

## 激光与光电子学进展

## 亚纳米皮米激光干涉位移测量技术与仪器

林雄磊<sup>1,2</sup>, 苏晓博<sup>1,2</sup>, 王嘉宁<sup>1,2</sup>, 孙云科<sup>1,2</sup>, 胡鹏程<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;<sup>2</sup>超精密仪器技术及智能化工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

**摘要** 激光干涉位移测量技术因具有大量程、高分辨力、非接触式及可溯源性等特点,成为当前与下一代高端装备、超精密计量的基础性技术之一。在简要介绍国内外现有的各类亚纳米级激光干涉仪的基础上,重点从“精”“准”“快”方面综述了面向亚纳米、皮米级激光干涉位移测量技术的研究成果。首先,从激光干涉测量原理出发,分析了限制激光干涉仪中测量分辨率、速度等进一步提升的主要误差项及技术难点;其次,重点列举了近年来国内外在激光器高精度稳频、高精度干涉镜组、高速/高分辨力相位细分技术、环境补偿与控制等方面所取得的重大关键技术突破;最后,对下一代超精密激光干涉位移测量技术的发展趋势进行了总结与展望。

**关键词** 激光干涉仪; 亚纳米与皮米测量; 激光稳频; 信号处理

中图分类号 TN243 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230440

## Laser Interferometer Technology and Instruments for Sub-Nanometer and Picometer Displacement Measurements

Lin Xionglei<sup>1,2</sup>, Su Xiaobo<sup>1,2</sup>, Wang Jianing<sup>1,2</sup>, Sun Yunke<sup>1,2</sup>, Hu Pengcheng<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Center of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China

**Abstract** Laser interference displacement measurement technology has become a fundamental one for the current and next-generation high-end equipment and ultra-precision metrology due to its large range, high resolution, noncontact, and traceability. Based on a brief introduction of various existing sub-nanometer laser interferometers, in this study, we review the research results of sub-nanometer- and picometer-level laser interference displacement measurement technology from the aspects of precision, accuracy, and speed. First, starting from the principle of laser interferometer, the main errors and technical difficulties that limit the improvement of resolution and speed of displacement measurements are analyzed. Second, the major technological breakthroughs made in recent years in laser high-precision frequency stabilization, high-precision interferometric mirrors, high-speed/high-resolution phase subdivision technology, and environmental compensation and control are highlighted. Finally, the development trends of the next-generation ultra-precision laser interference displacement measurement technology is summarized and prospected.

**Key words** laser interferometer; sub-nanometer and picometer measurements; laser frequency stabilization; signal processing

## 1 引言

激光干涉位移测量技术具有大量程、高分辨力、非接触式及可溯源性等优势,广泛应用于精密计量<sup>[1]</sup>、微电子集成装备<sup>[2]</sup>和大科学装置<sup>[3]</sup>等领域,成为超精密位移测量领域中的重要技术之一。近年来,随着这些领

域的迅猛发展,对激光干涉测量技术提出了新的测量需求。如在基于长度等量子化参量的质量基准溯源方案中,要想实现 $1 \times 10^{-8}$ 量级的溯源要求,需要激光干涉仪长度测量精度达0.1 nm量级<sup>[4-5]</sup>;在集成电路制造方面,激光干涉仪承担光刻机中掩模台、工件台空间位置的高速、超精密测量任务,按照“摩尔定律”发展规

收稿日期: 2023-01-03; 修回日期: 2023-01-14; 录用日期: 2023-01-17; 网络首发日期: 2023-02-07

通信作者: \*hupc@hit.edu.cn

律,近些年要想实现 1 nm 节点光刻技术,需要超精密测量动态精度达 0.1 nm,达到原子尺度。

为此,国际上以顶级的计量机构为代表的单位均部署了诸如 NNI、Nanotrace 等工程,开展了“纳米”尺度测量仪器的研制工程<sup>[6-7]</sup>,并制定了测量不确定度在 10 pm 以下的激光干涉测量技术的研发战略<sup>[8-9]</sup>。着眼于国际形势,我国同样根据先进光刻机等高端装备、先进计量的测量需求,制定了诸多纳米计量技术的研发纲要<sup>[10-11]</sup>。可见,超精密位移测量技术的发展对推进我国众多重大高端装备具有重要战略意义,是目前纳米尺度下测量领域逐步发展的重大研究方向。

## 2 激光干涉测量原理

根据光波的传播和叠加原理,满足相干条件的光波能够在空间中出 现干涉现象。在激光干涉测量中,由于测量目标运动,将产生多普勒-菲佐(Doppler-Fizeau)效应,干涉条纹将随时间呈周期性变化,称为拍频现象。频移/相移信息与测量目标的运动速度/位

移关系满足

$$f_d = 2nv/\lambda, \tag{1}$$

$$\varphi_d = 2nL/\lambda, \tag{2}$$

式中: $f_d$ 为多普勒频移; $\varphi_d$ 为多普勒相移; $n$ 为空气折射率; $v$ 和  $L$ 为运动速度和位移; $\lambda$ 为激光波长。通过对干涉信号的频率/相位进行解算即可间接获得测量目标运动过程中的速度/位移信息。

典型的干涉测量系统可按照激光光源类型分为单频(零差式)激光干涉仪和双频(外差式)激光干涉仪两大类。

零差式激光干涉测量基本原理如图 1 所示,其结构与 Michelson 干涉仪相仿,参考光与测量光合光干涉后,经过 QPD 输出一对相互正交的信号,为

$$I_{\cos} = A \cos(2\pi f_d t + \varphi_0 + \varphi_d), \tag{3}$$

$$I_{\sin} = A \sin(2\pi f_d t + \varphi_0 + \varphi_d), \tag{4}$$

式中:( $I_{\cos}, I_{\sin}$ )为 QPD 输出的正交信号; $A$ 为信号幅值; $\varphi_0$ 为初始相位。结合后续的信号处理单元即可构成完整、可辨向的测量系统。

