

光频扫描干涉绝对距离测量

吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 杨凌辉, 郝继贵*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 随着大型装备制造技术的不断发展, 测量尺度的增加与精度需求的提升给现有大尺寸精密测量技术带来了严峻挑战。光频扫描干涉测距在精度、效率、现场适应性、溯源等方面具有良好的综合性能, 尤其适合当前工业测量场景下的的大尺寸绝对距离测量任务。本文介绍了光频扫描干涉测距的基本原理, 总结了关键技术和仪器的研究进展, 从提升测量精度与效率的角度出发, 探讨了其应用于工业测量领域仍存在的问题、研究方向和发展前景。

关键词 测量; 绝对测距; 光频扫描干涉; 大空间坐标测量; 工业测量

中图分类号 TH741.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1918002

1 引言

长度信息是机械几何量测量领域内的最基本、最核心观测量, 从空天尺度的测量定位系统[地球全球定位系统(GPS)、北斗], 到工业制造的三维坐标测量系统, 乃至微纳尺度的观测系统, 高精度距离测量都扮演着基础且至关重要的角色^[1-3]。由于激光独有的高准直、高相干性等多重特性, 激光测距技术, 如干涉法、脉冲飞行时间法、相位调制法、多波长干涉法, 在距离测量领域具有统治性地位, 尤其在以飞机、火箭、船舶为代表的大型高端装备制造领域得到了广泛的应用。大型先进装备制造过程中面临尺度空间大、精度需求高、部件结构复杂以及环境不可控制等诸多问题, 随着数字化制造技术的不断进步并逐渐向智能化发展, 要求工业测量场景下的高精度距离测量技术能够保证大尺寸空间下的精度保持与统一, 兼具高效的测量能力、良好的环境适应能力和现场溯源能力。

光频扫描干涉(FSI)测距, 是在可调谐激光技术的基础上发展起来的一种高精度绝对测距技术, 其解决了传统干涉测距中的 2π 模糊距离解算对量程的限制, 干涉测量的本质又能够实现较高的测量精度, 同时具有弱光探测和现场溯源能力, 适合在工

业现场下完成大尺寸距离测量任务。自 20 世纪 80 年以来, FSI 绝对测距研究已经形成了一套较为成熟的理论体系和技术^[4-11], 基于 FSI 绝对测距原理开发的测量仪器设备已经广泛地应用在大型高端装备和科学装置制造和监控过程涉及的工业测量任务中。本文首先讨论 FSI 绝对测距原理及其关键技术, 并介绍相关的大空间精密测量系统, 概括当前国内外相关研究现状和发展趋势。

2 FSI 测距原理

FSI 干涉仪的光路结构与传统迈克耳孙干涉仪相似, 所不同的是, 其采用波长可调谐激光器作为系统光源。早期研究主要通过调节半导体激光器的注入电流或温度, 从而在几百 GHz 范围内自由改变激光器输出光频。随着外腔式可调谐激光器的不断发展完善, 可以在较大范围内自由改变激光器输出的光频, 目前典型的商用外腔式可调谐激光器最大调制范围一般能够达到 20 THz 左右。

假设激光器输出光频随时间单调连续变化, 同时被测光程不随时间改变, 从初始时刻到 t 时刻, FSI 干涉信号的相位变化可简化为

$$\Delta\phi(t) = \Delta\omega(t)\Delta\tau - \Delta\alpha(t)\pi\Delta\tau^2, \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi(t)$ 是 FSI 干涉信号在 t 时刻相对初始时

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(51835007, 51721003, 51975408)

通信作者: *jiguizhu@tju.edu.cn

刻的相位变化; $\Delta\omega(t)$ 表示激光的瞬时角频率的变化; $\Delta\tau$ 为干涉仪测量臂与参考臂之间光程差导致的时延; $\Delta\alpha(t)$ 代表光频扫描速度变化量。可以发现, 干涉相位的变化量由两部分组成, 第一部分是由于激光频率的改变导致的一阶相位变化, 第二部分是光频扫描速度波动导致的二阶相位变化, 如忽略第二部分, 则(1)式可进一步简化为

$$\Delta\phi(t) = \Delta\omega(t)\Delta\tau = \Delta\omega(t) \frac{2nL}{c} \quad (2)$$

