

外差激光干涉测长非线性误差的消除

侯文玫 张运波 乐燕芬 句爱松

(上海理工大学光电学院, 上海 200093)

摘要 外差激光干涉仪能够通过光波细分达到亚纳米分辨率,因而在科学研究和精密机械制造中得到了广泛应用。然而,由于光学系统中不可避免的缺陷,导致被测信号中出现一个附加的相位误差,使测到的相位移和被测长度不呈线性关系,成为现有激光干涉仪难以逾越的精度极限。为此,通过光学相位补偿理论的研究得出一种消除激光干涉仪非线性误差的方法,它可以应用在大部分科学实验和工业制造中的纳米长度测量中,而且不论是一阶或二阶误差都可以通过这个方法被消除。

关键词 激光光学;外差干涉仪;非线性误差;相位补偿;偏振片

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0908006

Elimination of the Nonlinearity of Heterodyne Displacement Interferometers

Hou Wenmei Zhang Yunbo Le Yanfen Ju Aisong

(College of Optic & Electronic Engineering, University Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract The heterodyne laser interferometer can achieve a sub-nanometer resolution on the basis of a stable subdivision of the light wavelength using phase measurement. However, due to inevitable imperfectness in optical system, a phase error occurs in the measurement signal and results in a nonlinear relation between the measured phase difference and the respective displacement. Based on the optical phase compensation theory, a significant approach is found to eliminate the nonlinearity of laser interferometer. This method can be used in most science researches and the industry precision nanometer measurement, and it is valid for nonlinearity errors whether it is a one-order or a two-order error.

Key words laser optics; heterodyne interferometer; nonlinearity; phase compensation; polarizer

OCIS codes 120.3180; 120.5050; 140.3430

1 引 言

激光的高光强度和频率稳定性使它在与一个干涉仪结合后,成为一个精密的尺度。特别是外差激光干涉仪能以简单的相位比较测量达到很高分辨率,而且结构简单、抗干扰能力强、检测方便,所以很快就成为最精密的长度测量仪器之一,在精密机械制造中得到了广泛应用。

然而,由于光学系统中不可避免的缺陷,导致被测信号中出现一个附加的周期相位误差,使测到的相位位移和被测长度呈非线性关系,所以被称作激光干涉仪的非线性误差。这个误差随着被测长度的变化以光波波长周期性变化,它存在于所有的激光

干涉仪,只是程度不同而已。在优质的激光干涉仪中可以有几纳米,特别好的可以到 1~2 nm,在一般的激光干涉仪中,10~20 nm 是常见的,甚至超过 20 nm 也是可能的。这个指标就成为现有激光干涉仪难以逾越的精度极限。

这个现象最早是由制造外差激光干涉仪的美国惠普公司^[1]于 1983 年发现的。随后,1987 年,IBM 公司对非线性误差做出了描述^[2],几乎在同时,国内也测到了这个误差,并推导出了描述非线性误差的数学模型^[3],而且两者具有相当程度的一致性。随后,出现了一种双相位检测方法,它可以精确检测外差激光干涉仪非线性误差,而且可以消除一级非线性

收稿日期: 2012-04-25; 收到修改稿日期: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51075280)和上海市教委重点学科第五期(J50505)资助课题。

作者简介: 侯文玫(1950—),女,博士,教授,主要从事精密光学测量方面的研究。E-mail: houwenmei@vip. citiz. net

性误差,使非线性误差降到纳米甚至亚纳米级^[4]。接着,许多国家都积极展开了这方面的研究,人们从不同角度去研究如何测量和减小激光干涉仪非线性的各种可能性^[5~7]。同时,也出现了用其他方法来消除这个误差。如美国标准局改双频光源为单频光源,在干涉仪的两干涉臂中分别插入声光调制器来产生两个不同频率的激光^[8],以消除频率混杂的根源。只是由于结构比较复杂而且容易影响干涉仪的稳定性,所以传统的干涉仪还是为大部分精密测量所接受。英国国家计量院、德国联邦物理技术研究院与意大利国家计量院联合研制成功白光-X光双干涉仪^[9],避开了激光干涉仪非线性周期误差,将干涉信号细分到0.19 nm。美国标准局量子处的原子分辨率测长机也采用了X光干涉仪来读取激光干涉测长条纹的小数部分。这种光电信号处理的方法排除了激光干涉非线性周期误差,但由于它的价格昂贵和操作复杂,非一般的科研和工业测量可以承受。因此,寻找一种简单而又高效的方法始终是各国学者的一个研究目标^[10~21]。本文通过光学相位补偿理论的研究得出一种新的方法,它可以通过偏振片旋转的鉴相法消除外差激光干涉测量非线性误差,而且不论是一阶或二阶误差,都可以通过这个方法被消除。