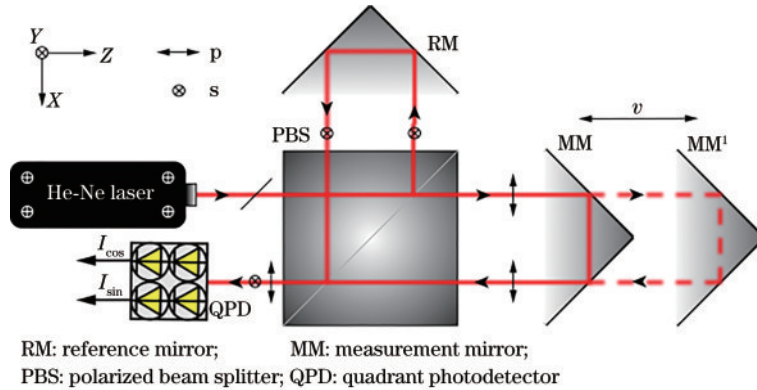


图 1 零差激光干涉测量原理

Fig. 1 Principle of homodyne laser interference measurement

外差式激光干涉仪的光源是偏振态相互垂直且具有一定频差  $\Delta f$  的双频激光,其典型的干涉仪结构如

图 2 所示。双频激光经过 NPBS 后,反射光通过偏振片发生干涉,形成参考信号  $I_r$ ;透射光经过 PBS,光束

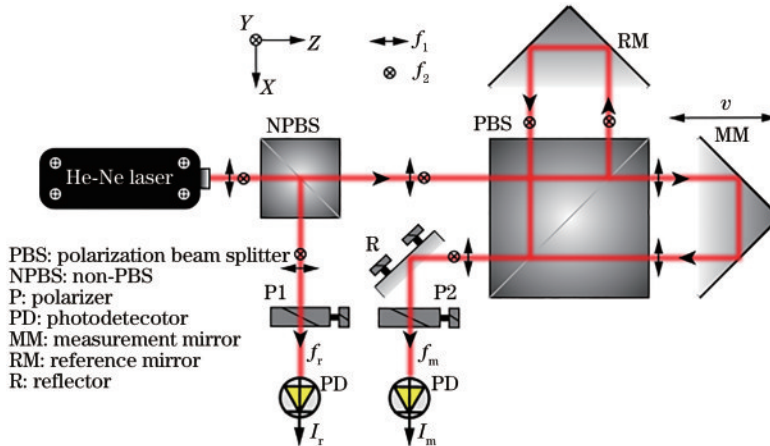


图 2 外差激光干涉测量原理

Fig. 2 Principle of heterodyne laser interference measurement

中两个垂直偏振态相互分开,  $f_2$  光经过固定的参考镜反射,  $f_1$  光经运动的测量镜反射并附加多普勒频移  $f_d$ , 与反射光合光干涉后形成测量信号  $I_m$ 。

$$I_r = A_r \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_r), \quad (5)$$

$$I_m = A_m \cos(2\pi\Delta f t + \varphi_m), \quad (6)$$

式中:  $\Delta f$ 、 $A$  和  $\varphi$  分别为双频激光频差、信号幅值和初始相位差。结合式(5)和式(6), 可解算出测量目标的相位信息。

零差式激光干涉仪常用于分辨力高、速度相对低并且轴数少的应用中。外差式激光干涉仪具有更强的抗电子噪声能力, 易于实现对多个目标运动位移的多轴同步测量, 适用于兼容高分辨力、高速及多轴同步测量场合, 是目前主流的干涉结构之一。

### 3 亚纳米级激光干涉仪及其主要误差

基于激光干涉位移测量原理, 以高速、高分辨力特点为导向, 国际主流的干涉仪厂商均研制了相应的具有亚纳米级位移测量分辨力的激光干涉仪。

哈尔滨工业大学(HIT)的HUE系列线位移测量系统由XL系列激光器、BC系列合光器、DP01-P型干涉仪、PD02-F型探测器及DE系列信号处理单元组成, 如图3所示。XL20高稳定性激光器可输出波长稳定度为  $\pm 0.02 \times 10^{-6}$  的激光; 高精度DP01-P干涉镜组采用光学四细分结构, 热漂移系数小于等于 40 nm/K, 非线性误差优于  $\pm 1$  nm。结合具有 1024 相位细分能力的DE05信号处理板卡, 系统在测量中最高可实现 0.15 nm 的位移分辨力。

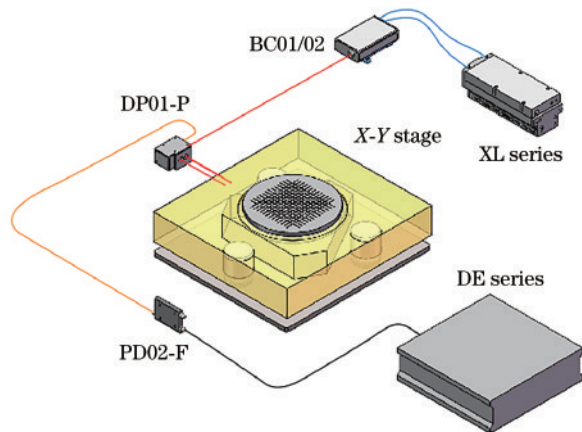


图3 HIT HUE线位移测量系统

Fig. 3 HIT HUE displacement measurement system

Keysight公司55280B线位移测量系统<sup>[12]</sup>由高稳定性5519A/B激光器、高分辨力10716A线性干涉仪、10724A线性平面反射器及环境补偿模块组成, 如图4所示。其中激光器可输出长期频率稳定度为  $\pm 0.02 \times 10^{-6}$  的双频光; 干涉光路采用光学八细分结构, 漂移量仅为传统平面镜干涉仪的1/2。干涉仪的位移测量分辨力可达0.25 nm。

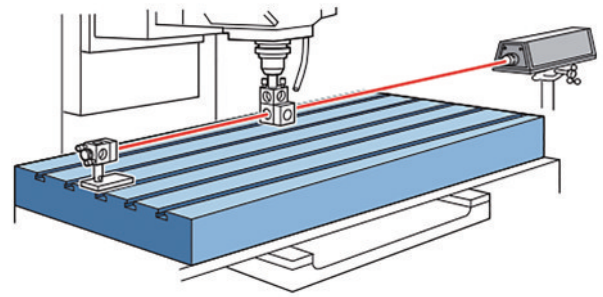


图4 Keysight 55280B位移测量系统<sup>[12]</sup>

Fig. 4 Keysight 55280B displacement measurement system<sup>[12]</sup>

Zygo公司的ZMI 501A位移测量系统<sup>[13]</sup>主要由高稳定性的7705激光器、高稳定性的平面干涉仪(HSPMI)及信号处理卡组成, 如图5所示。其中激光器可输出频差为 3.6 MHz、频率稳定度为  $0.02 \times 10^{-6}$  的双频激光; HSPMI通过光学四细分结构平衡了测量光与参考光在干涉镜组的光程, 极大程度降低了对环境变化的敏感性; 信号处理卡具有最高 512 细分能力。该测量系统最高可实现 0.31 nm 的位移分辨力。