此时, 干涉信号的相位改变量与光频改变量呈线性关系, 其比例大小由 $\Delta\tau$ 决定。因此, FSI 测距通过调谐激光器的输出光频就可以产生与被测距离相关的干涉信号, 通过解算光频变化量与相位变化量间的比例关系即能实现对被测距离 L 的绝对测量。

$$L = \frac{\Delta\phi(t)}{\Delta\omega(t)} \frac{c}{2n}, \quad (3)$$

式中: c 为真空光速; n 为测量光路介质折射率。

3 FSI 测距关键技术

由 FSI 测距原理, 在光频呈理想线性扫描时, FSI 的测距精度主要由干涉信号相位测量精度及光频变化测量精度决定。当光频扫描存在明显的非线性时, 光频变化波动就会引起不可忽略的二阶相位误差, 由此降低 FSI 测距精度。由于光频变化的测量及扫频非线性误差的校正往往通过构建光纤辅助干涉仪来实现, 因此光纤辅助干涉仪光程差标定及色散失配误差补偿也是 FSI 测距精度提升的限制因素。此外, 当待测距离的光程发生波动时, 多普勒效应会给 FSI 测距系统带来实际波动量几百到上千倍的测距误差, 而这种光程波动在工业测量现场是十分常见的。

根据上述分析, 由于干涉信号提取精度、扫描光频测量精度、光频扫描非线性、长度参考稳定性、色散失配以及环境因素引入的多普勒效应的影响, FSI 测距的精度和可靠性都一定程度受到了限制。自 20 世纪 90 年代以来, 研究者对以上误差因素进行了丰富的研究, 由此形成了一系列关键技术。

3.1 FSI 干涉信号数据分析方法

根据(3)式可知, 被测距离可以简单地通过干涉信号相位变化与光频变化量间的比例关系计算, 因此相位信息的提取是 FSI 干涉信号数据处理的核心。相位提取一般是通过正交鉴相原理实现, 即首先产生两个相位相差 90° 的正交信号, 利用反正切

三角函数获得原信号相位值。目前较为常见的相位测量方法包括同相/正交(I/Q)调制解调相位测量、偏振正交相位测量以及基于希尔伯特变换的相位测量方法。I/Q 调制解调相位测量技术通过将测量信号与一对相位相差 90° 的调制信号混频产生正交信号, 例如日本大阪府立大学 Kikuta 等^[4]使用两个声光调制器使参考光产生移频, 基于光外差鉴相原理对干涉信号的相位变化进行解算。由于调制信号的正交性直接决定了最终的相位测量精度, 该方法对混频器与相移器等射频器件的相频特性与幅频特性要求较高。偏振正交相位测量主要通过波片等偏振器件调整干涉信号不同偏振方向间的相位延迟产生正交干涉信号。1995 年, 德国 IPT Fraunhofer 的 Thiel 等^[5]利用沃拉斯顿棱镜, 从干涉信号中分离出的正交信号用于相位解算。波片产生的相位延迟与波长相关, 对于波长连续变化的 FSI 测距系统, 这将导致正交干涉信号间相位延迟的波动, 导致测量精度的下降。希尔伯特变换是一种常见的数字信号分析方法, 由于其无需在光路中增加光学及电学器件, 近年来被广泛应用在 FSI 干涉信号相位处理过程当中。希尔伯特变换的基本原理是将信号进行 90° 的相移, 相移后的信号与原信号做比值, 并经过反正切运算获得信号的相位变化。值得注意的是, 希尔伯特变换不是一种因果变换系统, 无法实时相位解算, 需要采集整个测量流程的干涉信号后才能进行数据处理, 一定程度上限制了信号分析效率。

通常, 在信噪比较高的条件下, 相位分析方法理论上具有较高的精度, 但在应用于非合作目标测量这类回光信号较弱的场景时, 基于相位测量的 FSI 测距系统难以完成距离测量。而频谱分析方法具有较强的抗干扰能力, 其建立在光频扫描高度线性的前提下, 通过解算干涉信号拍频频率得到被测距离, 在信噪比较低的场景下更具优势, 同时可实现多个待测目标的距离提取。但是由于频谱分析存在栅栏效应, 频谱谱峰的分辨力影响了距离提取的精度。通常, 时域补零、线性调频 Z 变换(CZT)等频谱细化方法可以提高谱峰提取的精度, 但是这类方法计算量巨大, 难以满足工业测量现场高效率、高动态的需求。因此提升频谱分析的精度与效率是这类信号分析的研究重点。谱估计算法, 如 MUSIC (Multiple Signal Classification) 算法^[12] 和 ESPRIT (Estimating Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 算法^[13] 被引入到 FSI 干涉信号拍频测量中, 以提高频谱的估计精度。实验结

果表明,该类算法估计的距离标准差更接近克拉美罗曲线,具有极高的测量精密度,但计算效率很低,极大限制了其实际应用。为了提高频域分析方法的计算速度,哈尔滨工业大学的刘国栋课题组提出了基于复调制的细化 ZFFT-CZT 的频谱分析算法^[14-15],在干涉信号数据量较大且需要高倍细化的情况下,该方法能够显著提升频域分析的计算速度,充分发挥其计算效率高的优势。