2 外差干涉仪的非线性误差

所谓外差激光干涉仪,即指进入干涉仪的是具有一定频率差的两束不同频率的激光(见图1),它们各自走过干涉仪的一个干涉臂,从而携带有不同的光学相位信息,当两束激光再度会合时,形成拍频干涉测量光信号 I_M ,令其与参考信号 I_R 进行相位比较,则可得到相位差 $\Delta\varphi$ 和被测位移长度 Δl 的线性关系。因为外差激光干涉仪的优点是仅对拍频分量感兴趣,即通过两拍频干涉信号之间的相位比较进行测量,其他的光频分量作为接收信号的基频分

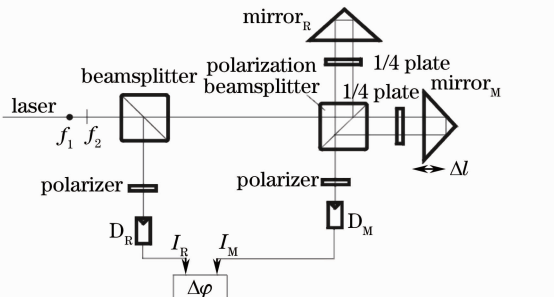


图1 外差干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of heterodyne interferometer

量,不计入相位比较。所以,在不考虑光传输中其他因素的影响下,光接收信号可以被表达为拍频干涉信号的函数:

$$I_R = A_{0R} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0R}], \quad (1)$$

$$I_M = A_{0M} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0M} + \Delta\varphi], \quad (2)$$

式中 A_{0R} 和 A_{0M} 是干涉信号幅值, φ_{0R} 和 φ_{0M} 是初始相位, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (L_1 - L_2)2\pi/\lambda$, L_1 和 L_2 是两干涉臂长,并且设 $L_1 - L_2 = \Delta l$ 。通过比较 I_M 和 I_R 的相位可以得到 $\Delta\varphi$:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi. \quad (3)$$

式中 λ 为激光中心频率。

当电信号的相位比较达到 0.1° 以下,对于图1的干涉仪,光波细分可以达到 $\lambda/7200$,也就是说被测位移长度的分辨率可达0.09 nm。从理论上说,电信号的相位细分能力是无限的,所以光波的细分理论上也可以达到无限,从而实现纳米或者亚纳米测量就毫无问题了。

然而实际上并不这样简单。因为任何光学系统都不可能做到完美无缺,例如激光光源和各种光学零件总会与理论值有一定偏差,激光干涉仪的装调也总是有一定误差,这样进入干涉仪的干涉臂中的激光就会不像理论上假设的那样只是单纯的一支具有单一频率的激光,而是也会混进另一支频率的激光。

如图2所示,用 x 和 y 代表进入两不同干涉臂 L_1 和 L_2 的偏振方向,通过干涉仪两个干涉臂光路 L_1 和 L_2 中的激光可以表达为

$$\begin{cases} E_x = E_{1x}(f_1) + E_{2x}(f_2) \\ E_y = E_{1y}(f_1) + E_{2y}(f_2) \end{cases}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} E_{1x}(f_1) = a \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1) \\ E_{2x}(f_2) = d \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{02} + \sigma + \varphi_1) \\ E_{1y}(f_1) = b \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{01} - \varepsilon + \varphi_2) \\ E_{2y}(f_2) = c \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2) \end{cases}, \quad (5)$$