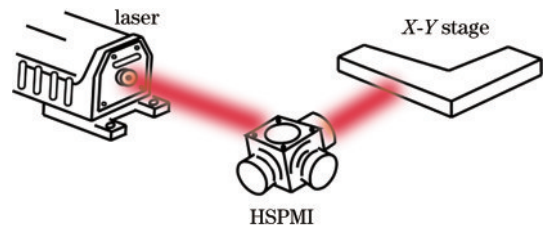


图5 Zygo ZMI位移测量系统<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Zygo ZMI displacement measurement system<sup>[13]</sup>

SIOS公司SP 5000 NG位移测量系统<sup>[14]</sup>主要由机箱(内含激光器和信号处理板卡)、传感测头和反射镜组成, 如图6所示。该干涉仪最大特点在于能精确对齐激光束与测量轴, 即利用测量光束定义了测量轴, 最大限度地减小了干涉测量原理中的阿贝误差。该系统的测量分辨力可达 5  $\mu$ m, 最大测量速度最高为 3 m/s。

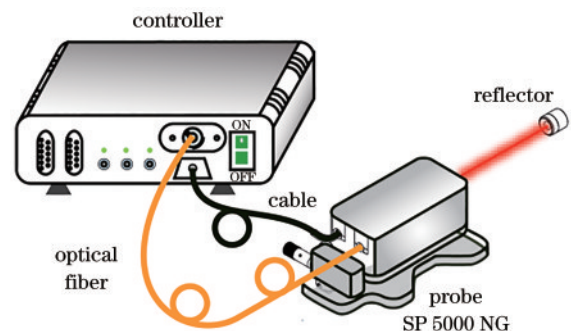


图6 SIOS SP位移测量系统<sup>[14]</sup>

Fig. 6 SIOS SP displacement measurement system<sup>[14]</sup>

Renishaw公司的RLE激光尺测量系统<sup>[15]</sup>由RLU20稳频激光装置、RLD平面镜干涉仪、RPI20并行接口信号处理板卡及RCU10实时补偿单元组成, 如

图 7 所示。激光器输出频率稳定性为  $\pm 0.02 \times 10^{-6}$  的激光束;信号处理单元具有 4096 细分能力;环境补偿单元的补偿精度可达  $1 \times 10^{-6}$ 。该系统可实现 1 m/s 的测量速度和最高 38.6 pm 的位移分辨率。

此外,还有 API 公司的 XD 系列干涉仪、SmarAct

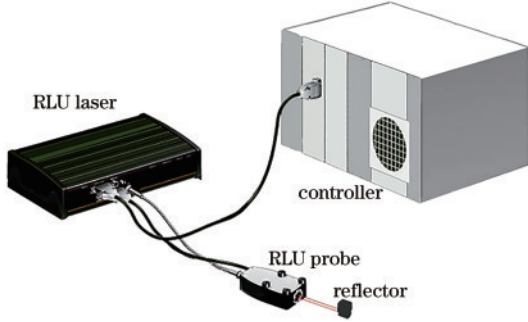


图 7 Renishaw RLE 位移测量系统<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Renishaw RLE displacement measurement system<sup>[15]</sup>

表 1 激光干涉仪的典型误差项

Table 1 Typical error term of the laser interferometer

Error source	Error model	Traditional interferometer	Sub-nanometer and pentermeter interferometer
Laser frequency stability	$L_{\max} \cdot \Delta v_0 / v_0$	$L_{\max} \times 10^{-8}$	$L_{\max} \times 10^{-9}$
Laser frequency accuracy	$L_D \cdot \Delta v_0 / v_0$	$L_D \times 10^{-9}$	$L_D \times 10^{-9}$
Dual-frequency laser frequency stability	$L_C \cdot \Delta f_0 / f_0$	$L_C \times 10^{-11}$	$L_C \times 10^{-11}$
Phase measurement error	$\Delta \varphi$	$2\pi/512 - 2\pi/1024$	$2\pi/1024 - 2\pi/4096$
Periodic nonlinearity error		$\geq 10 \text{ nm}$	$\leq 1 \text{ nm}$
Air refractive index error	$L_{\max} \cdot \Delta n / n$	$L_{\max} \times (10^{-9} - 10^{-8})$	$\approx 0 @ \text{vacuum}$
Thermal drift error of optical prism group	$DE_T \cdot \Delta T$	$\geq 50 \text{ nm}/^\circ\text{C} \times \Delta T$	$\leq 20 \text{ nm}/^\circ\text{C} \times \Delta T$
Abbe error	$L_{\max} \cdot \theta$	$\approx 0$	$\approx 0$
Cosine error	$L_{\max} \cdot \sin^2 \beta / 2$	$L_{\max} \times 10^{-10}$	$L_{\max} \times 10^{-10}$
Dead-path error	$L_D \cdot \Delta n / n$	$L_D \times 10^{-9}$	$\approx 0$
Dynamic measurement error	$\Delta \tau \cdot v$	$(10^{-7} - 10^{-6}) \times v$	$(10^{-8} - 10^{-9}) \times v$

## 4 激光干涉测量关键技术

在超精密激光干涉仪中,波长是测量基准,尤其在米量级的大测程中,要实现亚纳米测量,波长准确度对测量精度起到决定性作用。其中,稳频技术直接影响了激光波长的准确度,决定激光干涉仪的精度上限;环境因素的变化将影响激光的真实波长,间接降低了实际的测量精度。干涉镜组结构决定光束传播过程中的偏振态、方向性等参数,影响干涉信号质量。此外,干涉信号相位细分技术决定激光干涉仪的测量分辨率,并限制了激光干涉仪的最大测量速度。

### 4.1 高精度稳频技术

在自由运转的状态下,激光器的频率准确度通常只有  $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ ,无法满足超精密测量中  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  的频率准确度要求。利用传统的热稳频技术(单纵模激光器的兰姆凹陷稳频方法等),可以提高频率准确

公司的 PICOSCALE 干涉仪及 JENAer 公司的 ZLM 700 干涉仪等<sup>[16-18]</sup>。这些先进干涉仪均具有米/秒级的测量速度和亚纳米的位移测量分辨率。

