n(m_e)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数在 m_e 处的函数值,即:

$$J_n(m_e) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{1}{m!(n+m)!} \left(\frac{m_e}{2}\right)^{n+2m}. \quad (6)$$

从式(5)可以看出, s_e 包含多阶分量,其中的 1 阶贝塞尔分量和 2 阶贝塞尔分量的形式如下:

$$s_1 = -2BJ_1(m_e) \cos(\omega_0 t) \sin(4\pi x(t)/\lambda), \quad (7)$$

$$s_2 = -2BJ_2(m_e) \cos(2\omega_0 t) \cos(4\pi x(t)/\lambda). \quad (8)$$

从式(7)和式(8)中,可以得到一对包含位移信息 x 的正交信号 $\sin(4\pi x(t)/\lambda)$ 和 $\cos(4\pi x(t)/\lambda)$ 。应用相干解调原理,设定 $\cos(\omega_0 t)$ 和 $\cos(2\omega_0 t)$ 为同步载波,将 s_e 分别与 $\cos(\omega_0 t)$ 和 $\cos(2\omega_0 t)$ 混频,可得到:

$$s_{e1} = -BJ_1(m_e) \sin(4\pi x(t)/\lambda) + s_{h1}, \quad (9)$$

$$s_{e2} = -BJ_2(m_e) \cos(4\pi x(t)/\lambda) + s_{h2}, \quad (10)$$

其中: s_{h1} 为 s_e 与 $\cos(\omega_0 t)$ 混频后的高频项, s_{h2} 为 s_e 与 $\cos(2\omega_0 t)$ 混频后的高频项。

对 s_{e1} 和 s_{e2} 低通滤波,除去高频项可得到:

$$S_1 = -BJ_1(m_e) \sin(4\pi x(t)/\lambda), \quad (11)$$

$$S_2 = -BJ_2(m_e) \cos(4\pi x(t)/\lambda). \quad (12)$$

这里有 2 种方法可以从式(11)和式(12)中解算出位移量 $x(t)$: 微分交叉相乘法 and 反正切法^[7]。

2.2.1 微分交叉相乘法(PGC-DCM)

式(11)和式(12)对时间 t 做微分,并交叉相乘,有:

$$Q_1 = -J_1(m_e)J_2(m_e) (B \sin(4\pi x(t)/\lambda))^2 \times 4\pi/\lambda \times \dot{x}(t), \quad (13)$$

$$Q_2 = J_1(m_e)J_2(m_e) (B \cos(4\pi x(t)/\lambda))^2 \times 4\pi/\lambda \times \dot{x}(t). \quad (14)$$

式(14)减去式(13)可得:

$$Q = J_1(m_e)J_2(m_e) B^2 \times 4\pi/\lambda \times \dot{x}(t). \quad (15)$$

式(15)除以常数项,再对时间 t 做积分,

的存在必然会带来一定的死程误差。而外调制的调制深度 $m_e = e_0$ 则不存在上述问题,因此在相同条件下,外调制更适用于大量程位移测量。

2.2 位移解算

对式(4)进行贝塞尔函数分解,有:

$$x(t) = \int_0^t Q / [J_1(m_e)J_2(m_e)B^2 \times 4\pi/\lambda] dt. \quad (16)$$

2.2.2 反正切法(PGC-ATAN)

式(11)除以式(12)并除以常数系数,再进行反正切计算并解卷绕,可得:

$$x(t) = \frac{N\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4\pi} \arctan\left(\frac{J_2(m_e)S_1}{J_1(m_e)S_2}\right), \quad (17)$$

其中 N 为反正切计算时解卷绕的计数。

3 数学分析与仿真

3.1 数学分析

用数学方法分析 PGC-DCM 的位移解算情况。在得到时间离散序列和后,对它做微分运算。对于离散序列的数值微分,有向前差商、向后差商和中心差商 3 种方法^[18], 3 种方法的计算公式以及截断误差依次为:

$$\dot{f}(x_i) \approx \frac{f(x_i+h) - f(x_i)}{h}, \quad (18)$$

$$R_1(x_i) = -\frac{h}{2} \ddot{f}(\xi), \chi_i \leq \xi \leq \chi_i + h, \quad (19)$$

$$\dot{f}(x_i) \approx \frac{f(x_i) - f(x_i-h)}{h}, \quad (20)$$

$$R_2(x_i) = \frac{h}{2} \ddot{f}(\xi), \chi_i - h \leq \xi \leq \chi_i, \quad (21)$$

$$\dot{f}(x_i) \approx \frac{f(x_i+h) - f(x_i-h)}{2h}, \quad (22)$$

$$R_3(x_i) = \frac{h^2}{6} \ddot{f}(\xi), \chi_i - h \leq \xi \leq \chi_i + h, \quad (23)$$