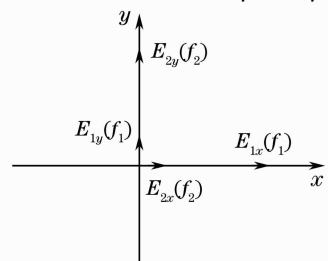


图2 外差干涉仪中光矢量分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the beam components in the heterodyne interferometer

a, b, c, d 是光的幅值, ϵ 和 σ 表示初始附加相位移, φ_1 , φ_2 是光分别通过两干涉臂 L_1 和 L_2 的相位移。于是, 由光电传感器 D_M 接收的干涉测量信号 I_M 为

$$I_M = E_1(f_1)E_2(f_2) = A^* C^* \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1 - \rho) \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2 + \eta) = A_{0M}^* \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0M} + \Delta\varphi - \gamma], \quad (6)$$

式中

$$\rho = \arctan\left[\frac{b \sin(\Delta\varphi + \epsilon)}{a + b \cos(\Delta\varphi + \epsilon)}\right], \quad (7)$$

$$\eta = \arctan\left[\frac{d \sin(\Delta\varphi + \sigma)}{c + d \cos(\Delta\varphi + \sigma)}\right], \quad (8)$$

$$A^* = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\varphi + \epsilon)}, \quad (9)$$

$$C^* = \sqrt{c^2 + d^2 + 2cd \cos(\Delta\varphi + \sigma)}, \quad (10)$$

$$\gamma = \rho + \eta. \quad (11)$$

$A_{0M}^* = A^* C^*$, 这是由相位误差 γ 调制的干涉测量信号 I_M 幅值。

(6)~(10)式是在文献[4]的基础上推导出来的。可以看出, 干涉光路中的混频导致拍频干涉信号出现一个附加的相位误差 γ , 它随着被测相位差 $\Delta\varphi$ 的变化而周期变化, 使测到的相位位移 $\Delta\varphi$ 与被测长度 Δl 呈非线性关系, 即

$$\Delta l = \frac{\lambda}{4\pi}(\Delta\varphi + \gamma). \quad (12)$$

$\pm \gamma_{\max}$ 是相位非线性误差的最大值, 它存在于所有激光干涉仪, 只是程度不同而已。这个相位-位移响应的非线性误差限制了现有激光干涉仪的有效分辨率。

3 自动消除激光干涉仪非线性误差的检测方法

很显然, 如果能令 γ 成为 0 或者常数, 就可以消除激光干涉仪的非线性误差。而事实证明, 企图把激光器和干涉仪做得完美, 使得 $b=0, d=0$ 的设想在大部分情况下是不现实的, 所以解决问题的关键是要建立新的理论基础。根据偏振光学的原理, 通过光路变换, 找到一个与 $\Delta\varphi$ 相位相反的相位移, 这样使得(6)式中的 γ 成为 0 或者常数, 从而可以消除激光干涉仪非线性误差。图 3 就是在这个理论思想指导下设计的检测方法。

与图 1 相比较, 图 3 的测量光输出有一个不同之处, 即在偏振片 P_M 前增加了一个 1/4 波片, 这样, 两束经过测量反射镜和参考反射镜的正交线偏振干涉光在偏振分光镜会合后, 经过 1/4 波片(波片快轴与光振动方向成 45° , 见图 4), 便成为两个旋转

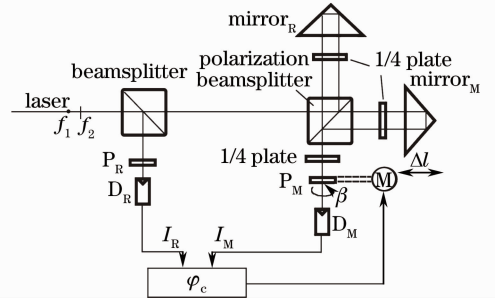


图 3 外差干涉仪非线性补偿消除原理图

Fig. 3 Schematic diagram of nonlinearity-free detection in heterodyne interferometer

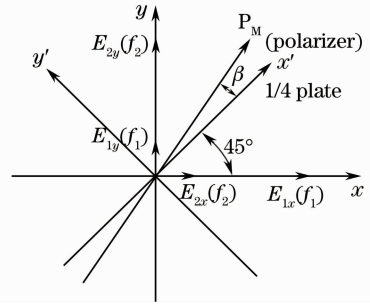


图 4 非线性补偿外差干涉仪的光矢量分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram with the beam components in the heterodyne interferometer with nonlinearity-free detection