3.2 扫描光频监测

根据 FSI 测距基本原理,扫描光频的测量精度将直接决定测距精度。在 FSI 测距系统中,光频扫描范围一般在太赫兹量级,因此如果希望实现优于 1×10^{-6} 的相对测量精度,那么光频测量精度需要达到兆赫兹量级或者更高。传统的光谱测量仪器难以在分辨力和测量速度上满足此要求,解决此类问题可采用法布里-珀罗干涉仪^[10,16]、飞秒光频梳^[17-19]、吸收光谱技术^[20-22]以及辅助干涉仪^[23-24]。

2005 年,美国密歇根大学 Yang 等^[10]利用高精度法布里-珀罗干涉仪监测激光器扫描光频的变化。如图 1 所示,可调谐激光器产生的激光经过分束器后,一路入射到法布里-珀罗干涉仪中,另一路入射到测量光路。当可调谐激光器进行光频扫描时,每隔 0.002 nm 的波长间隔,光电探测器就能探测到

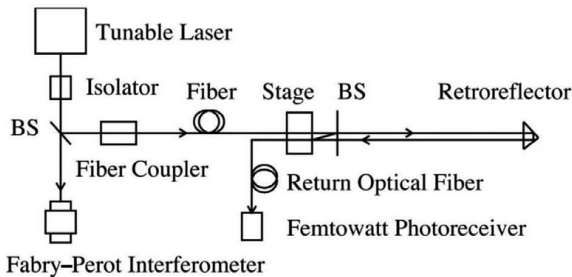


图 1 利用法布里-珀罗干涉仪监控光频变化^[10]
Fig. 1 Fabry-Perot interferometer is used to monitor the change of laser frequency^[10]

一次强度极大值,从而确定光频扫描变化量,与对应的相位变化量做比值,即可求解被测距离。在实验室条件下,该测量方法在 0.1~0.7 m 的测距范围内,实现了约 50 nm 的测量精度。法布里-珀罗干涉仪的光频测量精度远高于光谱仪、波长计等普通光谱测量仪器,可提供高精度光频参考。

飞秒激光是一种具有丰富光谱信息的新颖光源,近年来被广泛研究。由于其在频域上表现为一系列具有等光频间隔的频率梳齿,且每一根梳齿对应的光频能够直接溯源到国际基准上,因此其具有极高的频率精度,可以实现扫描光频的监测。2013 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的 Baumann 等^[17-18]利用飞秒光频梳对外腔式可调谐激光器的光频变化进行了监控。图 2 显示了这种方法的实验装置以及数据结果,可调谐激光器产生的激光被分为两路,一路进入到 FSI 测距光路完成绝对距离测量,另一路与飞秒激光器发射的光耦合,当扫描光每扫过飞秒激光器的一个梳齿时,都会周期性地产生拍信号。因此,通过光电探测器记录拍信号对应的时刻,即可获得激光器光频的变化量。利用此方法,Baumann 等对 10.5 m 处的三维目标进行了测量,最终实现了 10 μm 的测量精密度以及亚微米级的测量准确度。同年,清华大学的 Wu 等^[19]也利用光频梳极高精度的频率特点对扫描光频范围进行监测,在实验室条件下,该系统在几米的距离内实现了微米量级的测量精度。飞秒光频梳能够提供目前最好的频率测量精度,在覆盖极大波长范围的同时提供数以百万计的光学频率参考,但现有飞秒光频梳高昂的成本是将其广泛用于工业现场 FSI 测距光频监控的最大阻碍。

在温度良好控制的情况下,基于分子跃迁的吸收光谱技术能够提供高精度的光频参考,同时也可向国际基准溯源,目前已应用于工业测量现场。

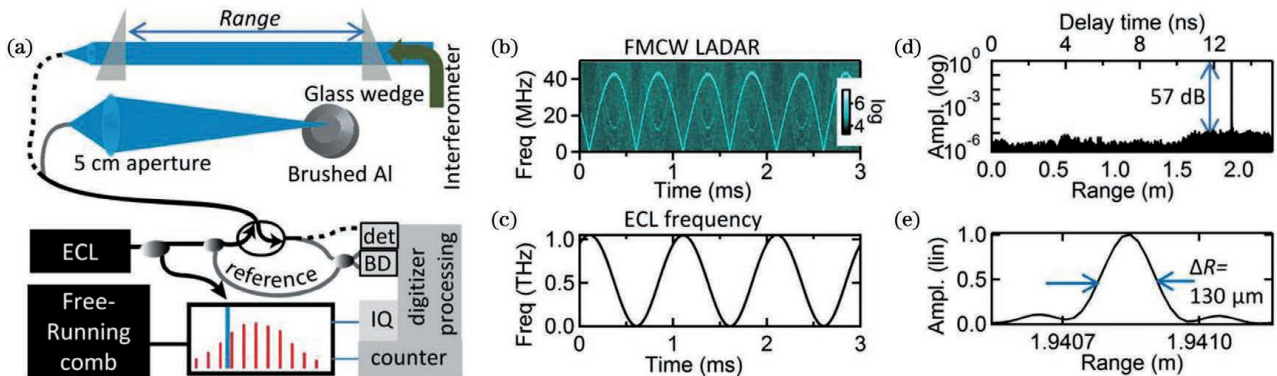


图 2 利用飞秒光频梳监控光频^[17]