决定激光干涉仪实现亚纳米甚至皮米级测量分辨率的主要因素在于测量系统中各个误差源的误差大小。按不同类型,可将激光干涉仪的测量误差分为内在原理误差、外界环境误差及装配误差等,其典型误差项组成如表 1 所示,其中  $L_C$  为共光路传输长度,  $L_D$  为闲区长度,  $L$  为测量距离,  $DE_T$  为光学热漂移系数,单位为  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T$  为温度变化量,  $\beta$  为余弦角,  $\theta$  为阿贝倾斜角,  $v_0$  为激光频率,  $f_0$  为双频激光频差,  $v$  为测量目标的运动速度,  $\Delta \tau$  为时延不确定度。从表 1 可知,传统激光干涉仪由于各项误差源的综合作用,测量分辨率通常难以突破纳米量级。实现亚纳米级激光干涉仪的本质在于采用相应的关键技术对测量系统中的关键误差项进行抑制甚至消除。

度,但系统中稳频控制点常偏离光功率平衡点,输出光频率准确度仅能达  $2 \times 10^{-7}$  量级,无法完全满足超精密测量的精度需求。目前,超精密干涉测量中采用的高精度稳频技术主要有热稳频、饱和吸收及偏频锁定 3 种。

由于激光管谐振腔的热膨胀特性,腔长随温度变化呈近似线性变化。因此,热稳频方法通过对谐振腔进行温度控制实现对激光频率的闭环调节。具体过程为:选定稳定的参考频标(双纵模激光器的光功率平衡点、纵向塞曼激光器频差曲线的峰/谷值点),当激光频率偏离参考频标时,产生的频差信号用于驱动加热膜等执行机构进行激光管谐振腔腔长调节。热稳频方法能够使激光器的输出频率的准确度在  $10^{-9} \sim 10^{-8}$  量级,但原子跃迁的中心频率随时间推移受腔内气体气压、放电条件及激光管老化的影响会发生温度漂移。利用稳频控制点修正方法,通过对左右旋圆偏振光进

行精确偏振分光和对称功率检测来抑制稳频控制点偏移的随机扰动,同时补偿其相对稳定偏置分量。该方法显著改善了激光频率的长期漂移现象<sup>[19]</sup>,阿伦方差频率稳定度为 $1.9 \times 10^{-10}$ ,漂移量可减小至 $(1 \sim 2) \times 10^{-8}$ 。稳频点修正后的激光波长仍存在较大的短期抖动,主要源于激光器对环境温度的敏感性,温差对频率稳定性的影响大。自然散热型激光器和强耦合水冷散热型激光器均存在散热效果不均匀和散热程度不稳定的问题。多层弱耦合水冷散热结构为激光管提供一个相对稳定的稳频环境<sup>[20]</sup>,既能抑制外界环境温度变化对激光管产生的扰动,冷却水自身的弱耦合特性又不影响激光管性能,进而减小了温度梯度和热应力,提高了激光器对环境温度的抗干扰能力,减少了输出激光频率的短期噪声,波长的相对频率稳定度约为 $1 \times 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ 。

碘分子饱和和吸收稳频法将激光器的振荡频率锁定在外界的参考频率上<sup>[21]</sup>,碘分子饱和吸收室内处于低压状态下(1~10 Pa)的碘分子气体在特定频率点附近存在频率稳定的吸收峰,将其作为稳频基准后准确度可达 $2.5 \times 10^{-11}$ 。但由于谐振腔损耗过大,稳频激光输出功率难以超过 $100 \mu\text{W}$ 且存在 MHz 量级的调制频率,与运动目标测量过程中产生的多普勒频移相近。因此,饱和和吸收法难以适用于多轴、动态的测量场合。

偏频锁定技术是另一种高精度的热稳频方法,其原理如图 8 所示,通过实时测量待稳频激光器出射光与高精度碘稳频激光频差,获得反馈控制量,从而对待稳频激光器谐振腔进行不同程度加热,实现高精度稳频。在水冷系统提供的稳频环境下,偏频锁定激光器的出射光相对频率准确度优于 $2.3 \times 10^{-11}$ <sup>[22]</sup>。

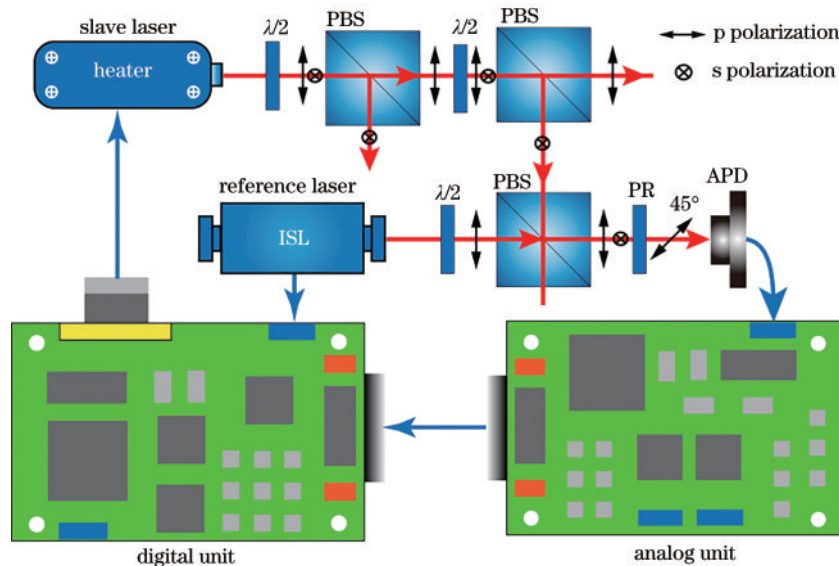


图 8 偏频锁定热稳频原理

Fig. 8 Schematic of the offset locked thermal frequency stabilization principle

#### 4.2 高精度干涉镜组

周期非线性误差是激光干涉仪中特有的内在原理性误差,随位移变化呈周期性变化,每经过半波长,将会出现一次最大值。误差大小取决光束质量,而干涉镜组是决定光束质量的主导因素。传统的周期非线性误差可以归结为零差干涉仪的三差问题和外差干涉仪的双频混叠问题,产生的非线性误差机理如图 9 所示,其中 $I_x, I_y$ 分别表示正交信号的归一化强度。其中,GR为虚反射,MMS为主信号,PIS $_n$ 为第 $n$ 个寄生干涉信号,DFS $_n$ 为第 $n$ 阶虚反射信号。二者表现形式不完全相同,但都会对测量结果产生数纳米至数十纳米的测量误差。可见,在面向亚纳米、皮米级的干涉测量技术中,周期非线性误差难以避免。

