

激光与光电子学进展

外差干涉仪非线性误差补偿抑制与 测量研究进展

张鹏, 崔建军*

中国计量科学研究院几何量计量科学研究所, 北京 100029

摘要 由于存在周期性的非线性误差, 外差激光干涉仪的测量精度很难提高。对此, 首先分析了外差激光干涉仪中非线性误差的来源, 包括频率混叠、偏振混叠与鬼影虚反射。然后讨论了非线性误差的补偿与抑制技术, 包括干涉信号处理、传统结构改进、偏振光空间分离、调相双零差干涉, 接着介绍了非线性误差的测量技术, 包括干涉信号处理测量、双相位差分检测、法布里-珀罗干涉仪检测。最后对非线性误差的补偿、抑制和测量技术做了总结与展望, 为相关领域的研究提供了参考与借鉴。

关键词 测量; 外差干涉; 非线性误差; 误差补偿; 非线性测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1100003

Research Progress in Nonlinear Error Compensation Suppression and Measurement of Heterodyne Interferometer

Zhang Peng, Cui Jianjun*

Institute of Geometric Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract Due to the periodic nonlinear error, the measurement accuracy of heterodyne laser interferometer is difficult to improve. In this regard, this paper first analyzes the sources of nonlinear errors in heterodyne laser interferometers, including frequency aliasing, polarization aliasing, and ghost ghosting. Second, it discusses nonlinear error compensation and suppression techniques, including interference signal processing, traditional structure improvement, space separation of polarized light, and phase modulation dual-homodyne interference, and then introduces the measurement technology of nonlinear error, including interference signal processing measurement, dual-phase differential detection, and Fabry-Perot interferometer detection. Finally, it summarizes and prospects the compensation, suppression, and measurement technology of nonlinear error, which provides reference for research in related fields.

Key words measurement; heterodyne interferometers; nonlinear error; error compensation; nonlinear measurement

OCIS codes 120.3180; 130.4310; 120.1880

1 引 言

“没有测量就没有科学”, 激光干涉仪以光波长

为测量尺度, 具有超高分辨率的测量能力, 是测量领域中最精密的测量仪器之一。外差激光干涉仪作为激光干涉仪中的一种, 将位移带来的相位变化

收稿日期: 2020-09-20; 修回日期: 2020-09-30; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675497)、北京市自然科学基金面上项目(3162034)、国家重点研发计划专项项目(2017YFF0206305)、中国计量科学研究院重点领域基本科研项目(AKYZD1804-1)

*E-mail: ycuijj@163.com

蕴藏在交流信号中,通过简单的相位比较便可以得到相应的位移,受噪声的影响小,从而不易受环境的影响,抗干扰能力强,能实现很高的分辨率,在现代工业测量领域得到了广泛的应用。近年来外差激光干涉仪正在向着高分辨率、高精度、高测速等方向发展^[1]。

随着工业的发展,制造精度越来越高,相应的测量精度也越来越高,因此就需要更高精度的测量仪器。外差激光干涉仪作为测量领域中最精密的测量仪器之一,却存在着周期性的非线性误差^[2],这些非线性误差可以达到几纳米,甚至可以达到几十纳米,使得外差干涉仪的精度只能达到纳米级别,渐渐满足不了相应测量的需求,例如在集成电路工业中的晶圆键合、掩模等工艺流程的测量需求。此外国际上也已经出现了其他具有亚纳米精度的测量仪器,例如纳米光栅,其精度达到 0.3 nm。这些纳米测量仪器、原子力显微镜 (AFM) 等对其进行计量与溯源时,都需要更高精度的皮米级干涉仪。对于这些测量需求,一方面人们想通过 X 射线和原子晶格实现微纳尺寸的溯源,但是原子晶格的测量最终还是需要溯源到激光波长上,才能实现量值统一。另一方面如果提升干涉仪精度到皮米量级,则也能解决纳米尺寸的测量问题,而且采用激光干涉仪测量,较原子晶格具有直接溯源的优势,应用的范围和领域更广泛。对此虽然一些新型干涉仪被制造出来,例如一种白光-X 光干涉仪^[3],可将干涉信号细分到 0.19 nm,但是新型干涉仪造价高昂,而且操作复杂,给测量带来很大的不便。因此如何减小外差干涉仪非线性误差就成为其中关键的因素。而要

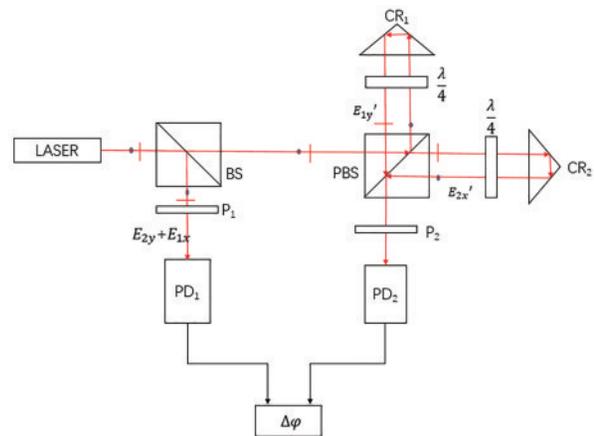
检验干涉仪的非线性误差大小,就必须解决非线性误差的准确计量问题。

2 外差干涉仪测量原理

外差干涉仪的原理如图 1 所示,激光源产生两束不同频率正交偏振的激光,即

$$\begin{cases} E_{1x} = 2A \cos(\omega_1 t + \varphi_{01}) \\ E_{2y} = 2B \cos(\omega_2 t + \varphi_{02}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: E_{1x} 是振幅为 $2A$ 、频率为 ω_1 、相位为 φ_{01} 、 x 方向偏振的激光; E_{2y} 是振幅为 $2B$ 、频率为 ω_2 、相位为 φ_{02} 、 y 方向偏振的激光。



BS: beam splitter; PBS: polarization beam splitter; CR1、CR2: completely reflecting mirror; λ/4: quarter wave plate; P1、P2: polarizer; PD1、PD2: photodetector

图 1 外差干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of heterodyne interferometer

激光束经过分光镜 BS,分成两束光,一路光经过偏振片 P1 后干涉形成拍频信号,被光电探测器 PD1 接收,参考信号 I 表示为

$$I = A^2 + B^2 + 2AB \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_{01} - \varphi_{02})] = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\omega t + \Delta\varphi_0], \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 为频率差; $\Delta\varphi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ 为初始相位差; $I_1 = A^2$ 、 $I_2 = B^2$ 为光强。另一路光经过偏振分光镜 PBS 后,正交偏振光分离。频率为 ω_1 的光进入测量臂,由测量反射镜 CR1 反射,产生相应的相移 φ_1 ; 频率为 ω_2 的光由参考反射镜 CR2 反射,产生相应的相移 φ_2 ,两束不同频率的光两次通过 1/4 波片,偏振方向改变 90°,则

$$\begin{cases} E'_{1y} = A \sin(\omega_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1) \\ E'_{2x} = B \sin(\omega_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: E'_{1y} 为测量臂反射回的 y 方向偏振的激光; E'_{2x} 为参考臂反射回的 x 方向偏振的激光。反射回的两束光经过偏振分光镜后会聚,再通过偏振片 P2 后发生干涉,形成拍频信号,被探测器 PD2 接收,测量信号 I' 表示为

$$I' = A^2 + B^2 + 2AB \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_{01} - \varphi_{02}) + \varphi_1 - \varphi_2] = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[\Delta\omega t + \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi], \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, 为测量信号的相位差。将测量信号与参考信号进行比对,测量两交流信号的相位