其中: ξ 为待计算的离散点, h 为步长。

显然,向前和向后差商的截断误差为 h 的等价无穷小量 $O(h)$, 而中心差商为 $O(h^2)$, 中心差商的精度更高,因此,下面使用中心差商进行数值微分计算。当步长很小时,将式(23)表示的中心差商的截断误差估计为:

$$R(x_i) \approx \frac{h^2}{6} \ddot{f}(x_i), \quad (24)$$

将该截断误差带入 PGC-DCM 的计算中, 有:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= x(t) + x_e(t), \quad (25) \\ x_e(t) &= \int_0^t \frac{h^2}{6} \frac{(S_1 \ddot{S}_2(t) - S_2 \ddot{S}_1(t))}{[J_1(m_e) J_2(m_e) B^2 \times 4\pi/\lambda]} dt. \quad (26) \end{aligned}$$

在不考虑数值积分环节引入误差的情况下, PGC-DCM 中由于数值微分环节的截断误差, 引入了一个误差项 $x_e(t)$ 。若设定测量镜为匀速直线位移, $x(t) = C \cdot t$, C 为常数, 则有:

$$x_e(t) = \frac{h^2 (4\pi/\lambda)^2 C^3}{6 J_1(m_e) J_2(m_e)} t, \quad (27)$$

式中, $h, \lambda, C, 6J_1(m_e), 6J_2(m_e)$ 均为常数。该误差项与时间 t 成正比, 而 $t = x(t)/C$, 所以 $x_e(t)$ 与 $x(t)$ 成正比, 也就是位移量越大, 误差越大。

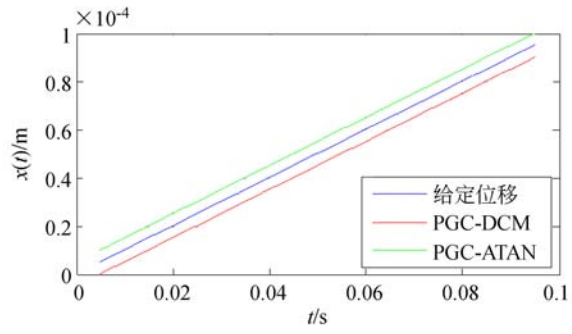
若设定测量镜为一定频率的小幅振动, 可以将振动看成多段匀速直线位移的拼接, 则在一个振动周期内, 运动速度相同但方向相反的匀速位移段所产生的误差的绝对值相同但符号相反, 可以相互抵消。因此, PGC-DCM 适用于振动传感领域, 但无法满足较大量程的位移测量; 而 PGC-ATAN 不存在上述问题, 所以 PGC-ATAN 比 PGC-DCM 更适用。

3.2 仿真分析

在数学软件 MATLAB 中仿真分析 PGC-DCM 和 PGC-ATAN 的位移解算情况。

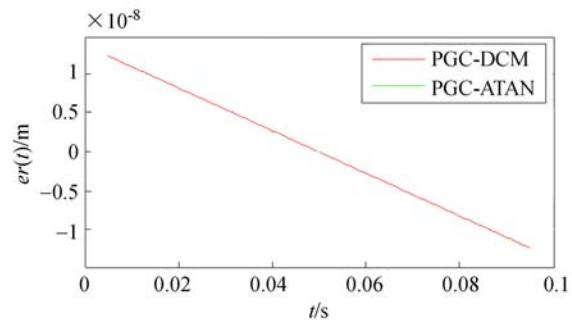
不考虑其他误差的前提下, 给定一条位移曲线, 由给定位移曲线生成外调制干涉信号 s_e , 然后分别使用两种方法计算出 2 条位移曲线, 对比这 3 条位移曲线并计算 2 种方法的解算误差。设定 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$, $\omega_b = 2\pi \times 5\ \text{kHz}$, $m_e = 2.07$, $A = 2$, $B = 1$, 信号 s_e 的采样率为 $200\ \text{kHz}$ ($h = 5 \times 10^{-6}$), 测量镜进行 $1\ \text{mm/s}$ 的匀速直线运动 ($x(t) = 0.001t$)。如图 2 所示, 为方便查看, 图 2 (a) 中将 PGC-DCM 和 PGC-ATAN 的解算结果沿纵坐标平移了一段距离。