Heydemann 椭圆拟合法是抑制零差干涉仪中非线性误差的有效方法<sup>[23]</sup>。该方法基于最小二乘拟合,获得关于干涉直流偏置、交流幅值以及相位偏移的线

性方程组,从而对信号进行修正。在此基础上,Köning等<sup>[24]</sup>提出一种基于测量信号和拟合信号最小几何距离的椭圆拟合法,该方法能提供未知模型参数的局部最佳线性无偏估计量,通过 Monte Carlo 随机模拟后,其非线性幅值的理论值约为 $22 \text{ pm}$ 。

在外差干涉仪中,双频混叠本质上是源于共光路结构中双频激光光源和偏振器件分光的不理想性,称为第 1 类周期非线性。对于此类周期非线性误差,补偿方法主要可以从光路系统和信号处理算法两个方面入手。前者通过优化光路可以将非线性误差补偿至数纳米水平<sup>[25]</sup>;后者通过椭圆拟合法提取椭圆特征参数,可以将外差干涉仪中周期非线性误差补偿至亚纳米量级<sup>[26]</sup>;两种均属补偿法,方法较为复杂,误差难以抑制到 $0.1 \text{ nm}$ 以下。另一种基于空间分离式外差干涉结构的非线性误差抑制技术<sup>[9]</sup>采用独立的参考光路和测量光路,非共光路使两路光在干涉前保持独立传

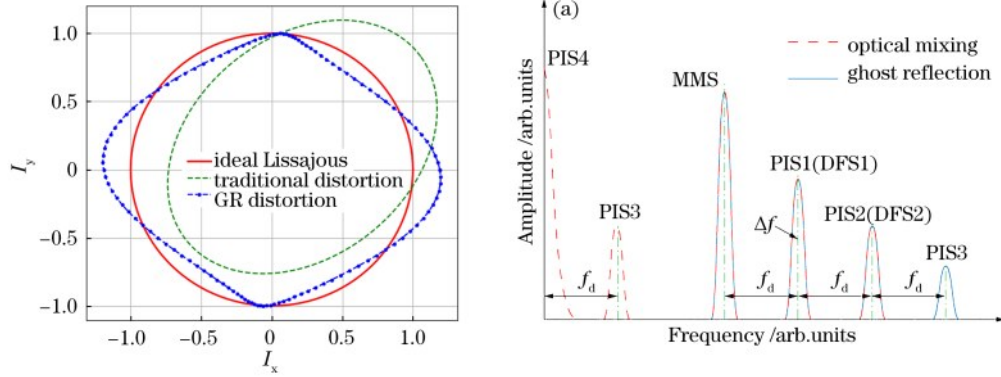


图 9 零差与外差干涉仪中的周期非线性误差机理。(a)传统三差问题与多阶虚反射李萨如图;(b)多阶虚反射与双频混叠频谱分布  
Fig. 9 Periodic nonlinearity error mechanism in homodyne and heterodyne interferometers. (a) Lissajous figure of the three errors and multi-order ghost reflection; (b) spectral distribution of the multi-order ghost reflection and dual-frequency aliasing

播,从根本上避免了外差干涉仪中频率混叠的问题,系统残余的非线性误差约为数十皮米<sup>[27]</sup>。

空间分离式干涉结构能够消除频率混叠引起的第 1 类周期非线性误差,但在测量结果中仍残余亚纳米量级的非线性误差,这种有别于频率混叠的残余误差即为多阶多普勒虚反射现象<sup>[28]</sup>,也称为第 2 类周期非线性误差。虚反射现象源自光学镜面的不理想分光、反射等因素,如图 10 所示,其中 MB 为主光束,GR 为反射光束,虚反射现象普遍存在于绝大多数干涉仪结构中。虚反射效应将会使零差干涉仪中李萨如图的椭圆产生畸变,而在外差干涉仪中则出现明显高于双频混叠的高阶误差分量。

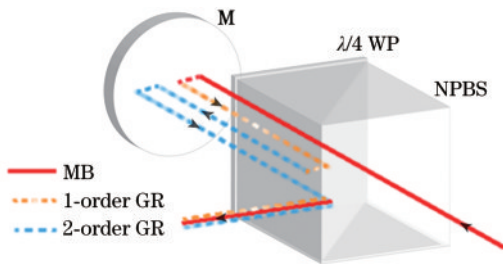


图 10 多阶虚反射现象  
Fig. 10 Multi-order ghost reflection

使用降低反射率的方法,如镀增透膜<sup>[29]</sup>、设计多层增透膜<sup>[30]</sup>等,能够弱化虚反射现象,将周期非线性降低至亚纳米水平;德国联邦物理技术研究院 Weichert 等<sup>[31]</sup>通过调节虚反射光束与测量光束间的失配角,利用透镜加入空间滤波的方法将周期非线性误差降低至 ±10 pm。上述方法在抑制单次的虚反射现象时有着良好的效果,但在面对多阶虚反射效应时作用有限。哈尔滨工业大学王越<sup>[32]</sup>提出一种适用于多阶虚反射的周期非线性误差抑制方法,该方法利用遗传算法优化关键虚反射面空间姿态,精准规划虚反射光束轨迹,可以将周期非线性误差抑制到数皮米量级,突破了该领域 10 pm 的周期非线性误差极限。

### 4.3 高速高分辨力相位细分技术

在激光干涉仪中,相位细分技术直接决定系统的测量精度。实现亚纳米、皮米测量的关键离不开高精度的相位细分技术。相位的解算可以从时域和频域两个角度进行。最为常用的时域解算方法是基于脉冲边缘触发的相位测量方法,该方法利用高频脉冲信号对测量信号与参考信号进行周期计数,进而获取两路信号的相位差。该方法的测量速度与测量分辨力模型可表达为

$$\frac{v_m}{dL_m} = B_m, \quad (7)$$

式中: $v_m$ 为测量速度; $dL_m$ 为测量分辨力; $B_m$ 为系统带宽。在系统带宽恒定的情况下,高测速与高分辨力之间存在相互制约关系。只有提高系统带宽才能实现测量速度和测量分辨力的同时提升,也因此极度依赖硬件运行能力。