差 $\Delta\varphi$, 之后根据下式便可以求得测量反射镜 CR1 相应的位移 l 。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}nl, \quad (5)$$

式中： λ 为激光波长(当两束激光频率相差不大时，可认为其相等，即 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$)； n 为测量臂折射率； l 为待测位移。

3 非线性误差的来源

外差干涉仪采用偏振方向不同的两束不同频率的光来进行干涉测量，得到交流信号，通过分析交流信号的相位便可以得到相应的测量位移，而外差干涉仪的非线性误差就是在交流信号中加入了周期性的相位误差，从而在最终结果中引入了一个非线性误差。非线性误差最早是在 1974 年由 Bruning 及其团队发现，但是当时并没有引起人们的注意。1983 年，美国 HP 公司的 Quenelle 对光学非线性误差进行了定义^[4]。在这之后，各国学者才逐渐重视起非线性误差并对其开展研究，在非线形误差的产生、测量与抑制方面取得了众多

成果^[5-9]。

引起非线性误差的原因有很多，归纳起来，第一个是频率混叠，在理想的外差激光干涉仪中，测量臂和参考臂的两路光的频率是单一的，而在实际的外差干涉仪中，由于激光源的不理想，使得发出的激光呈椭圆偏振化或者非正交化，装配时激光束的光轴与偏振分光镜的分光轴或者波片的快轴(慢轴)未对准，会导致外差干涉仪测量臂和参考臂中混叠了另一频率的光，形成频率混叠，从而给干涉仪带来非线性误差。

第二个是偏振混叠，理想的偏振分光镜能够将两束正交偏振光完全分开，但是光学元件不可能都是完美的。由于偏振分光镜的不理想，导致两正交偏振光没能完全分开，测量臂和参考臂偏振光中混叠了另一偏振态的光束，造成偏振混叠，从而给干涉仪带来非线性误差。

在这两者的影响下，经过相应的计算，忽略掉初始相位误差，测得交流拍频信号为

$$I' \propto ab \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) + (ad + bc)\cos(\Delta\omega t) + cd \cos(\Delta\omega t - \Delta\varphi) = \Gamma_0 \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) + \Gamma_1 \cos(\Delta\omega t) + \Gamma_2 \cos(\Delta\omega t - \Delta\varphi), \quad (6)$$

式中： a 、 b 、 c 、 d 为因频率混叠和偏振混叠造成的光振幅； $\Gamma_0 = ab$ ， $\Gamma_1 = [(ad + bc)/ab]$ ， $\Gamma_2 = (cd/ab)$ 。

将其各项合并在一起并考虑到初始相位误差 ϵ 、 σ 的拍频信号，则(6)式可以改写为

$$I' \propto A' \sin(\omega_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1 - \rho) + B' \sin(\omega_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2 + \eta) = A'B' \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi - \gamma), \quad (7)$$

式中： $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ； $\Delta\varphi_0 = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ 。

$$A' = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\varphi + \epsilon)}, \quad (8)$$

$$B' = \sqrt{c^2 + d^2 + 2cd \cos(\Delta\varphi + \sigma)}, \quad (9)$$

$$\rho = \arctan \left[\frac{b \sin(\Delta\varphi + \epsilon)}{a + b \cos(\Delta\varphi + \epsilon)} \right], \quad (10)$$

$$\eta = \arctan \left[\frac{d \sin(\Delta\varphi + \sigma)}{c + d \cos(\Delta\varphi + \sigma)} \right], \quad (11)$$

$$\gamma = \rho + \eta. \quad (12)$$

由上述公式可以知道，由于频率混叠与偏振混叠，引入了一个相位误差 γ ，这个 γ 与两臂光路的相位差有关，会给最后的测量结果带来非线性误差。

最后一个是光学虚反射，光学元件中有很多光学反射面，引起光束在光学元件间产生多次反射(鬼影反射)，这些多次反射光与主反射光会合干涉后会在结果中引入一个周期非线性相位，从而引起

非线性误差。

频率混叠造成的非线性误差为亚纳米到数十纳米，研究人员采用偏振正交性极好的光源极大地减小了频率混叠，将非线性误差从 3 nm 降到了 0.3 nm。偏振混叠造成的非线性误差为数皮米到亚纳米，侯文玫等^[10-12]分析提出偏振混叠造成的非线性误差在皮米量级，陈洪芳等^[13]在偏振分光镜反射率为 0.9 的情况下，将偏振分光镜透射率从 1 减小到 0.9，相应非线性误差由 0.62 nm 增大到 1.24 nm，这表明若偏振分光镜的分光性能不好，所造成的非线性误差也能达到亚纳米量级。光学虚反射造成的非线性误差通常比频率混叠造成的误差小一到两个数量级，量值在数十皮米，若镜面反射率很高，也能达到数纳米^[14]。通过比较频率混叠和偏振混叠以及虚反射的形成原因与影响大小可以知道，在外差干涉仪中造成非线性误差的最主要原因是频率混叠。

4 非线性误差的补偿与抑制技术

外差干涉仪非线性误差的补偿与抑制技术,可归纳为:1)在补偿方式上,对干涉信号进行处理,通过改进传统外差干涉仪结构来对非线性误差进行补偿,可以对频率混叠、偏振混叠、光学虚反射造成的综合非线性误差进行补偿;2)在抑制方式上,采用偏振光空间分离和调相双零差干涉结构,从避免频率混叠和偏振混叠方向来对非线性误差进行抑制,从而减小非线性误差。

4.1 基于外差干涉信号处理的非线性误差补偿技术

Eom 等^[15]提出的椭圆匹配算法利用锁相放大器来对干涉信号进行处理。将接收到的参考信号

$$\Delta\varphi = \arctan\left\{\cos(\delta)/\left[\sin(\delta) + (p/q)(I_x - k)/(I_y - h)\right]\right\}。 \quad (15)$$

该方法对被测物体的运动速度没有严格要求,可以很好地对非线性误差进行校准测量,但是在进行椭圆匹配计算时,需要大量的计算,很难实现实时测量。为了对椭圆匹配算法进行改进,Wang 等^[17]采用了扩展卡尔曼滤波器^[18]来对椭圆参数进行匹配计算,并将所有模块集成在一个现场可编程逻辑门阵列(FPGA)板上,实现了实时校正恒定和非恒定速度运动的非线性误差的目标。Li 等^[19]提出了用神经网络法来处理干涉信号。

由于椭圆匹配法计算量太大,Eom 等^[20]又提出用硬件电路来对正交信号进行校正的方法,用电子相位编码系统来校正两路信号的直流偏置、不等幅误差和非正交误差,大大减小了计算量,提升了校正速度,但是非线性误差的测量存在有不错的误差。上述方法都忽略了初始相位对测量结果的影响,哈尔滨工业大学的张敏琦^[21]对此进行了改进,考虑到初始相位的影响,采用特征提取算法和数字加/减法器来消除正交信号的误差参量,大大提高非线性误差校正的精度。

4.2 基于传统外差干涉仪改进结构的非线性误差补偿技术

对激光的偏振正交性进行修正,使其偏振正交误差尽可能小,可以减少频率混叠,从而减小非线性误差。Yang 等^[22]从激光源入手,研发了一种偏振正交性良好的双折射塞曼激光器,并对将其作为光源的外差干涉仪进行了非线性误差测量,相应实验