方向相反、频率不同的圆偏振光, 它们合成为一个旋转的线偏振光, 其旋转频率为拍频频率 $(f_1 - f_2)$, 它与参考信号相比, 仅有一个相位差, 当改变偏振片 P_M 的检偏轴位置时, 就会改变这个相位差。

如图 4 所示, 令偏振片的检偏轴位置与波片慢轴的夹角为 β , 则测量信号为

$$I_M = (E_{x'} \cos \beta + E_{y'} \sin \beta)^2, \quad (13)$$

式中

$$E_{x'} \cos \beta + E_{y'} \sin \beta = \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x}(f_1) & E_{2x}(f_2) \\ E_{1y}(f_1) & E_{2y}(f_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} = A'^* \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1 - \beta - \rho) + C'^* \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2 + \beta + \eta). \quad (14)$$

因此

$$I_M = (E_{x'} \cos \beta + E_{y'} \sin \beta)^2 = A'^* C'^* \sin(2\pi f_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1 - \beta - \rho) \times \sin(2\pi f_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2 + \beta + \eta) = A'_{0M}^* \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0M} + \Delta\varphi - 2\beta - \gamma], \quad (15)$$

式中 $A'_{0M}^* \propto A'^* C'^*$, 并且

$$A'^* = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\varphi - 2\beta + \epsilon)}, \quad (16)$$

$$C'^* = \sqrt{c^2 + d^2 + 2cd \cos(\Delta\varphi - 2\beta + \sigma)}. \quad (17)$$

可以看到,利用这个装置,参考信号 I_R 还保持原有形式如(1)式,而测量信号 I_M 的相位不仅随测量臂的光程差 $\Delta\varphi$ 变化,而且也取决于偏振片的检偏轴位置 2β ,则(2)式改变为(15)式。

而 γ 转换为一个非常有趣的形式:

$$\gamma = \rho + \eta = \arctan\left[\frac{b\sin(\Delta\varphi - 2\beta + \epsilon)}{a + b\cos(\Delta\varphi - 2\beta + \epsilon)}\right] + \arctan\left[\frac{d\sin(\Delta\varphi - 2\beta + \sigma)}{c + d\cos(\Delta\varphi - 2\beta + \sigma)}\right]. \quad (18)$$

(18)式清楚地表明,如果 $2\beta = \Delta\varphi$,则 γ 为常数或者为 0(当 $\epsilon = \sigma = 0$)。为此,令偏振片 P_M 的检偏轴位置随 $\Delta\varphi$ 变化,保持 $2\beta = \Delta\varphi$,也就是说,令偏振片 P_M 旋转,使得测量信号与参考信号的相位差保持常数(或者为 0),则由(1)和(15)式得出

$$\varphi_{0M} + \Delta\varphi - 2\beta - \gamma - \varphi_{0R} \equiv \varphi_c. \quad (19)$$

式中 φ_{0M} 和 φ_{0R} 是恒定初始相位差, φ_c 代表一个恒定的相位输出,即控制偏振片 P_M 的旋转,使得测量信号 I_M 和参考信号 I_R 的相位差输出为恒定值 φ_c 。很明显,能使(18)和(19)式同时满足的唯一条件为

$$\Delta\varphi - 2\beta \equiv 0. \quad (20)$$

如果同时测出偏振片 P_M 的旋转角度 2β ,就可以测出 $\Delta\varphi$ 。目前测量旋转角度的技术可以轻易地达到 0.1° 以下,这样就可以得到没有非线性误差的 $\lambda/3600$ 以下的光波细分,也就是亚纳米以下的光波细分。

这个理论的可行性也可以通过下述测量过程来证明。首先,在零点位置,即位移起始位置,测量信号 I_M 和参考信号 I_R 的相位差是一个任意值 φ_c ,或者通过控制偏振片 P_M 的旋转设定 I_M 和 I_R 的相位差为一个任意 φ_c (常数或 0)。则有

$$\varphi_{0M} + \Delta\varphi_0 - 2\beta_0 - \gamma_0 - \varphi_{0R} = \varphi_c, \quad (21)$$