由图 2 可知, PGC-DCM 和 PGC-ATAN 都可以算出与给定位移曲线相近的位移曲线, 但 PGC-DCM 的相对误差与位移量成正比关系, 与数学分析的结论相符; 而 PGC-ATAN 的相对误差保持在零附近, 仿真中 PGC-ATAN 的相对误



(a) 位移曲线对比

(a) Comparison of displacement curves



(b) 2 种方法的相对误差曲线

(b) Relative error curves of two algorithms

图 2 1 mm/s 匀速运动的仿真结果

Fig. 2 Simulation of 1 mm/s constant motion

差为 $18.5\ \text{pm}$ (3σ 准则)。

4 干涉仪结构

通常地, 零差干涉仪需要多个干涉信号才能实现辨向和大量程位移测量, 且测量精度受低频干扰影响, 难以提高。虽然外差干涉仪通过外差移频避开了低频干扰, 且只需要一个测量信号和一个参考信号即可实现大量程的位移测量, 但是外差干涉仪需要昂贵复杂的双频激光源和偏振相关器件, 成本较高, 且测量精度往往受偏振混叠的影响。而本文提出的新型干涉仪采用相位调制方法, 避开了低频干扰, 也不需要双频激光, 从而保证了测量精度; 且该干涉仪的结构简单, 只需要获得一个参考信号和一个测量信号即可实现大量程的位移测量, 不仅减小了干涉仪的整体尺寸, 也降低了制造成本。

图 3 所示为基于相位调制的光纤干涉仪结构。激光源出射的线偏振光经过隔离器和 1×2

耦合器后分为参考光和测量光,参考光被电光相位调制器(EOM)调制后,被偏振分光镜(Polarized Beam Splitter,PBS)反射。调制信号由信号发生器产生,信号发生器同时将调制信号输送至 A/D 采集卡,用做参考信号。测量光被 PBS 反射,经过四分之一波片(Quarter Wave Plate,QWP)后被测量镜反射回来,再一次经过 QWP,偏振方向旋转 90°,透射 PBS。参考光和测量光合光后,经过偏振轴 45°摆放的偏振片,产生干涉条纹到达光电探测器(Photodetector,PD),PD 获取的干涉信号和信号发生器给出的参考信号被 A/D 采集卡同时采集至信号处理部件,实现位移解算。

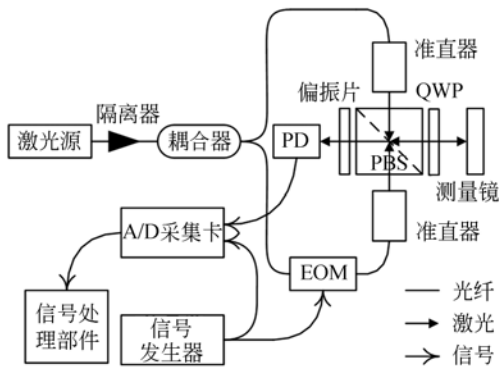


图 3 基于相位调制的光纤干涉仪示意图

Fig. 3 Framework of fiber interferometer based on Phase Generated Carrier (PGC)