和测量信号送入锁相放大器中,将会得到两个输出信号 I_x 与 I_y ,他们分别与拍频信号的正弦余弦成比例,再经过低通滤波,滤掉高频成分 $\Delta\omega$,最后输出下式两路带有误差的正交信号,其中 k 、 h 为直流偏置, p 、 q 不等幅误差, δ 为非正交误差,再得到含有非线性误差的相位差 $\Delta\varphi'$,即

$$\begin{cases} I_x = q \cos(\Delta\varphi + \delta) + k \\ I_y = p \sin(\Delta\varphi) + h \end{cases}, \quad (13)$$

$$\Delta\varphi' = \arctan(I_y/I_x)。 \quad (14)$$

两路信号若没有误差,则其利萨如图形应是一个圆,然而实际利萨如图形是一个椭圆,于是可用最小二乘法来进行椭圆匹配计算^[16],得到椭圆的各个参数,然后反向计算两路输出信号的参数 k 、 h 、 p 、 q 、 δ ,便可由(10)式计算实际的相位差 $\Delta\varphi$,表示为

结果表明,该干涉仪非线性误差仅为 0.3 nm。又如 Guo 等^[23]采用的干涉仪结构,如图 2 所示,在激光未进入干涉仪之前放置一个相位补偿器以此来补偿激光的非正交化,相应实验表明该结构能将波长为 1320 nm 的干涉仪的周期非线性误差从 3 nm 减小到 300 pm。这些研究表明如果能够对光源进行改进,使得光源有很好的偏振正交性,便可以极大地减小非线性误差。

对干涉信号进行调制,引入相位、调节振幅等,从整体上来对非线性误差进行补偿。例如 Fu 等^[24]

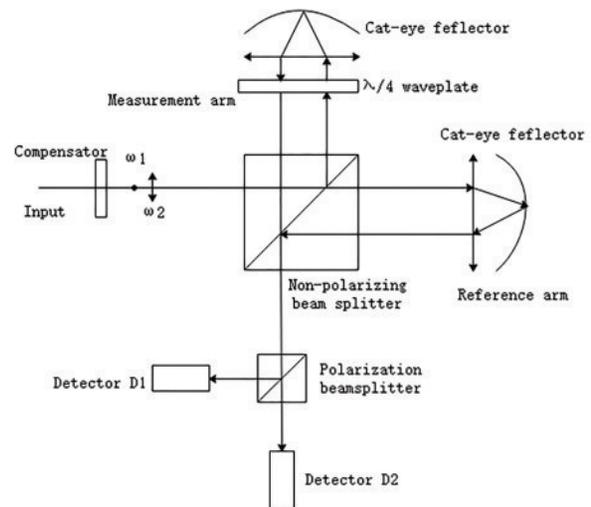


图 2 具有相位补偿器的干涉仪原理图^[23]

Fig. 2 Schematic diagram of heterodyne interferometer with phase compensator^[23]

在传统的外差干涉仪的参考臂中加入了一个可调衰减器,用以调节(10)式和(11)式中光束振幅 a 、 d 的大小,使得光束振幅 a 、 b 、 c 、 d 满足: $b/a = -d/c$, 由(8)~(12)式可以知道,该方法使得非线性相位误差 γ 的值减小,通常可以减小一个数量级。陈洪芳等^[25]通过使角锥棱镜绕其运动方向旋转来引入额外的相位,进而补偿非线性相位误差。Lu等^[26]将高消光比的偏振片放在激光源与偏振分光镜之间,然后进行

一次测量得到两个光学拍信号,来解得导致频率混叠的相应的量化参数,例如偏振分光镜的透射反射系数、激光束的椭圆角等。得到这些参数之后便可以计算出非线性误差的理想模型,从而对外差激光干涉仪进行非线性误差补偿。文献[11]中在激光未干涉之前的偏振片前放置一个1/4波片,其快轴(或慢轴)与偏振片的透光轴成一角度 β , 经过相应的计算,在最后的输出信号中加入了一个相位 2β , 即

$$I_1 \propto A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_{01} + \varphi_1 - \beta - \rho_1) + B_1 \sin(\omega_2 t + \varphi_{02} + \varphi_2 + \beta + \eta_1) = A_1 B_1 \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi - 2\beta - \gamma_1) \quad (16)$$

其中,

$$A_1 = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\varphi + \epsilon - 2\beta)}, \quad (17)$$

$$B_1 = \sqrt{c^2 + d^2 + 2cd \cos(\Delta\varphi + \sigma - 2\beta)}, \quad (18)$$

$$\rho_1 = \arctan \left[\frac{b \sin(\Delta\varphi + \epsilon - 2\beta)}{a + b \cos(\Delta\varphi + \epsilon - 2\beta)} \right], \quad (19)$$

$$\eta_1 = \arctan \left[\frac{d \sin(\Delta\varphi + \sigma - 2\beta)}{c + d \cos(\Delta\varphi + \sigma - 2\beta)} \right], \quad (20)$$

$$\gamma_1 = \rho_1 + \eta_1. \quad (21)$$

通过转动偏振片,改变 β 的大小,使得最后相位差的测量结果为一定值 φ (φ 为干涉仪两臂没有光程差时的相位差数值),此时 γ_1 也为一定值,便可以得到 $\Delta\varphi = 2\beta$, 从而对非线性误差进行补偿。

形成两路干涉信号,符号相反非线性误差抵消,从而在整体上实现非线性误差的补偿。Hou等^[27]采用的双相位差分检测方法,在干涉仪中加入了一个1/2波片和一个偏振分光镜,如图3所示,测量臂反射回的正交的线偏振光经过快轴(或慢轴)与其成45°的1/2波片,两路正交偏振光相位差增加 π , 再经过偏振分光镜被分成两路测量信号,两路信号分别发生干涉,被两个探测器接收。

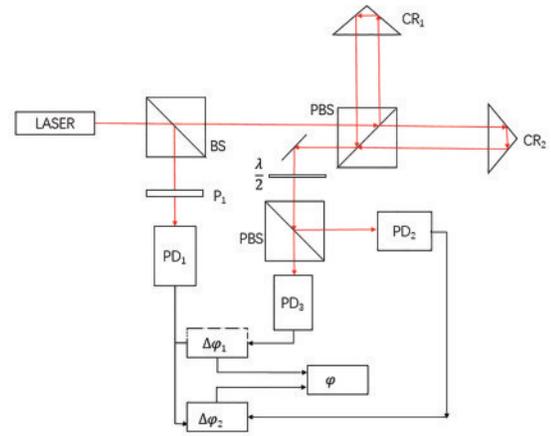


图3 外差激光干涉仪非线性误差双相位检测方法示意图^[27]
Fig. 3 Schematic diagram of dual-phase detection method for nonlinear error of heterodyne laser interferometer^[27]

$$\begin{cases} I_x' \propto A_{2x} B_{2x} \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi - \gamma_{2x}) \\ I_y' \propto A_{2y} B_{2y} \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi_0 + \Delta\varphi + \gamma_{2y}) \end{cases} \quad (22)$$