在测量速度方面,外差激光干涉仪的测量速度主要受限于双频激光频差  $\Delta f$ ,测量目标运动产生的多普勒频移需满足  $f_d \leq \Delta f$ 。目前,美国的 Zygo 公司和哈尔滨工业大学利用双声光移频方案所研制的结构的频差可达 20 MHz<sup>[33]</sup>,理论的测量速度优于 5 m/s。该方法通过增加双频激光频差来间接提升测量速度,频差连续可调,适用于不同测量速度的应用场合,最大频差通常可达几十 MHz,满足目前多数测量速度需求。从干涉结构出发,刁晓飞<sup>[27]</sup>提出一种双向多普勒频移干涉测量方法,采用全对称的光路结构,如图 11 所示,获得

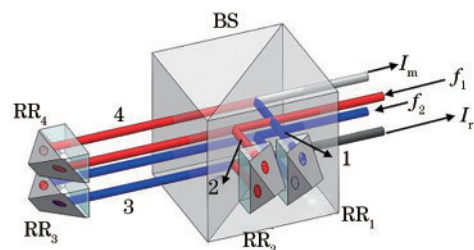


图 11 全对称光路结构<sup>[27]</sup>  
Fig. 11 Structure of fully symmetrical optical path<sup>[27]</sup>

两路多普勒频移方向相反的干涉信号,并根据目标运动方向选择性地采用不同干涉信号,保证始终采用正向多普勒频移进行相位/位移解算。该方法从原理上克服了双频激光频差对测量速度的限制,其最大测量速度主要受限于光电探测器带宽与模/数转换器的采样频率。

在提升测量分辨力方面,Yan等<sup>[34]</sup>提出一种基于电光调制的相位调制方法,对频率为500 Hz的信号进行周期计数,该方法实现的相位测量标准差约为 $0.005^\circ$ ,具有10 pm内的超高位移测量分辨力,适用于低速测量场合。对于高速信号,基于脉冲边缘触发的相位测量方法受限于硬件带宽,高频脉冲频率极限在500 MHz左右,其测量分辨力极限约为1~10 nm,难以突破亚纳米水平。利用高速芯片,可以将处理带宽提升至10 GHz,从而实现亚纳米的测量分辨力,但成本较大。闫磊<sup>[35]</sup>提出一种数字延时细分超精细相位测量技术,在硬件性能相同、采样频率不变的情况下,该

方法利用8阶数字延迟线,实现了相位的1024电子细分,具有0.31 nm的位移测量分辨力,实现了亚纳米测量水平。该方法的等效脉冲频率约为5 GHz,接近硬件处理极限,但其测量速度与测量分辨力之间依旧存在式(7)的制约关系。

德国联邦物理技术研究院的Köchert等<sup>[36-37]</sup>提出了一种双正交锁相放大相位测量方法,如图12所示,FPGA内部生成的理想正交信号分别与外部测量信号、参考信号混频,获取相位差。利用该方法,可以实现10 pm以内的静态测量偏差。双正交锁相放大法能够处理正弦模拟信号,充分利用了信号的频率与幅值信息,其测量速度与测量分辨力计算公式为

$$\frac{v_m}{0.1\lambda_0} = B_m, \quad (8)$$

$$\frac{dL_m}{0.5\lambda_0} = \frac{B_s}{dL_c}, \quad (9)$$

式中: $B_s$ 为采样带宽; $dL_c$ 为解算分辨力。

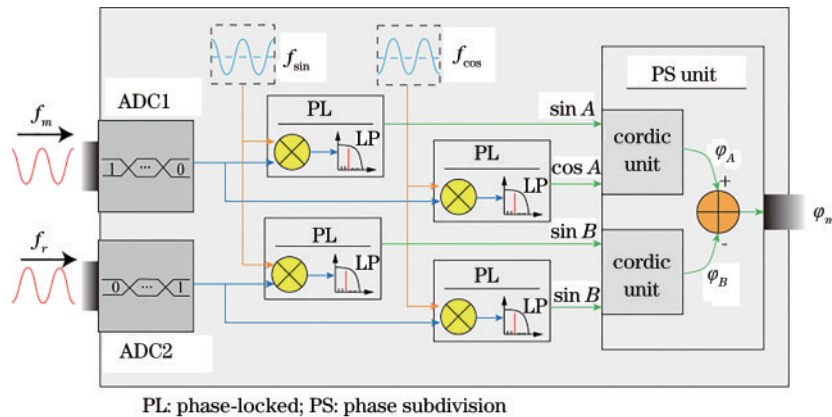


图12 双正交锁相方法测量原理<sup>[36-37]</sup>

Fig. 12 Schematic of measurement principle of double quadrature phase-locked algorithm<sup>[36-37]</sup>

可见,测量速度与测量分辨力相互独立,从原理上解决了高测速与高分辨力相互制约的矛盾,为激光干涉仪提供了一种兼顾高速和高分辨力的相位处理方法。在此基础上,为了适应现代工业中系统化和集成化的测量需求,美国Keysight公司、Zygo公司及哈尔滨工业大学相继研发出了光电探测与信号处理一体化板卡<sup>[38-40]</sup>,能够实现高于5 m/s的测量速度以及0.31 nm甚至0.077 nm的测量分辨力。

此外,从变换域方面同样可以实现高精度的相位解算。张紫杨等<sup>[41]</sup>提出了一种基于小波变换的相位细分方法,通过小波变换提取信号的瞬时频率,计算频率变化的细分时间,实现高精度的位移测量,该方法的理论相位细分数可达1024,等效位移精度约为0.63 nm。Strube等<sup>[42]</sup>利用频谱分析法,从信号离散傅里叶变换(DFT)后的相位谱中获取测量目标的位移,实现了0.3 nm的位移测量分辨力。由于采用图像传感器为光电转换器,信号处理是以干涉条纹为基础的,适用于静态、准静态的低速测量场合。

#### 4.4 环境补偿与控制技术

环境中温度、气压及湿度等变化会引起空气折射率变化,使得激光在空气中传播时波长变动,导致测量结果产生纳米量级的误差。环境误差补偿与控制技术是抑制空气折射率误差的两种重要手段<sup>[43]</sup>。

补偿法是修正空气折射率误差最常用的方法,具有极高的环境容忍度。采用折光仪原理、双波长法等可以实现 $10^{-7}$ ~ $10^{-8}$ 量级的空气折射率相对测量不确定度<sup>[44-45]</sup>。根据Edlen经验公式<sup>[46]</sup>,通过精确测定环境参数(温度、湿度和大气压等),可以计算出空气折射率的精确值,用于补偿位移测量结果,其中温度是影响补偿精度的最主要因素。采用高精度铂电阻传感器,设备可以实现1 mK的温度测量精度<sup>[47]</sup>,其折射率的补偿精度可达 $10^{-8}$ 量级,接近Edlen公式的补偿极限<sup>[48]</sup>。