Fig. 2 Optical frequency is monitored by femtosecond optical frequency comb^[17]

2014 年,英国牛津大学的 Reichold 和英国国家物理实验室(NPL)的 Hughes 等采用氰化氢(HCN)气室提供高精度红外波段光频参考,监测调谐波长可达 60 nm,温度变化导致 HCN 吸收光谱峰值漂移引入的测距误差仅为 $0.076 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [20]。2015 年,德国联邦物理技术研究院(PTB)的 Prellinger 等[21-22]选用了碘分子气室监测 637 nm 波长附近 190 GHz 的扫描光频,由其引入的相对测距不确定度仅为 1.5×10^{-7} 。

上述三种方法能够为 FSI 测距提供精确、稳定的光频参考,然而其离散的光谱信息无法对整个光频扫描过程做到实时监控。光程差稳定的辅助干涉仪也可以提供高精度光频参考,通过增大辅助干涉仪光程差可以提供更密集的光频监测信息,此时光频测量问题转变为辅助干涉仪信号的相位测量。1995 年,德国 IPT Fraunhofer 的 Thiel 等[5]通过折叠光路的方式,搭建了一个长度约为 2.7 m 的空间辅助干涉仪。折叠光路辅助干涉仪搭建困难,不易调整,通过光纤搭建辅助干涉仪是一个简单易行的方法[20]。空间辅助干涉仪和短光纤辅助干涉仪光程差有限,当待测目标的距离较大时,易将辅助干涉仪的误差放大,为获得足够的测量精度,可通过长延时光纤构建辅助干涉仪,其光程往往可达几十甚至上百米[23-24]。然而,长光纤极易受到环境温度、振动以及光纤色散等因素的影响,这将给测量系统带来额外的误差。

3.3 光频扫描非线性校正

当光频扫描速度波动导致的二阶相位变化不可忽略时,FSI 信号与扫描光频不再呈理想的线性关系,即对测距结果引入非线性误差。根据上一节讨论的光频监测手段提供的频率特征点,可以对光频

扫描非线性引入的误差进行校正。2016 年,西安交通大学刘哲等[16]提出一种基于非平稳信号阶次跟踪的方法,基于法布里-珀罗干涉仪提供的频率参考,利用最小二乘法对扫描光频线性拟合,修正光频变化率,并通过重构等频率间隔采样信号校正非线性。2021 年,天津大学张福民和西安光学精密机械研究所张文富等利用调频连续波激光器产生的激光与微腔孤子光梳产生的激光作拍,校正光频扫描非线性引入的误差,该系统在 2 m 的测量距离内,测距误差优于 $20 \mu\text{m}$ [25]。

法布里-珀罗干涉、光频梳、吸收光谱提供的光频参考都是离散的,对于光频扫描非线性程度难以完全监控,需要通过线性插值的方法估计频率特征点之间的光频变化量,这就给 FSI 测距结果引入插值误差。将辅助干涉仪的相位变化与测量干涉仪的相位变化逐点求比值,再通过线性回归求解比相曲线的线性关系,可以很好地校正由光频扫描非线性引入的干涉信号相位波动[26]。这种比相法校正光频扫描非线性简单易实现,但由于需要提取相位信息,对信号的信噪比要求高,难以测量非合作目标。如图 3 所示,将光程差稳定的辅助干涉仪提供的更为密集光频监测信息用作时钟信号,实现等光频采样重构测量干涉信号,也可以有效地解决这一问题[27]。2014 年,天津大学时光等[23]引入一个延时长度为 40 m 的光纤辅助干涉仪,通过后续数据处理实现软件等光频重采样,测距分辨率可以达到 $50 \mu\text{m}$,测距范围达到 10 m。哈尔滨工业大学的刘国栋等构建了臂长差约 200 m 的光纤辅助干涉仪,将辅助干涉仪信号直接转换为数据采集卡的 TTL 时钟采样信号,实现硬件重采样。等光频重采样系统结构简单,且信噪比高,可用于非合作目标测量[24]。

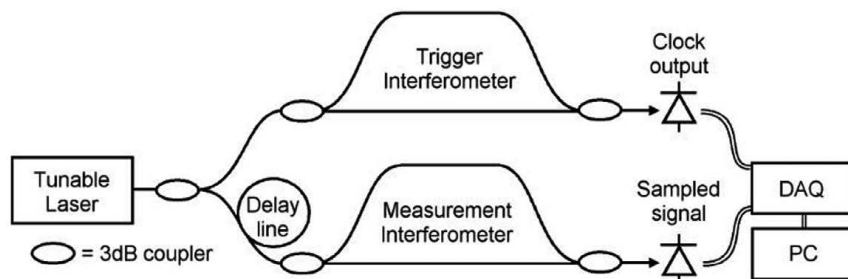


图 3 长光纤辅助干涉仪消除扫描非线性方案[27]