其中,

$$A_{2x} = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab \cos(\Delta\varphi + \epsilon)}, \quad (23)$$

$$B_{2x} = \sqrt{c^2 + d^2 + 2cd \cos(\Delta\varphi + \sigma)}, \quad (24)$$

$$A_{2y} = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\Delta\varphi + \epsilon)}, \quad (25)$$

$$B_{2y} = \sqrt{c^2 + d^2 - 2cd \cos(\Delta\varphi + \sigma)}, \quad (26)$$

$$\gamma_{2x} = \arctan \left[\frac{b \sin(\Delta\varphi + \epsilon)}{a + b \cos(\Delta\varphi + \epsilon)} \right] + \arctan \left[\frac{d \sin(\Delta\varphi + \sigma)}{c + d \cos(\Delta\varphi + \sigma)} \right], \quad (27)$$

$$\gamma_{2y} = \arctan \left[\frac{b \sin(\Delta\varphi + \epsilon)}{a - b \cos(\Delta\varphi + \epsilon)} \right] + \arctan \left[\frac{d \sin(\Delta\varphi + \sigma)}{c - d \cos(\Delta\varphi + \sigma)} \right]. \quad (28)$$

采用两个光电探测器分别接收两路测量信号,将两路测量信号与参考信号进行比较,得到两个相位差 $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi - \gamma_{2x}$ 与 $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi + \gamma_{2y}$, 取平均值

得到

$$\Delta\varphi' = (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) / 2 = \Delta\varphi + (\gamma_{2y} - \gamma_{2x}) / 2. \quad (29)$$

两路干涉信号产生的光学非线性误差能够相

互抵消其中一部分,由此得到被测相位,实现了非线性误差的补偿。

从原理公式出发,减小非线性误差项的系数,也可以在整体上减小非线性误差。例如 2007 年侯文攻等^[28]提出的多光路细分方法。该方法从位移测量表达式入手得到

$$l = \frac{\lambda(\Delta\varphi - \gamma)}{2\pi nN} = \frac{\lambda\Delta\varphi}{2\pi nN} - \frac{\lambda\gamma}{2\pi nN} \quad (30)$$

由(30)式可知,当增加光路细分倍数 N 时,非线性误差项 $\frac{\lambda\gamma}{2\pi nN}$ 的值就会变小,由此可以减小由 γ 所带来的非线性误差。相应的实验结果分析表明,四倍光程的干涉仪就可以将非线性误差减小到 1~2 nm。但非线性误差的减小程度有限,并不能完全消除非线性误差。

4.3 基于光束空间分离的非线性误差抑制技术

所谓光束空间分离,即不同频率的光在空间上的路径分离开来。这种方法,理论上可以从根源上消除掉频率混叠与偏振混叠,从而极大程度减小非线性误差。但是实际研究表明,空间分离型的外差干涉仪中仍然存在有很小的非线性误差,这是由于光束在光学元件中反复反射(鬼影反射)造成的。虽然仍然存在非线性误差,但是非线性误差的数值已经很小了,使得干涉仪的分辨率大大提升,有的空间分离型外差干涉仪的分辨率已经可以达到 pm 量级。为了实现不同频率的光在空间上分离开来,大都采用声光调制器(AOM)来改变激光频率,并采用偏振器件来改变激光偏振方向。这个方法被提出来以后,就陆陆续续出现了如图 4~7 所示的各种各样的空间分离型外差干涉仪^[29-33]。

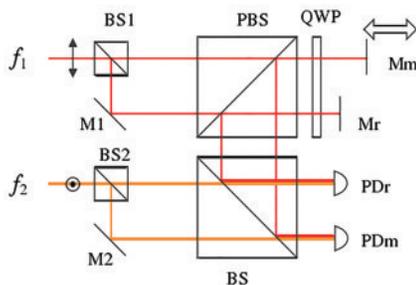


图 4 Wu-type 干涉仪原理图^[29]

Fig. 4 Schematic diagram of Wu-type interferometer^[29]

上述几种干涉仪结构虽然能够在很大程度上实现非线性误差的消除,但是由于光路结构的不对称,导致光走过的光学元器件不一致,如果干涉仪受温度的影响,那么将会导致光路之间产生附加相

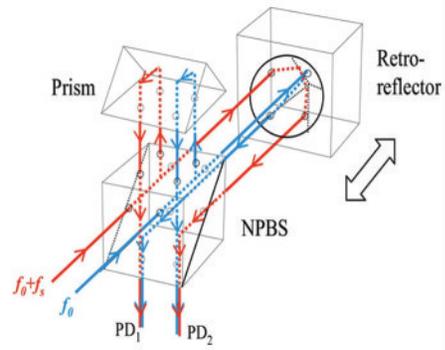


图 5 Lawell-type 干涉仪原理图^[30]

Fig. 5 Schematic diagram of Lawell-type interferometer^[30]

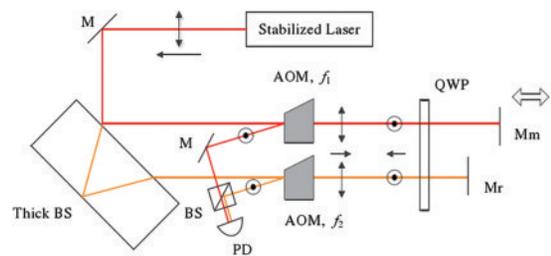


图 6 Joo-type 干涉仪原理图^[31]

Fig. 6 Schematic diagram of Joo-type interferometer^[31]

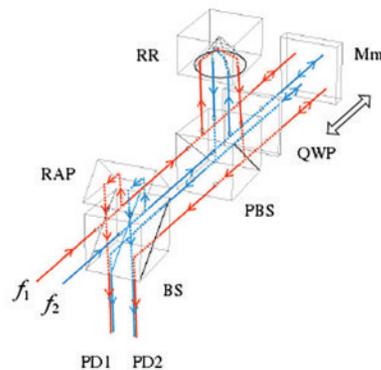


图 7 Joo-type 平面镜四细分干涉仪原理图^[33]

Fig. 7 Schematic diagram of Joo-type plane mirror four-division interferometer^[33]

位差,引起热漂移,从而带来测量误差。为了克服热漂移的影响,又对空间分离型外差干涉仪进行了相应的改进^[34-40],设计对称光路,使得光路结构高度对称,测量光束和参考光束经过的光学器件一致。采用光纤来进行送光^[41],可以让干涉仪远离激光源,减小热源的影响。在干涉光路部分,将光学元器件集成在一起,高度稳定,以抵抗机械干扰,同时减少引起鬼影反射的元件边界表面。如图 8~13 所示,这些方法进一步提升了外差干涉仪的精度。

上述可以减小热漂移影响的干涉仪结构,虽然能够在实现光束空间分离、避免非线性误差的基础

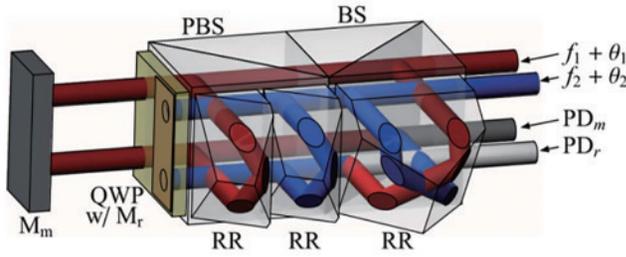


图 8 采用光纤的 Joo 型干涉仪原理图^[34]

Fig. 8 Schematic diagram of Joo-type interferometer using optical fiber^[34]