并且

$$\gamma_0 = \arctan\left[\frac{b\sin(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \epsilon)}{a + b\cos(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \epsilon)}\right] + \arctan\left[\frac{d\sin(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \sigma)}{c + d\cos(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \sigma)}\right], \quad (22)$$

式中 $\Delta\varphi_0$ 是在零点位置时干涉臂和测量臂的初始相位差,而 β_0 是在零点位置时偏振片检偏轴的初始位置。 γ_0 是在零点位置由光程差 $\Delta\varphi_0$ 和 $2\beta_0$ 产生的干涉仪非线性误差。

当测量镜位移引起光程差 $\Delta\varphi$ 时,随之被控制的偏振片旋转角度 β 随 $\Delta\varphi$ 变化,使得测量信号 I_M 与参考信号 I_R 的相位比较值始终保持为 φ_c ,这时干涉臂和测量臂的光程差为 $\Delta\varphi_0 + \Delta\varphi$,偏振片 P_M 的旋转角度为 $\beta_0 + \beta$,而这时的非线性误差 γ 则与

$(\Delta\varphi_0 + \Delta\varphi) - 2(\beta_0 + \beta)$ 相关,则

$$\varphi_{0M} + \Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \Delta\varphi - 2\beta - \gamma - \varphi_{0R} \equiv \varphi_c, \quad (23)$$

而且

$$\gamma_0 = \arctan\left[\frac{b\sin(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \Delta\varphi - 2\beta + \epsilon)}{a + b\cos(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \Delta\varphi - 2\beta + \epsilon)}\right] + \arctan\left[\frac{d\sin(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \Delta\varphi - 2\beta + \sigma)}{c + d\cos(\Delta\varphi_0 - 2\beta_0 + \Delta\varphi - 2\beta + \sigma)}\right]. \quad (24)$$

由(21)式和(23)式可得

$$\Delta\varphi - 2\beta - \gamma + \gamma_0 \equiv 0. \quad (25)$$

显然,能使(22)、(24)和(25)式同时满足的唯一条件为

$$\Delta\varphi - 2\beta \equiv 0. \quad (26)$$

这就意味着

$$2\beta \equiv \Delta\varphi, \quad \gamma \equiv \gamma_0. \quad (27)$$

换句话说,上述方法其实就是一个相位补偿的方法。也就是说,用测量信号 I_M 与参考信号 I_R 的相位比较输出作为反馈信号来控制偏振片 P_M 的旋转角度 β ,来补偿干涉相位差 $\Delta\varphi$ 。因此,只要控制偏振片的旋转角度 β 随 $\Delta\varphi$ 变化,使得测量信号 I_M 与参考信号 I_R 的相位比较值始终保持为 φ_c ,也就是使光电接收器 D_M 接收的干涉测量信号相对参考信号的相位变化始终是 $\Delta\varphi_0 - \beta_0$,从而 γ 始终等于 γ_0 ,则 $\Delta\varphi$ 的任何变化都可以通过 2β 测出,而不包含非线性误差 γ 。

实际上,利用偏振片的旋转实现鉴相的方法在 20 世纪 80 年代就由郭彦珍^[22]在单频激光干涉仪中应用过,但在那时,对激光干涉仪非线性误差的研究还没有开始,远远认识不到这方面的意义。90 年代初,德国联邦物理技术研究院和蔡司公司合作,将这种方法应用在双频激光干涉仪中,但是偏振片的旋转装置是装在参考信号这边,所以产生不了与 $\Delta\varphi$ 相位相反的相位移,因而同样存在着无法消除的激光干涉仪非线性误差^[23]。图 3 的方法是在相位补偿的思想指导下,推导出了(15)和(18)式,从而实现了外差干涉仪非线性误差的排除。

4 实验研究

图 5 展示了两组外差激光干涉仪非线性误差的测试数据。两组测量数据都采用了图 3 的测量装置,区别仅是不同的鉴相方法。图 5(a)的测试采用传统方法,即不旋转偏振片 P_M ,直接比较 I_M 和 I_R 的相位差。图 5(b)的测试采用了本文提出的利用

偏振片 P_M 旋转补偿相位的的方法(见图 3)。

在两组测试中利用了同样的激光头、同样的干涉光路、同样的纳米定位台和同样的光电接收器,在两组测量切换时,没有任何光路改变或光路调整,这意味着,在两组测试过程中,进入干涉仪两干涉臂中