环境控制技术是保证干涉仪亚纳米测量精度的另一种有效方法。在现行的DUV光刻机中,采用气浴法,建立3 mK/5 min以内恒温、10 Pa/5 min以内恒压、恒湿气浴场,该环境中能够实现 $10^{-9}$ ~ $10^{-8}$ 量级空气

折射率的不确定度<sup>[49]</sup>。

对于深空引力波探测、下一代质量基准溯源等应用场合,对激光干涉仪工作的环境控制要求更为严苛,测量装置需置于真空环境中,此时,空气折射率引入的测量误差将被彻底消除。

## 5 激光干涉测量技术发展趋势

近年来,超精密位移测量的精度需求逐渐从纳米量级向亚纳米甚至皮米量级过渡。国内在激光干涉仪中的激光稳频、周期非线性误差消除和信号处理等关键技术均取得了重大的突破。在 LISA 团队规划的空间引力波探测方案中,要求在 500 万千米的距离上,激光干涉仪对相对位移量需要具有 10 pm 以内的分辨能力<sup>[50]</sup>。面对更严苛的测量需求,超精密位移测量依然严峻面临挑战。激光干涉测量技术的未来发展趋势可以归结如下。

1) 激光波长存在的长期漂移和短期抖动是限制测量精度提升的根本原因。高精度稳频技术对激光波长不确定度的提升极限约为  $10^{-9}$  量级。继续提升激光波长稳定度仍需要依托于下一阶段的工业基础,改善激光管本身的物理特性,优化光源质量。

2) 纳米级原理性光学周期非线性误差是限制激光干涉仪测量精度向亚纳米、皮米精度发展的重要瓶颈。消除和抑制第 1 类和第 2 类周期非线性误差后,仍残余数十皮米的非线性误差。由于周期非线性误差的表现形式与耦合关系复杂,想要进一步降低周期非线性误差幅值,需要继续探索可能存在的第 3 类非线性误差机理。

3) 测量速度与测量分辨力的矛盾关系在动态锁相放大相位测量方法中得到初步解决。但面对深空引力波探测中高速、皮米的测量要求,仍然需要进一步探索弱光探测下的高分辨力相位细分技术;同时,需要研究高速测量过程中的动态误差校准技术。高速、高分辨力特征依旧是相位细分技术今后的研究方向。

## 6 结束语

首先介绍了近年来国内外出现的新一代亚纳米级激光干涉仪,重点对新一代激光干涉仪当中面向亚纳米、皮米测量的关键技术进行了原理概述、成果总结和意义阐述;其次着眼于国内外关键技术的横向对比和纵向发展,总结了激光干涉仪在新一代面向亚纳米、皮米测量水平中所面对的 3 大难题。目前,激光干涉测量技术凭借独特的高速、高分辨力和溯源性等优势在超精密测量领域里大放异彩,在现阶段纳米测量领域如鱼得水。但是,下一代的精密计量、大科学工程和微电子集成装备等对激光干涉仪提出了更严苛的测量要求,对激光干涉测量而言,面对新的挑战,仍需要进行新的技术突破和革新。

## 参 考 文 献

- [1] 李正坤, 张钟华, 鲁云峰, 等. 能量天平及千克单位重新定义研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 160601.  
Li Z K, Zhang Z H, Lu Y F, et al. Progress of joule balance and redefinition of kilogram[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 160601.
- [2] 黄庆红. 国际半导体技术发展路线图(ITRS)2013 版综述(1)[J]. 中国集成电路, 2014, 23(9): 25-45.  
Huang Q H. International technology roadmap for semiconductors(2013 edition)[J]. China Integrated Circuit, 2014, 23(9): 25-45.
- [3] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226: observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(24): 241103.
- [4] Bai Y, Hu P C, Lu Y F, et al. A six-axis heterodyne interferometer system for the joule balance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6): 1579-1585.
- [5] Li Z K, Bai Y, Xu J X, et al. The upgrade of NIM-2 joule balance since 2017[J]. Metrologia, 2020, 57(5): 055007.
- [6] Adamick J. National nanotechnology initiative strategic plan[EB/OL]. [2022-10-08]. [https://www.nano.gov/sites/default/files/pub\\_resource/NNI-2021-Strategic-Plan.pdf](https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-2021-Strategic-Plan.pdf).
- [7] 樊春良, 李东阳. 新兴科学技术发展的国家治理机制: 对美国国家纳米技术倡议(NNI)20 年发展的分析[J]. 中国软科学, 2020(8): 55-68.  
Fan C L, Li D Y. A national governance mechanism for the development of emerging science and technology: an analysis of the 20-year development of the U.S. national nanotechnology initiative (NNI)[J]. China Soft Science, 2020(8): 55-68.
- [8] Yacoot A, Pisani M, Picotto G B, et al. Nanotrace: the investigation of non-linearity in optical interferometers using X-ray interferometry[EB/OL]. [2022-10-08]. [http://ets.ifmo.ru/tomasov/konferenc/AutoPlay/Docs/Volume%201/3\\_01.pdf](http://ets.ifmo.ru/tomasov/konferenc/AutoPlay/Docs/Volume%201/3_01.pdf).
- [9] Pisani M, Yacoot A, Balling P, et al. Comparison of the performance of the next generation of optical interferometers[J]. Metrologia, 2012, 49(4): 455-467.
- [10] 中华人民共和国国务院. 计量发展规划(2013—2020 年)[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2013(9): 6-13.  
The State Council the People's Republic of China. Quantitative development plan (2013—2020)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2013(9): 6-13.
- [11] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[J]. 甘肃能源, 2006(2): 15-22, 27.  
The State Council the People's Republic of China. Outline of national medium and long-term science and technology development plan (2006—2020) [J]. Gansu Energy, 2006(2): 15-22, 27.
- [12] Technology K. 55280B linear measurement kit [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.keysight.com/cn/zh/>