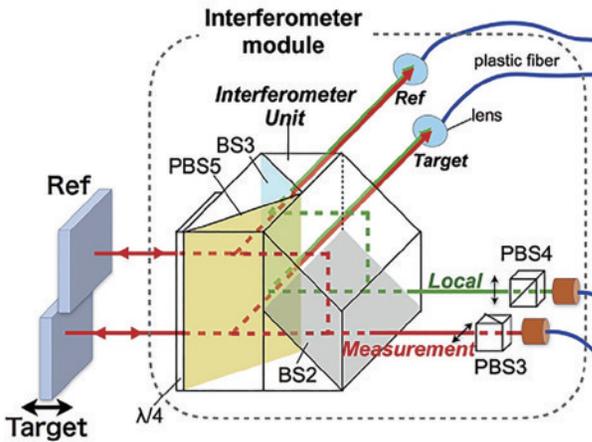
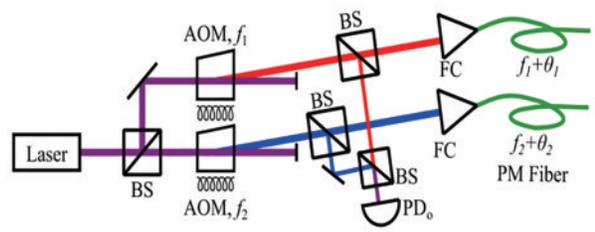


图 9 集成元器件外差干涉仪原理图^[37]

Fig. 9 Schematic diagram of heterodyne interferometer with integrated components^[37]

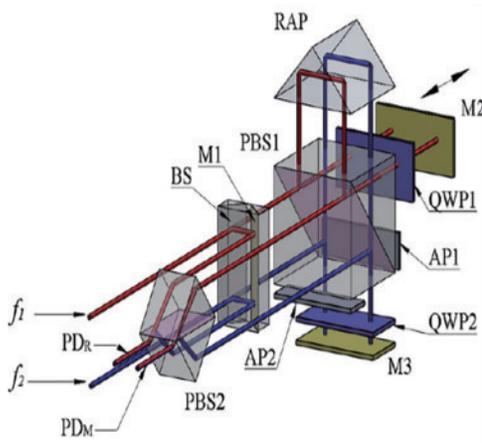


图 10 平衡平面镜外差干涉仪原理图^[36]

Fig. 10 Schematic diagram of heterodyne interferometer with balanced planar mirror^[36]

上,来减小热漂移的影响,但是同时会导致干涉仪结构变得复杂,加大了制造难度。总的来说,空间分离型外差干涉仪可以极大地抑制干涉仪的非线性误差,使外差干涉的精度得到很大的提升,但是对于鬼影虚反射造成的非线性误差仍然不能很好的抑制。

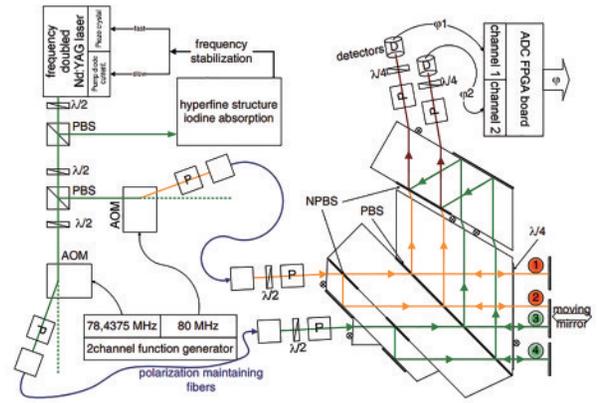


图 11 Weichert-type 干涉仪原理图^[38]

Fig. 11 Schematic diagram of Weichert-type interferometer^[38]

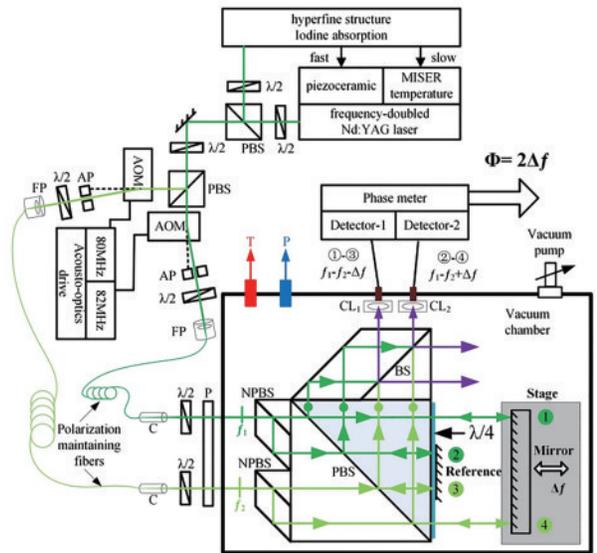


图 12 双频绿光干涉仪原理图^[40]

Fig. 12 Schematic diagram of dual-frequency green light interferometer^[40]

4.4 基于调相双零差干涉结构的非线性误差抑制技术

Yan 等^[42]采用一种调相双零差干涉结构来抑制非线性误差,如图 14 所示,单频稳定激光器发出的激光被非偏振分光镜 BS1 分为两束,一束激光直接

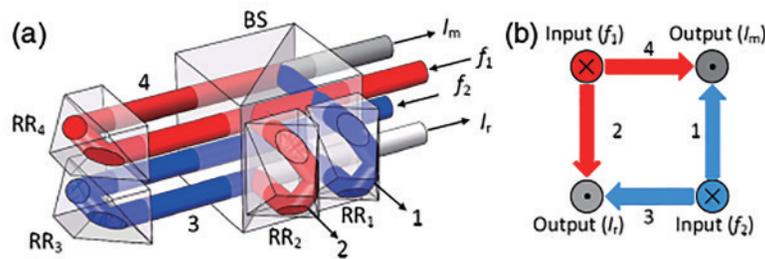


图 13 光路结构高度对称的干涉仪原理图^[35]

Fig. 13 Schematic diagram of interferometer with highly symmetric optical structure^[35]

与经过电光调制器(EOM)移相后的激光干涉,形成参考信号。另一束激光经过测量反射棱镜后与移相后的激光干涉,形成测量信号。EOM加周期性电压,直流信号变为交流信号^[43]。最后将参考信号与测量信号比相,得到相位差,从而实现外差干涉的效果。

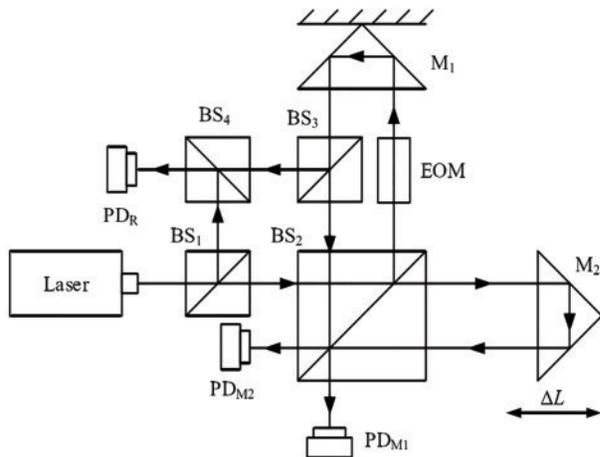


图 14 双零差干涉仪原理图^[42]

Fig. 14 Schematic diagram of dual-homodyne interferometer^[42]