5 实验

实验方案如图 4 所示,使用波长为 1 550 nm 的激光源(四川腾光公司),调制深度设定为

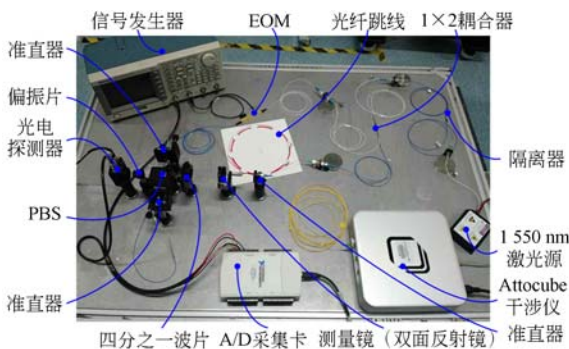
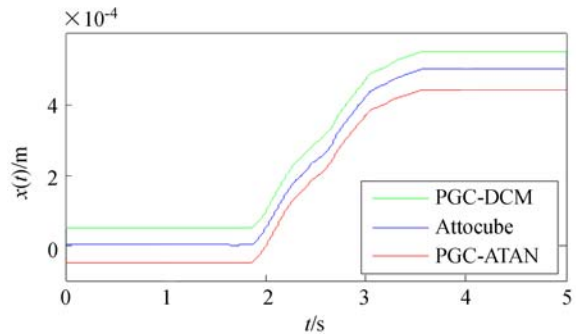


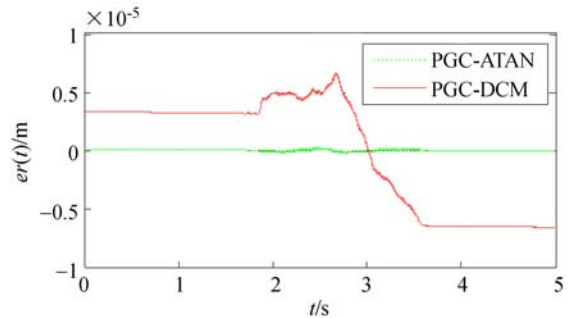
图 4 实验方案

Fig. 4 Experimental scheme

$m_e=2$,测量镜的一维移动由最大行程为 6 mm 的单自由度手动位移台实现(型号为 MS1S/M, Thorlabs 公司),使用电光相位调制器(型号为 LN53S-FC, Thorlabs 公司)实现相位调制,使用信号发生器(型号为 AFG3252, Tektronix 公司)产生余弦调制信号,干涉信号由光电探测器(型号为 PDA10CS-EC, Thorlabs 公司)获取,其他光学元件和光学机械均为 Thorlabs 公司的产品。由 A/D 采集卡(型号为 USB-6212, NI 公司)同步采集两路信号传输至 PC 机,经 Labview 记录后,使用 MATLAB 进行 PGC-DCM 和 PGC-ATAN 位移解算。测量镜为双面反射镜,



(a) 0.5 mm 步进运动
(a) 0.5 mm step motion



(b) PGC-DCM 和 PGC-ATAN 的相对误差
(b) Relative errors of PGC-DCM and PGC-ATAN

图 5 步进运动测量结果对比

Fig. 5 Comparison of step motion measurement

使用商业化的光纤干涉仪(型号为 FPS3010, Attocube 公司)在测量镜的另一面进行同步测量,以该测量结果为基准,计算 PGC-DCM 和 PGC-ATAN 的相对误差。手动操作位移台,使测量镜产生 0.5 mm 的步进运动,实验结果如图 5 所示。为方便查看,图 5(a)中将 PGC-DCM 和

PGC-ATAN 的解算结果沿纵坐标平移了一段距离。

从图 5(b)可以看出,在毫米级量程的位移测量中,PGC-ATAN 的相对误差远小于 PGC-DCM,且 PGC-DCM 的误差曲线呈现与位移曲线相关的步进特性,由此证明了 PGC-DCM 的误差随位移增大的累积特性。PGC-ATAN 方法在毫米级量程测量中具有相对误差小且不累积的优势。实验证明,在毫米级以及更大量程的位移测量中,应使用 PGC-ATAN 进行位移解算。限于条件,实验过程受到空气扰动和外界振动的影响,使测量存在一定的环境扰动误差。本文设计的采用相位调制方法的干涉仪在 0.5 mm 步进运动内的最大误差为 255.21 nm,误差的标准差为 78.56 nm。

参考文献:

- [1] 李兵,孙彬,陈磊,等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1939-1947.
- LI B, SUN B, CHEN L, *et al.*. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)
- [2] 赵维谦,李文宇,赵齐,等. 被测件随机移相干涉面形测量方法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2167-2172.
- ZHAO W Q, LI W Y, ZHAO Q, *et al.*. Surface measurement by randomly phase shifting interferometry of measured element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2167-2172. (in Chinese)
- [3] 刘兆武,李文昊,王敬开,等. 纳米精度二维工作台测量镜的面形误差在线检测[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9): 2134-2141.
- LIU ZH W, LI W H, WANG J K, *et al.*. Online detection of profile deviation for nano precision 2-D stage mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2134-2141. (in Chinese)
- [4] ELLIS J D. *Field Guide to Displacement Measuring Interferometry* [M]. Washington, DC: SPIE Press, 2014.
- [5] DANDRIDGE A, TVETEN A B, GIALLORENZI T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10):

6 结 论

本文分析了 PGC 内调制在测量范围上的局限性,和 PGC-DCM 方法的解算误差随位移累积的特性,提出了采用 PGC 的光纤干涉仪设计。实验结果表明:在毫米级甚至更大量程的位移测量中,PGC-ATAN 的位移解算精度优于 PGC-DCM;本文提出的干涉仪在毫米级位移内的最大误差为 255.21 nm,误差的标准差为 78.56 nm。在满足高精度大量程位移测量的前提下,基于相位调制的光纤干涉仪小巧紧凑、布置灵活、使用方便,可为新型干涉仪的设计及研制提供参考和思路。

1647-1653.

- [6] 曹家年,张立昆. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1998(6): 3-7.
- CAO J N, ZHANG L K. Research on phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase generated carrier techniques[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1998(6): 3-7. (in Chinese)
- [7] LIU Y, WANG L W, TIAN CH D, *et al.*. Analysis and optimization of the PGC method in all digital demodulation systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(18): 3225-3233.
- [8] THURNER K, BRAUN P F, KARRAI K K. Fabry-Pérot interferometry for long range displacement sensing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(9):095005.
- [9] THURNER K, BRAUN P F, KARRAI K. Absolute distance sensing by two laser optical interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(11):115002.
- [10] THURNER K, QUACQUARELLI F-P, BRAUN P F, *et al.*. Fiber-based distance sensing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 3051-3063.
- [11] 柏林厚. 基于光频调制 PGC 解调系统的光源及其它若干问题研究[D]. 北京:清华大学, 2005.
- BAI L H. *Studies on the Laser and Other Issues in the PGC Demodulation System Based on Laser Modulation* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [12] CHANDRIKA U K, PALLAYIL V. Signal distur-

- tion due to low-pass filtering in phase generated carrier demodulation schemes for interferometric sensors [C]. *Proceedings of 2013, Ocean Electronics, IEEE*, 2013; 31-34.
- [13] WANG G Q, XU T W, LI F. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2093-2096.
- [14] LI R ZH, WANG X B, HUANH J B, *et al.*. Phase generated carrier technique for fiber laser hydrophone [J]. *SPIE*, 2013, 8914; 89140 N.
- [15] LÜ CH R, DUAN F J, BO E, *et al.*. Sinusoidal phase-modulating fiber-optic interferometer fringe with a feedback control system [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6206-6211.
- [16] Renishaw 新产品介绍 [J]. *制造技术与机床*, 2006 (9): 124-126.
Introduction to new products of Renishaw Ca, Ltd. [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2006(9): 124-126. (in Chinese)
- [17] GERBERDING O. Deep frequency modulation interferometry [J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14753-14762.
- [18] 马东升, 董宁. 数值计算方法 [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
MA D SH, DONG N. *Numerical Computation Method* [M]. 3rd ed.. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)

作者简介:



倪 畅(1992—),男,湖北黄石人,2014年于华中科技大学获得学士学位,主要从事激光干涉测量,干涉仪设计及误差分析等方面的研究。E-mail: nc15@mails. tsinghua. edu. cn

通讯作者:



张 鸣(1973—),男,河北廊坊人,副研究员,1999年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事光刻机超精密工件台的设计及制造,超精密测量等方面的研究。E-mail: zm01@mails. tsinghua. edu. cn