- product/55280B/55280b-linear-measurement-kit.html.
- [13] Zygo. ZMI™ 501A displacement measuring interferometer system[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.zygo.com/products/nano-position-sensors/displacement-measuring-interferometers/lasers>.
- [14] Sios. Laser Interferometer SP-NG series[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://sios-de.com/products/length-measurement/laser-interferometer/>.
- [15] Renishaw. RLE system [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.renishaw.com.cn/zh/rfu-compact-laser-unit-with-fibre-optic-delivery--20999>.
- [16] Apimetrology. XD Laser[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://apimetrology.com/xd-laser/>.
- [17] Smaract. PICOSCALE Interferometer for contactless high precision displacement measurements[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.smaract.com/displacement-measurements>.
- [18] Jenaer. ZLM 700[EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.jenaer-mt.com/produkte/zlm-laser-interferometer/zlm-700>.
- [19] 胡鹏程, 谭久彬, 杨宏兴, 等. 一种基于控制点偏移修正的纵向塞曼稳频方法与系统[J]. 光电子·激光, 2008, 19(1): 46-49, 53.  
Hu P C, Tan J B, Yang H X, et al. A new lock point offset correction-based frequency stabilization method for longitudinal Zeeman laser[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(1): 46-49, 53.
- [20] 殷子淇. 基于一体化水冷降噪的双频分离型稳频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
Yin Z Q. Research on separated-type dual-frequency stabilized laser based on integrated water-cooling method for reducing noises[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [21] Murakami F, Tukuda M, Shoji Y, et al. Frequency stabilization of 633-nm He-Ne laser by using frequency modulation spectroscopy of  $^{127}\text{I}_2$  enhanced by an external optical cavity[J]. Electronics and Communications in Japan, 2000, 83(3): 1-9.
- [22] Yang H X, Yang R T, Hu P C, et al. Ultrastable offset-locked frequency-stabilized heterodyne laser source with water cooling[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9179-9185.
- [23] Heydemann P L. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. Applied Optics, 1981, 20(19): 3382-3384.
- [24] Köning R, Wimmer G, Witkovský V. Ellipse fitting by nonlinear constraints to demodulate quadrature homodyne interferometer signals and to determine the statistical uncertainty of the interferometric phase[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(11): 115001.
- [25] Fu H J, Hu P C, Tan J B, et al. Simple method for reducing the first-order optical nonlinearity in a heterodyne laser interferometer[J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6321-6326.
- [26] Eom T, Choi T, Lee K, 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.
- [27] 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.  
Diao X F. Study on high speed heterodyne interferometer with spatially separated beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [28] Fu H J, Wang Y, Hu P C, et al. Nonlinear errors resulting from ghost reflection and its coupling with optical mixing in heterodyne laser interferometers[J]. Sensors, 2018, 18(3): 758.
- [29] 左德堂, 马超, 赵乐然, 等. 近红外增透薄膜的研究进展[J]. 冶金与材料, 2019, 39(1): 38-39.  
Zuo D T, Ma C, Zhao Y R, et al. Research progress of near infrared antireflection films[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(1): 38-39.
- [30] Thorlabs. Optical coatings [EB/OL]. [2022-10-08]. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=5840](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5840).
- [31] Weichert C, Köchert P, Köning R, et al. A heterodyne interferometer with periodic nonlinearities smaller than  $\pm 10$  pm[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(9): 094005.
- [32] 王越. 非共光路外差激光干涉周期非线性误差抑制与测试方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.  
Wang Y. Periodic nonlinear error suppression and measurement of heterodyne laser interferometer with separated beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [33] Zygo. ZMI 7714 laser head [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.zygo.com.cn/products/nano-position-sensors/displacement-measuring-interferometers/lasers>.
- [34] 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.
- [35] 闫磊. 基于整周期细分的快速超精密双频激光干涉信号处理技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
Yan L. Fast ultra-precision dual-frequency laser interference signal processing technology based on whole period subdivision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [36] Köchert P, Flügge J, Weichert C, et al. Phase measurement of various commercial heterodyne He - Ne-laser interferometers with stability in the picometer regime [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(7): 074005.
- [37] 蔡海蛟. 皮米分辨力双频激光干涉仪相位细分技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Cai H J. Research on picometer resolution phase subdivision for heterodyne laser interference signals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [38] Zygo. ZMI™ 4100 series measurement board [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.zygo.com.cn/products/nano-position-sensors/displacement-measuring-interferometers/measurement-electronics>.
- [39] Technology K. N1225A four-channel high-resolution laser axis board [EB/OL]. [2022-10-08]. <https://www.keysight.com/us/en/product/N1225A/four-channel-high->

- resolution-laser-axis-board.html.
- [40] 王立靖. 皮米分辨率外差干涉仪光电探测信号处理一体化技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Wang L J. Integrated technology of photoelectric detection and signal processing in picometer resolution heterodyne interferometer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [41] 张紫杨, 张文涛, 杜浩, 等. 基于小波变换瞬时频率优化的相位细分方法[J]. 仪表技术与传感器, 2020(8): 108-111.  
Zhang Z Y, Zhang W T, Du H, et al. Phase subdivision scheme based on instantaneous frequency optimization of wavelet transform[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(8): 108-111.
- [42] Strube S, Molnar G, Danzebrink H U. Compact field programmable gate array (FPGA) -based multi-axial interferometer for simultaneous tilt and distance measurement in the sub-nanometre range[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(9): 094026.
- [43] Jang Y S, Kim S W. Compensation of the refractive index of air in laser interferometer for distance measurement: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(12): 1881-1890.
- [44] Schödel R, Walkov A, Abou-Zeid A. High-accuracy determination of water vapor refractivity by length interferometry[J]. Optics Letters, 2006, 31(13): 1979-1981.
- [45] Meiners-Hagen K, Meyer T, Prellinger G, et al. Overcoming the refractivity limit in manufacturing environment[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24092-24104.
- [46] Bönsch G, Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edln's formulae[J]. Metrologia, 1998, 35(2): 133-139.
- [47] 黄瑞麒. 卫星变温环境下的温敏铂电阻高精度测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.  
Huang R Q. Research on high precision measurement technology of temperature sensitive platinum resistance in changing temperature environment of satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [48] Edlén B. The refractive index of air[J]. Metrologia, 1966, 2(2): 71-80.
- [49] 毛帅. 基于共测量轨迹的快速外差激光干涉仪动态校准关键技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Mao S. Key technologies study of dynamic displacement calibration for high speed heterodyne laser interferometer based on the same measurement trajectory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [50] Stebbins R. Laser Interferometer Space Antenna (LISA): a response to the Astro2010 RFI for the particle astrophysics and gravitation panel [EB/OL]. [2022-10-08]. [https://www.lisa.nasa.gov/archive2011/documentation/astro2010\\_rfi\\_lisa.pdf](https://www.lisa.nasa.gov/archive2011/documentation/astro2010_rfi_lisa.pdf).