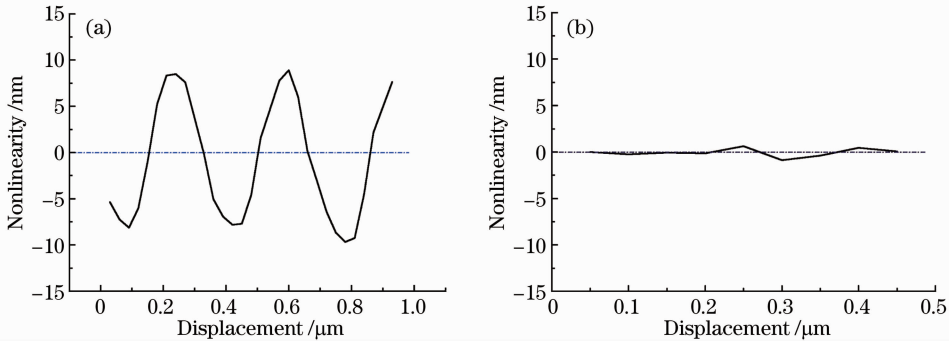


图 5 外差激光干涉仪非线性误差的测试数据。(a)不旋转偏振片;(b)旋转偏振片

Fig. 5 Nonlinear errors detected without phase compensation by rotating polarizer (a) and with phase compensation by rotating polarizer (b)

实验中的测量反射镜装在德国 PI 公司出品的纳米定位台 P-517RCD 上。就该实验目的来说,纳米定位台的位移线性度远远比位移精确度重要,因为这里不需要精确判断位移长度,只要在一个以上的干涉测量周期内消除非线性误差,就可以证明上述理论的正确性。P-517RCD 的定位范围是 100 μm,全范围的非线性偏差通常在 10 nm 以下。实验中使用的这个台子达到 5 nm 以下。因此,对于要求的一个干涉周期(即半个波长)来说,非线性偏差远小于亚纳米,足以满足实验要求。

需要指出的一点是,造成外差干涉仪非线性误差的主要原因是入射激光的椭圆化、非正交性、光学件的缺陷以及光路调整误差等,在所有这些情况下,干涉臂中两混频分量的偏振方向在同一方向,上述理论和方法都是适用的。不过,还有一种引起外差干涉仪非线性误差的原因是偏振分光镜的漏光,这时,干涉臂中两混频分量的偏振方向正交,因而上述理论和方法不适用。但通常在干涉仪中,光一般至少要两次通过偏振分光镜,而且偏振分光镜的漏光一般都在 10^{-2} 以下,这样,总的漏光则在 10^{-4} 以下,由此引起的非线性误差在千分之一纳米以下,可以忽略不计。

5 结 论

给出了新的理论(15)和(18)式,提供了一种简单有效的排除外差干涉仪非线性误差的方法,并通过实验得到证明。对于消除激光干涉仪非线性误差

的激光混频程度也是同样的,也就是说,两组测试存在同样程度的非线性误差。但是图 5 清楚地展示了不同的测试结果。图 5(a)中的非线性误差约为 15 nm,而在图 5(b)中,非线性误差几乎全部被消除了。这个结果清楚地验证了上述理论的正确性。

这个难题来说,解决问题的关键技术转化为鉴相精度和角度测量精度。这两项技术目前都已经比较成熟,精度可以达到很高,而且,利用这个方法,在测量过程中只需要对一个固定相位点 φ_c 鉴相,不像通常的相位细分需要在全周期 360° 进行,因此,鉴相容易达到更高精度。特别是,这个新技术不改变现有的激光干涉仪的结构,只是对信号处理系统做一些改变,所以它能够在大部分科研和精密工业测量中得到应用。

不过,由于机械旋转速度的限制,一般来说,偏振片的旋转测量速度不可能太高,所以这个方法有一个缺点,即不适应快速测量。但这可以通过混合鉴相来解决,即整数计数利用通常的电子计数方法,因为整数计数没有非线性误差的问题,小数部分利用旋转偏振片的相位补偿方法,这样就可以做到,既能快速测量,又能高精度鉴相。