Fig. 3 Auxiliary interferometer is constructed by long optical fiber to eliminate the sweep nonlinearity[27]

除了上述通过光频监测实现非线性校正的思路外,另一思路是依靠锁相环技术主动对激光器的扫描速度进行实时修正,通过与外部标准光频参考比

对,将光频差或者相位差作为反馈信息,输入至激光器调谐控制端,实时对光频扫描线性度进行修正。基于上述方法针对半导体激光器进行研究,可以较

好地实现几百 GHz 的线性调频,但其调频范围和线宽仍不能满足高精度绝对距离测量的要求^[28-29]。2009 年美国蒙大拿州立大学的 Roos 等^[30-31]采用外腔半导体激光器,使用了两个锁相环,分别用于激光器扫频非线性的粗调和精调(图 4)。其中,利用反馈信号调整激光器注入电流的方式实现粗调,利用反馈信号调整压电陶瓷的方式实现精调,最终实现了近 5 THz 范围内误差为 170 kHz 的线性调频。在实验室环境下,基于该光源搭建的测距系统分辨率为 31 μm ,在 1.5 m 的测距范围内测量精度达到 86 nm。2011 年,他们用光频梳标定了光频扫描常数,并校正了光纤色散相关非线性误差,将线性度提高到了 15×10^{-9} ^[32],之后他们在非实验室环境下实现了 200 μm 的测量精度^[33-34]。该方案调频范围大,非线性误差小,但系统结构复杂,两个光电锁相

环同步协调难度大,容易导致反馈环路失锁。2017 年,美国陆军通信和电子研究、开发和工程中心的 Dilazaro 等^[35-36]使用分布式反馈(DFB)激光器阵列,根据 50 GHz 标准具、辅助干涉仪和 HCN 气室标定了扫描光频,用于开环控制 12 个 DFB 激光器的分段调频。他们实现了 5.5 THz 的线性调频,在 1.4 m 测距范围内达到了 0.18 μm 的测量精度和约 27.4 μm 的分辨率。由于该方案采用开环控制,非线性误差较大(约为 2.86 MHz),且采用的 DFB 激光器阵列线宽为 10 MHz,严重限制了其测距范围、测量分辨力及精度。锁相环的方法对扫频非线性的校正最为直接,但反馈环的带宽易受到长光纤延迟、色散和声光调制器(AOM)响应时间的限制,导致其不能够抑制宽频带的噪声。此外,锁相环系统结构复杂,控制参数不合理极易导致反馈环路失锁。

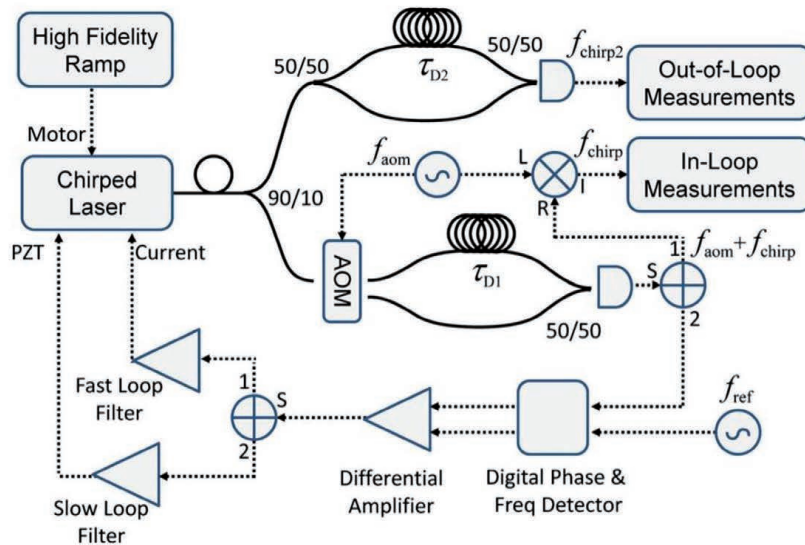


图 4 基于自外差技术的激光器光频扫描非线性的主动校正装置图^[30]

Fig. 4 Experimental setup for broadband optical frequency chirp linearization using the self-heterodyne technique^[30]