该干涉仪采用双零差结构,并且没有使用偏振器件,不存在偏振带来的频率混叠和偏振混叠,从原理上抑制了干涉仪的非线性误差。相应实验表明该干涉仪能够在纳米位移实现亚纳米精度而没有非线性误差。近期该团队在此结构上对非线性的抑制研究有了新的进展,可将非线性误差减小到更小的 0.1 nm 级别。

5 外差干涉仪非线性误差的测量技术

非线性误差的补偿与抑制技术可以很大程度减小非线性误差,但是不能得到相应干涉仪的非线性误差的大小,不能得到准确的非线性误差数值,

而外差干涉仪非线性误差的测量技术从干涉信号处理检测、双相位差分检测、法布里-珀罗干涉仪检测三个方面,可得到非线性误差的数值,使得干涉仪的精度分析更深入、准确。

5.1 基于信号处理的非线性误差测量技术

对于外差干涉仪非线性误差的测量,首先是对其大小进行估计的方法。戴高良等^[44]采用幅值估算法,即用输出信号的幅值来对非线性误差进行估算。由(6)~(12)式可知,输出信号的幅值和非线性误差都受相位差 $\Delta\varphi$ 调制,让测量臂的反射镜连续运动,则测量信号就会成为相位差 $\Delta\varphi$ 的调幅信号,非线性相位误差可以表示为

$$\gamma = \rho + \eta = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (31)$$

测量得到输出信号的最大值 I'_{\max} 与最小值 I'_{\min} ,便可以得到非线性误差的估算值。

Badami等^[45]提出的频谱法,用频谱仪来对干涉仪干涉信号进行分析,得到(1)式各谐波分量的大小 $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$,通过下式进行相应的计算,便可以求得谐波分量的非线性相位误差(ϵ_1 为一阶相位误差, ϵ_2 为二阶相位误差)。

$$\epsilon_1 = (\Gamma_1/\Gamma_0)\sin(\Delta\varphi), \quad (32)$$

$$\epsilon_2 = (\Gamma_2/\Gamma_0)\sin(2\Delta\varphi). \quad (33)$$

这个方法简单快捷,但是为了测得非线性误差,必须使测量镜匀速运动,才能预测到 $\Delta\varphi$ 的大小,同时使谐波分量不会有大的跳动,然后再进行计算。Lu等^[46]采用的小波变换法,可以很好地解决非匀速运动无法测量非线性误差的问题。

基于锁相放大器, Wu^[47]采用的方法是将非线性误差转换为幅值信号来进行测量。将参考拍频信号和移相 90° 的参考拍频信号与测量拍频信号送入锁相放大器中,进行混频、低通滤波后得到幅值信号 $R(t)$,对 $R(t)$ 取误差分量幅值的最低非零阶微分即

$dR(t)$, 经过相应的公式推导可以得到非线性误差 Δl , 再进行相应的计算便可得到非线性误差的大小。

$$\Delta l = \frac{1}{N} \times |\Delta\varphi(t)| \times \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{1}{N} \times \left| \frac{dR(t)}{R(t)} \right| \times \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (34)$$

该方法很巧妙, 可以实现亚纳米级的非线性测量, 但是激光功率漂移或其他环境因素引起的解调信号的幅值波动会给非线性误差测量补偿带来误差, 而且工作带宽窄, 无法实现动态性能好且精度高的非线性测量。

有学者^[48-49]对此进行了改进, 采用双锁相放大器的非线性测试方法。用两个锁相放大器和内部参考信号以及相应的电路对干涉信号进行处理, 在保证测量精度的同时, 扩大了测试系统的工作带宽和使用范围。而且用自适应的非线性测试算法减小了幅值波动带来的误差, 实验表明该系统可以检测到 2 pm 的非线性误差, 最大测试速度可达 0.8 m/s。

基于上述 4.1 节介绍的非线性误差补偿技术, 我们也可以对非线性误差进行测量, 将得到的补偿后的相位与实际相位做差再进行换算便可以得到相应的非线性误差。

5.2 基于双相位差分检测方法的非线性误差测量技术

上述 4.2 节介绍的双相位差分检测方法在外差干涉仪中加入一个 1/2 波片和一个偏振分光镜, 使得最后两路干涉信号中的相位 $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi - \gamma_{2r}$ 与 $\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi + \gamma_{2y}$ 中含有相反符号的非线性相位误差。鉴于此, Hou^[50]提出了检测非线性误差的方法, 指出在一定条件下, 即当 $\gamma_{2r} \ll 1$ 时, 有 $\gamma_{2r} \approx \gamma_{2y} = \gamma'$, 可以由此得到干涉仪的相位误差约为 $\gamma' = (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)/2$, 再经过相应的换算便可以得到外差干涉仪的非线性误差。

5.3 基于法布里-珀罗干涉仪的非线性误差测量技术

基于法布里-珀罗(F-P)干涉仪的非线性误差测量技术, 是利用更高精度的干涉仪来对外差干涉仪的非线性误差进行测量。在国内对于干涉仪非线性误差的测量中, 中国计量科学研究院研制并发展了高精度的 F-P 干涉仪, 建立了计量标准装置, 并对激光干涉仪进行了非线性误差的测量研究^[51-55]。F-P 干涉仪测位移的工作原理不需要曲线拟合, 而是采用峰位锁定, 所以理论上无非线性, 其次 F-P 测

量输出的是激光频率, 频率与位移一一对应, 而频率测量已经达到 10^{-11} 量级, 远远优于位移测量的 10^{-7} 量级。

中国计量科学研究院的崔建军等建立了一套如图 15 的高精度拍频 F-P 激光干涉仪系统, 并且利用该系统对外差干涉仪的非线性误差进行了测量与分析^[56]。该测量方法通过将拍频 F-P 激光干涉仪的 F-P 腔 C_1 与被测激光干涉仪的动镜 C_2 结合在一起, 将其放在纳米位移台上, 驱动位移台, 则拍频 F-P 激光干涉仪与被测激光干涉仪测量的位移是同一个位移。将拍频 F-P 激光干涉仪与被测激光干涉仪测量的数据进行比较, 便可以得到被测激光干涉仪的非线性误差。

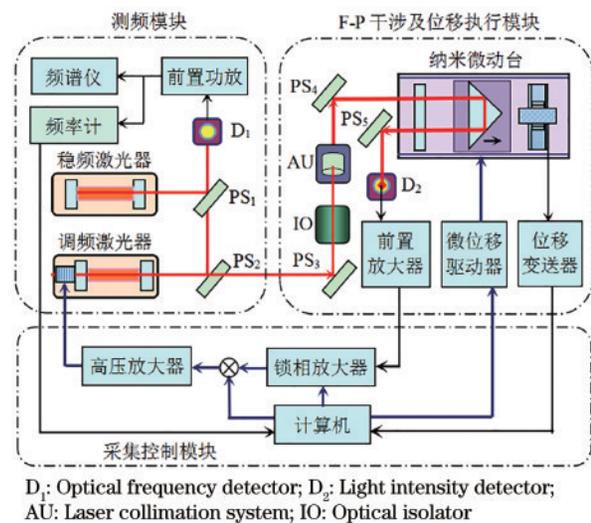


图 15 非线性误差测量系统^[52,56]

Fig. 15 Nonlinear error measurement system^[52,56]

图 16 为用拍频 F-P 激光干涉仪测量某外差激光干涉仪非线性误差的一组实验数据图, 从图中可以明显看到周期性的误差, 而且可以初步分析出其中包含着多种周期性的非线性误差。