参 考 文 献

- 1 R. C. Quenelle. Nonlinearity in interferometric measurements [J]. *Hewlett-Packard J.*, 1983, **34**(4): 10
- 2 N. Bobroff. Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13): 2676~2682
- 3 Hou Wenmei, Qiu Huifu. The effect of elliptical polarization of Zeeman laser on heterodyne phase measurement interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1988, **9**(3): 199~202
侯文玫, 裘惠孚. 塞曼激光的偏振椭圆化对外差式交流比相干涉仪的影响[J]. 计量学报, 1988, **9**(3): 199~202
- 4 Wenmei Hou, Guenter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 1992, **16**(2): 91~98
- 5 C. Y. Yin, G. L. Dai, Z. X. Chao *et al.*. Determining the

- residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(8): 1361~1365
- 6 J. A. Stone, L. P. Howard. A simple technique for observing periodic nonlinearities in Michelson interferometers[J]. *Precision Engineering*, 1998, **22**(4): 220~232
- 7 A. Yacoot, M. J. Downs. The use of X-ray interferometry to investigate the linearity of the NPL differential plane mirror optical interferometer[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2000, **11**(8): 1126~1130
- 8 J. Lawall, E. Kessler. Michelson interferometry with 10 pm accuracy[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71**(7): 2669~2676
- 9 G. Basile, P. Becker, A. Bergamin *et al.*. Combined optical and X-ray interferometry for high-precision dimensional metrology [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 2000, **456**(1995): 701~729
- 10 S. J. A. G. Cosijns, H. Haitjema, P. H. J. Schellekens. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. *Precision Engineering*, 2002, **26**(4): 448~455
- 11 C. M. Wu. Periodic nonlinearity resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry [J]. *J. Opt. Commun.*, 2003, **215**(1-3): 17~23
- 12 T. L. Schmitz, D. Chu, L. Houck III. First-order periodic error correction validation for constant and non-constant velocities with variable error magnitudes[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2006, **17**(12): 3195~3203
- 13 Ning Zhigao, Cheng Zhaogu, Gao Haijun. Error analysis of frequency mixing for heterodyne interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 852~855
 宁志高, 程兆谷, 高海军. 外差干涉仪混频误差分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 852~855
- 14 Wenmei Hou. Optical parts and the nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Precision Engineering*, 2006, **30**(3): 337~346
- 15 Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yubin *et al.*. Influence of metal-coated mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipsometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 439~443
 邓元龙, 李岳峙, 吴玉斌等. 金属反射镜对外差干涉椭圆测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 439~443
- 16 Liu Binbin, Yuan Yonggui, Wang Xinxing *et al.*. Real time nonlinearity error correction method of polarizing laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2585~2589
 刘彬彬, 苑勇贵, 王新星等. 偏振激光干涉仪的非线性误差实时校正方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2585~2589
- 17 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometric[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1281~1285
 陈洪芳, 丁雪梅, 钟志等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1281~1285
- 18 Li Liyan, Wu Bing, Yuan Yonggui *et al.*. Research on nonlinear error compensation method for single-frequency laser interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0726003
 李立艳, 吴冰, 苑勇贵等. 单频激光干涉仪非线性误差补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0726003
- 19 J. B. Tan, H. J. Fu, P. C. Hu *et al.*. A laser polarization state measurement method based on the beat amplitude characteristic [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2011, **22**(8): 085302
- 20 V. Korpelainen, J. Seppä, A. Lassila. Design and characterization of MIKES metrological atomic force microscope [J]. *Precision Engineering*, 2010, **34**(4): 735~744
- 21 K. N. Joo, J. D. Ellis, E. S. Buise *et al.*. High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 1159~1165
- 22 Guo Yanzhen. Phase subdivision accuracy of polarizing laser interferometer and its application [J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 1983, (6): 7~12
 郭彦珍. 激光偏振干涉相位细分精度及其应用[J]. *宇航计测技术*, 1983, (6): 7~12
- 23 F. Reinboth, G. Wilkening. Optische phasenschieber für zweifrequenz-laser-interferometrie[J]. *PTB-Mitteilungen*, 1983, **93**(3): 168~174

栏目编辑:何卓铭