3.4 稳定长度参考的构建

由于光纤构建辅助干涉仪具有结构紧凑、成本低以及测量精度较高的特点,近年来绝大部分的 FSI 测距研究都采用光纤式辅助干涉仪监控激光器的输出光频,并补偿光频扫描非线性带来的误差。然而,光纤对环境温度、振动敏感,在工业测量环境下,作为长度参考的辅助干涉仪光程差会发生变化,这将给测距结果引入一定的误差,需要严格保证辅助干涉仪光程基准的准确性。通常采用两种方法保证辅助干涉仪光程差的准确,一种是采用更高精度的测量基准定期对辅助干涉仪的光程差重新校正,另一种是采用反馈控制的方式保证测量过程中光程差的稳定。

如图 5 所示,传统的光纤光程标定方法是通过长直线导轨配合激光干涉仪来实现。这种标定方法反向利用了 FSI 测距过程,对一段高精度标定的已知距离进行测量,利用两路干涉仪的相位关系解算光纤辅助干涉仪的光程差。这种标定方法离不开直线长导轨,很难在工业现场使用。同时,直线导轨能提供的光程往往远小于辅助干涉仪的光纤光程,这将会放大标定过程中的环境误差、电学随机误差,影响标定精度。

2014 年,英国牛津大学的 Reichold 和 NPL 的 Hughes 等利用 HCN 气室对辅助干涉仪光程差进行标定^[20]。图 6 显示了气体吸收室标定辅助干涉仪光程差的系统结构,实验中使用两台对扫的外腔