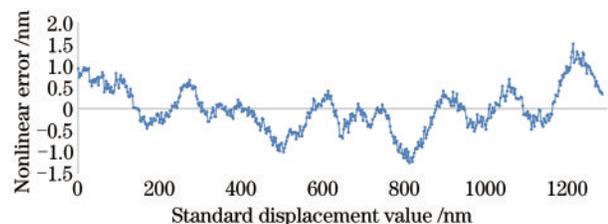


图 16 非线性误差测量数据图

Fig. 16 Data graph of nonlinear error measurement

Zhu 等^[57]建立了一套 F-P 干涉仪系统来测量外差干涉仪非线性误差。如图 17 所示, 该系统使用 Pound-Drever-Hall(PDH) 技术^[58]将扩展腔二极管

激光器锁定在 F-P 腔的谐振频率上,用锁定在光频梳(OFC)^[59]上的频率极其稳定的激光束和具有 F-P 腔谐振频率的激光形成拍频信号,从而测得 F-P 腔动镜的位移。这套系统的位移分辨率可以达到 1.96 pm,实验测得某商用外差式干涉仪的非线性误差幅度约为 4.8 nm。

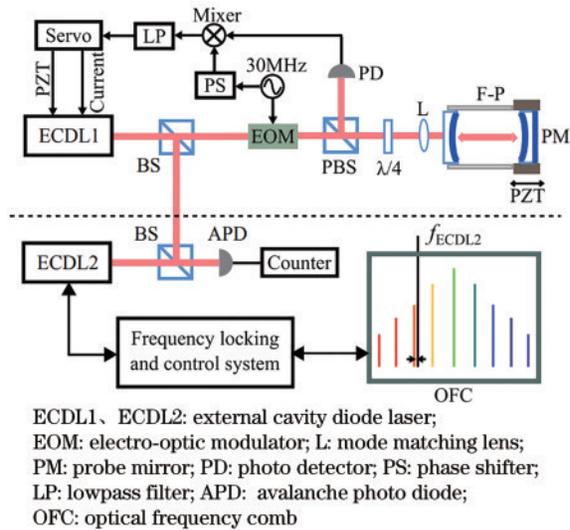


图 17 Fabry-Perot 干涉仪系统原理图^[57]

Fig. 17 Schematic diagram of Fabry-Perot interferometer system^[57]

总之,基于 F-P 干涉仪的非线性误差测量技术,可以对干涉仪各个位移的非线性误差进行测量,得到数据进行相应分析,可以解析出干涉仪的一次谐波分量和高次谐波分量,进而可以推断出干涉仪相关部件引起的非线性误差大小,这对于减小激光干涉仪非线性误差,提高精度具有重要意义。

6 结束语

首先,外差激光干涉仪的非线性误差来源复杂,是由多种因素共同作用的结果。从仪器结构、干涉信号、测量原理等方面研究非线性误差的补偿和抑制技术,能够在很大程度上减小非线性误差,这对于提升外差激光干涉仪的精度十分重要。

其次,非线性误差通过各种技术进行补偿与抑制之后,通常仍然会有一定的残留,完全消除非线性误差非常困难。而且制造工艺、装调及使用方法也会影响外差激光干涉仪的测量性能和非线性误差的大小等特性。同一型号不同批次的干涉仪,非线性误差通常也会有差异。

最后,发展干涉仪非线性误差测量技术十分重要。例如,通过对非线性误差准确计量,可得到非

线性误差的阶次、幅值、相位等特征信息,是对干涉仪非线性误差进行补偿和抑制的技术基础。发展非线性误差测量技术对建立我国微位移计量体系,促进国家关键重要产业发展具有极为重要的价值与意义,例如集成电路工业中的晶圆键合、掩模等工艺流程的测量,以及先进纳米测量仪器的量值溯源测量等。

参 考 文 献

- [1] Suo R, Fan Z J, Li Y, et al. Dual-frequency laser interferometer present state and development [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(4): 251-253.
所睿, 范志军, 李岩, 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. *激光与红外*, 2004, 34(4): 251-253.
- [2] Wu C M, Su C S. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(1): 62-68.
- [3] Basile G, Becker P, Bergamin A, et al. Combined optical and X-ray interferometry for high-precision dimensional metrology [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 456(1995): 701-729.
- [4] Diao X F. Study on high speed heterodyne interferometer with spatially separated beams [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
刁晓飞. 基于空间分离的高速外差激光干涉测量若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] Cosijns S J A G, Haitjema H, Schellekens P H J, et al. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(4): 448-455.
- [6] Yang J, Liu Z H, Yuan L B, et al. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 364-369.
杨军, 刘志海, 苑立波, 等. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, 37(2): 364-369.
- [7] Deng Y L, Li X J, Geng Y F, et al. Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112008.
邓元龙, 李学金, 耿优福, 等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112008.
- [8] Ju A S, Zhong C Y, Hou W M, et al. The effect of

- laser source and PBS on the nonlinearity in heterodyne interferometer [J]. *Optik*, 2015, 126(1): 112-115.
- [9] Chen H F, Jiang B, Shi Z Y, et al. Synthetic model of nonlinearity errors in laser heterodyne interferometry [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3890-3901.
- [10] Hou W M, Zhang Y B, Xu Q X, et al. Effect of beam splitter on nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 163-168.
侯文玫, 张运波, 许琦欣, 等. 分光镜对外差激光干涉仪非线性的影响 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 163-168.
- [11] Hou W M, Zhang Y B, Le Y F, et al. Elimination of the nonlinearity of heterodyne displacement interferometers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0908006.
侯文玫, 张运波, 乐燕芬, 等. 外差激光干涉测长非线性误差的消除 [J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0908006.
- [12] Le Y F, Ju A S. Analysis and measurement of the nonlinear errors in heterodyne interferometers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051203.
乐燕芬, 句爱松. 外差激光干涉仪非线性误差分析及测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051203.
- [13] Chen H F, Ding X M, Zhong Z, et al. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(11): 1562-1566.
陈洪芳, 丁雪梅, 钟志, 等. 偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响 [J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1562-1566.
- [14] Wang Y, Hu P C, Fu H J, et al. Periodic nonlinear error and its compensation method in heterodyne laser interferometer [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 126-133.
王越, 胡鹏程, 付海金, 等. 外差激光干涉仪周期非线性误差形成机理与补偿方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 126-133.
- [15] Eom T B, Choi T Y, Lee K H, et al. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(2): 222-225.
- [16] Heydemann P L M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(19): 3382-3384.
- [17] Wang C, Fay E D B, Ellis J D, et al. Real-time FPGA-based Kalman filter for constant and non-constant velocity periodic error correction [J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 133-143.
- [18] Yan L P, Zhou C Y, Xie J D, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0904002.
严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0904002.
- [19] Li Z, Herrmann K, Pohlenz F, et al. A neural network approach to correcting nonlinearity in optical interferometers [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(3): 376-381.
- [20] Eom T B, Kim J A, Kang C S, et al. A simple phase-encoding electronics for reducing the nonlinearity error of a heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(7): 075302.
- [21] Zhang M Q. Research on optical nonlinearity error modeling and correction of heterodyne laser interferometry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
张敏琦. 外差激光干涉光学非线性误差建模及校正方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [22] Yang Y, Deng Y, Tan Y D, et al. Nonlinear error analysis and experimental measurement of Birefringence-Zeeman dual-frequency laser interferometer [J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 264-268.
- [23] Guo J H, Zhang Y, Shen S, et al. Compensation of nonlinearity in a new optical heterodyne interferometer with doubled measurement resolution [J]. *Optics Communications*, 2000, 184(1/2/3/4): 49-55.
- [24] Fu H, Hu P, Tan J, et al. Simple method for reducing the first-order optical nonlinearity in a heterodyne laser interferometer [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(20): 6321-6326.
- [25] Chen H F, Zhong Z, Ding X M, et al. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1043-1047.
陈洪芳, 钟志, 丁雪梅, 等. 激光外差干涉的非线性误差补偿 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1043-1047.

- [26] Lu Z G, Zhang Y L, Liang Y T, et al. Measuring the laser polarization state and PBS transmission coefficients in a heterodyne laser interferometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(3): 706-714.
- [27] Hou W M, Wilkening G. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. Precision Engineering, 1992, 14(2): 91-98.
- [28] Hou W M, Wang J. Subdivision and elimination of nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007(3): 210-215.
侯文玫, 王俊. 外差激光干涉仪非线性的细分和消除[J]. 计量学报, 2007(3): 210-215.
- [29] Wu C M, Lawall J, Deslattes R D, et al. Heterodyne interferometer with subatomic periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4089-4094.
- [30] Lawall J, Kessler E. Michelson interferometry with 10 pm accuracy[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(7): 2669-2676.
- [31] Joo K N, Ellis J D, Spronck J W, et al. Simple heterodyne laser interferometer with subnanometer periodic errors[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 386-388.
- [32] Joo K N, Ellis J D, Buice E S, et al. A novel heterodyne displacement interferometer with no detectable periodic nonlinearity and optical resolution doubling[C]//Proceedings of the 10th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, May 31-June 4, 2010, Delft, Netherlands. Livermore: LLNL-PROC, 2010: 67-70.
- [33] Joo K N, Ellis J D, Buice E S, et al. High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 1159-1165.
- [34] Ellis J D, Meskers A J H, Spronck J W, et al. Fiber-coupled displacement interferometry without periodic nonlinearity[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3584-3586.
- [35] Fu H J, Wu G L, Hu P C, et al. Highly thermal-stable heterodyne interferometer with minimized periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1463-1467.
- [36] Hu P C, Chen P, Ding X M, et al. Balanced plane-mirror heterodyne interferometer with subnanometer periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5448-5452.
- [37] Yokoyama S, Hori Y, Yokoyama T, et al. A heterodyne interferometer constructed in an integrated optics and its metrological evaluation of a picometre-order periodic error[J]. Precision Engineering, 2018, 54: 206-211.
- [38] Weichert C, Köchert P, Köning R, et al. A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than ± 10 pm[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(9): 094005.
- [39] He Y Z, Zhao S J, Wei H Y, et al. Traceable trans-scale heterodyne interferometer with subnanometer resolution[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(6): 060601.
贺寅竹, 赵世杰, 尉昊赞, 等. 跨尺度亚纳米分辨的可溯源外差干涉仪[J]. 物理学报, 2017, 66(6): 060601.
- [40] Zhao S J, Wei H Y, Zhu M H, et al. Green laser interferometric metrology system with subnanometer periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 3006-3011.
- [41] You Y, Qi Y F, He B, et al. Principles and development of active polarization control technology for fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(10): 100001.
尤阳, 漆云凤, 何兵, 等. 光纤激光主动偏振控制技术的原理与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100001.
- [42] Yan L P, Chen B Y, Chen Z Q, et al. Phase-modulated dual-homodyne interferometer without periodic nonlinearity[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(11): 115006.
- [43] Bu Y M, Zeng Z Y, Du X P, et al. Research progress of photoelectric mixing technology in laser three-dimensional imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080002.
卜禹铭, 曾朝阳, 杜小平, 等. 激光三维成像中光电混频技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080002.
- [44] Dai G L, Chao Z X, Yin C Y, et al. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(11): 987-992.
戴高良, 晁志霞, 殷纯永, 等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. 中国激光, 1999, 26(11): 987-992.
- [45] Badami V G, Patterson S R. A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in

- heterodyne interferometry [J]. Precision Engineering, 2000, 24(1): 41-49.
- [46] Lu C, Troutman J R, Schmitz T L, et al. Application of the continuous wavelet transform in periodic error compensation [J]. Precision Engineering, 2016, 44: 245-251.
- [47] Wu C M. Periodic nonlinearity resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry [J]. Optics Communications, 2003, 215(1/2/3): 17-23.
- [48] Zhang Y S. Research of nonlinearity measurement technology in laser heterodyne interferometry based on lock-in amplifier [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
张瑀珊. 基于锁相放大的外差激光干涉仪非线性测试技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [49] Fu H J, Ji R D, Hu P C, et al. Measurement method for nonlinearity in heterodyne laser interferometers based on double-channel quadrature demodulation [J]. Sensors, 2018, 18(9): 2768-2777.
- [50] Hou W M. Optical parts and the nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. Precision Engineering, 2006, 30(3): 337-346.
- [51] Xu J, Xu Y, Ye X Y, et al. The measurement for the nonlinearity of laser interferometer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2003(4): 271-274.
许婕, 徐毅, 叶孝佑, 等. 激光干涉仪非线性的测量 [J]. 计量学报, 2003(4): 271-274.
- [52] Cui J J. Study on metrological traceability through Fabry-Perot laser interferometer or atomic lattice spacing for micro displacement measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
崔建军. 基于 Fabry-Perot 干涉与原子晶格间距的微位移计量及溯源研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [53] Xu Y, Ye X Y, Li C Y, et al. A high precise laser heterodyne interferometer for measuring nanometer displacement [J]. Acta Metrologica Sinica, 1990(1): 32-35.
徐毅, 叶孝佑, 李成阳, 等. 高精度微位移差拍激光干涉仪 [J]. 计量学报, 1990(1): 32-35.
- [54] Chao Z X, Xu J, Xu Y, et al. Fabry-Perot interferometer used for large range nanometer measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 1999(4): 241-246.
晁志霞, 许婕, 徐毅, 等. 用于大范围纳米测量的法布里-珀罗干涉仪 [J]. 计量学报, 1999(4): 241-246.
- [55] Sun W K, Ma J C, Li Y, et al. The study on nonlinear error calibrating system based on Fabry-Perot interferometer with an accuracy of nanometer order [J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 748-750.
孙文科, 马骥驰, 李岩, 等. 基于 F-P 腔法的纳米精度非线性误差校准系统研究 [J]. 光学技术, 2007, 33(5): 748-750.
- [56] Wang D. Study on nonlinear error measurement of laser interferometer based on beat-frequency Fabry-Perot interferometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
王冬. 基于拍频 F-P 干涉法的激光干涉仪非线性误差测量研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [57] Zhu M H, Wei H Y, Li Y et al. Periodic error characterization in commercial heterodyne interferometer using an external cavity diode laser based Fabry-Perot interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9203: 92031A.
- [58] Bian Z L, Huang C D, Gao M, et al. Research on control technique for Pound-Drever-Hall laser frequency stabilizing system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0302001.
卞正兰, 黄崇德, 高敏, 等. PDH 激光稳频控制技术 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302001.
- [59] Wu X J, Li Y, Wei H Y, et al. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030001.
吴学健, 李岩, 尉昊赟, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030001.