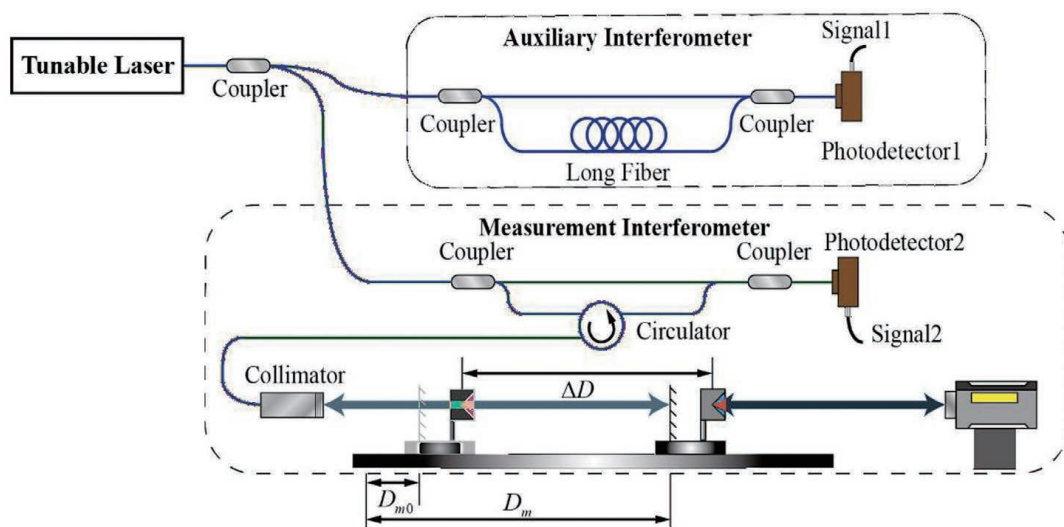


图 5 传统的辅助干涉仪光纤光程标定方法

Fig. 5 Traditional optical path calibration method for auxiliary interferometer

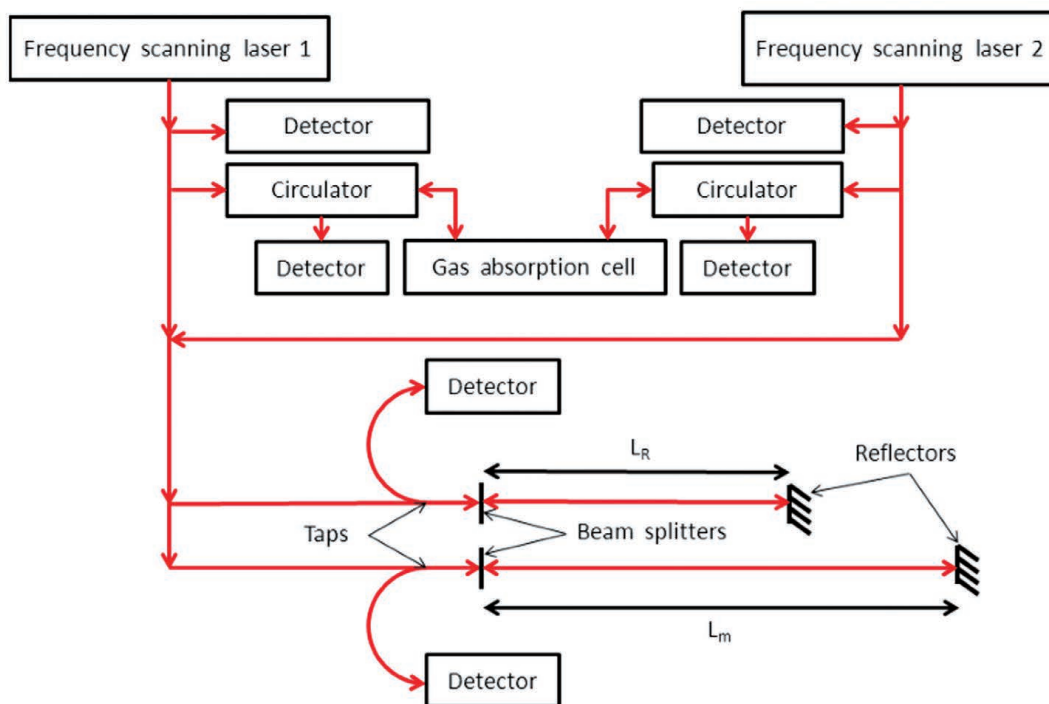


图 6 利用气体吸收室标定辅助干涉仪光程差^[20]

Fig. 6 Gas absorption chamber is used to calibrate the optical path difference of auxiliary interferometer^[20]

式激光器消除多普勒效应,每一台激光器产生的激光都同时入射到测量光路、辅助光路以及 HCN 气室中。再通过环形器,经过 HCN 气室后的吸收谱线被光电探测器记录。实验结果表明,该系统能够在 0.2~20 m 的测量范围实现 0.41×10^{-6} 的合成不确定度(2σ)。但当 HCN 气室内部的气压值发生改变时,吸收谱峰对应的波长值会发生偏移^[37]。因此,HCN 气室在出厂时,内部气体压强不同,或者在实际使用中外界环境温度导致吸收池内

部气压变化时,都需要对吸收谱峰的波长值进行重新标定。通常,在精确标定 HCN 气室的吸收波长值后,其温度敏感性远小于光纤的温度敏感性,可以满足大多数的测量基准校正要求。此外,尼康公司的 Slotwinski^[38]采用微晶玻璃作为辅助干涉仪,利用微晶玻璃受温度影响较小的特性,来减小环境温度对测量基准稳定性的影响。

以上方法基本思路是定期重新标定或利用温度不敏感材料的方式被动地降低环境因素的影响。此

外,还可以通过主动反馈控制的思路对辅助干涉仪长光纤的光程偏移进行实时修正。2018 年,天津大学郝继贵课题组提出了基于外差干涉的辅助干涉仪主动锁定技术,其系统原理如图 7 所示^[39],单频激光器入射光纤辅助干涉仪,其中一路经过 80 MHz 的声光调制器从而产生外差干涉信号。声光调制器的驱动信号同时作为参考信号,用于解算干涉仪的相位变化量,构建反馈回路,调节辅助干涉仪另一路的光纤压电陶瓷(PZT)光程,实现对辅助干涉仪光程差的主动控制。这种主动控制方式受限于控制器输出的电压范围,难以实现辅助干涉仪的长期锁定,因此,对于缓慢、大范围的辅助干涉仪光程变化,仍需通过定期标定来实现长度参考的校正。

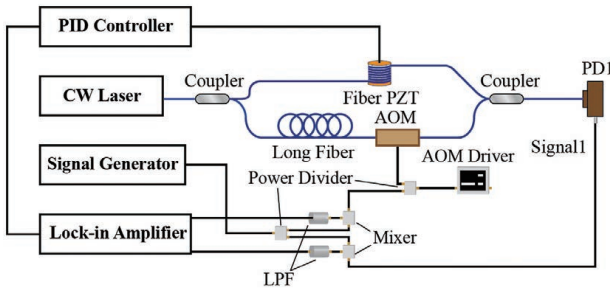


图 7 辅助干涉仪光程主动锁定系统
Fig. 7 Optical path active locking system of auxiliary interferometer

3.5 色散失配误差的补偿

当可调谐激光器出射调频连续光时,由于单模光纤的色散效应,不同波长的光在光纤中的群折射率不同,通过一段固定长度的光纤后,连续扫频激光产生色散啁啾。空气的色散系数极小,不同波长的光在空气中的折射率可以视作不变。当采用光纤辅助干涉仪信号重采样空间测量干涉信号时,就会因色散系数的不同在重采样信号相位中引入二阶变化,称为 FSI 色散失配误差。对于几十纳米的扫描带宽或者几十米的长距离测量任务,色散失配将带来几百微米量级的精度损失。

最直接的色散失配补偿方法是利用色散补偿光纤对辅助干涉仪中的单模光纤色散效应进行补偿^[15],激光器输出的光需经过单模光纤和色散补偿光纤,色散补偿光纤与单模光纤的色散系数大小相反,因此可以通过光纤熔接减小单模光纤的色散效应。这种补偿方法最为简单直接,同时也无需复杂的系统和数据处理过程。在高精度截断光纤长度的前提下,该方法可以得到较高的色散补偿精度,但是

由于单模光纤与补偿光纤的色散斜率不完全相同,该方法仅能在较小的带宽下获得零色散等效光纤。

麻省理工大学的 Wojtkowski 等^[40]在 2004 年将数值色散补偿算法用于光学相干断层扫描领域中。如图 8 所示,该算法通过不断最优化,找到最优的二阶补偿相位和三阶补偿相位,使得干涉信号的相位与激光频率呈线性关系。基于上述思路,哈尔滨工业大学的刘国栋课题组对 FSI 测距中的色散失配误差校正方法进行了详细的研究,为提高色散误差补偿精度,提出了基于峰值演化消畸变的色散失配校正方法^[41-44]。根据频谱谱峰幅值的大小与谱峰展宽程度呈负相关的特点,结合相位补偿的方式,通过多次调整寻优,找到使谱峰峰值最大的补偿相位。这种方法可以对多目标谱峰进行色散补偿,算法直观,但需要平衡迭代步长和最佳补偿相位之间的关系,因此对算法的运算效率有一定限制。由于光纤色散的存在,对于同一位置的目标,不同分段信号解算的目标距离随扫描范围呈线性变化。基于色散啁啾斜率标定的色散失配补偿方法将采集到的信号进行分段^[42],利用这一线性变化标定色散啁啾斜率,避免盲目搜索最优补偿相位,降低迭代次数。但信号分段数与补偿相位估计精度之间存在矛盾,在有限的信号分段情况下,该补偿算法的精度有限。基于调焦清晰度评价函数的色散失配补偿方法引入了评价函数作为色散补偿好坏的判据^[43]。理论推导证明,当调焦清晰度评价函数取得最大值时,色散失配误差得到了最佳补偿。因此,该方法可以通过粗略寻找评价函数的变化趋势,然后经抛物线拟合快速计算最佳补偿相位,降低迭代次数。但是该方法仍然没有摆脱补偿相位与目标距离相关的限制,因而每次距离测量都需要进行拟合步骤获得特定的补偿相位。啁啾分解色散失配补偿算法,分离了色

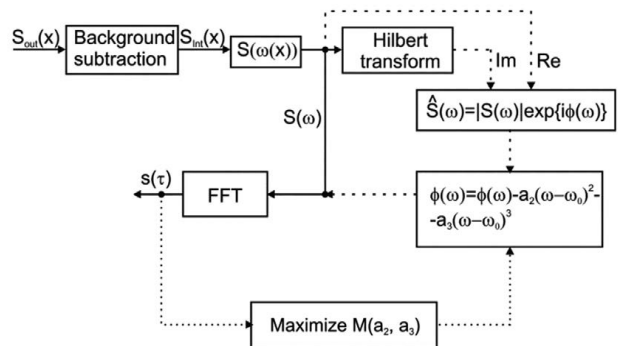


图 8 光学相干断层扫描色散补偿算法流程图^[40]
Fig. 8 Flow chart of spectral OCT dispersion compensation procedure^[40]

散补偿系数与待测目标距离的关系^[44],将信号分解为一系列啁啾信号,只需通过预标定即可获得色散补偿系数。在后续的测量过程中,只需要利用标定的色散系数和啁啾分解算法即可求解待测目标距离,避免了上述方法在迭代过程中引入的随机误差。然而,啁啾分解算法运算量巨大,限制了其色散补偿的效率。2018年,天津大学的Pan等^[45]为提升色散失配补偿方法的效率,提出了一种更简单快速的色散失配相位补偿算法。该方法利用希尔伯特变换求解重采样后的干涉信号相位,由于色散失配效应的存在,相位曲线呈现二次函数趋势,通过对相位进行二阶曲线拟合,直接获得二次色散补偿系数,并补偿重采样后的干涉信号相位。实验证明,色散失配补偿之后,在60 m范围内,与商用干涉仪相比,测距残差优于30 μm,相对测量误差小于 4.9×10^{-7} 。

3.6 动态误差消除

由于多普勒效应,当测量过程中待测光程差发生波动时,FSI测距结果将会引入实际波动量成百上千倍的放大误差。在工业测量现场,测量光路的光程差往往不是稳定不变的,机械振动和空气扰动等环境因素都将给测量光程差带来波动,因此动态误差是必须要进行补偿的。

当扫频激光器光频正向扫描和反向扫描时,动态效应产生的测距误差大小相等,方向相反,因此可以利用激光器相邻两个正向扫描和反向扫描周期进行动态效应的补偿。但是,此方法要求待测目标运动速度在两次扫描时保持不变,对于工业测量环境

的随机振动,难以取得较好的补偿精度。2001年,德国西门子公司的Schneider等^[46]提出利用两个光频扫描方向相反的半导体激光器的补偿方案。如图9所示,两个半导体激光器光频扫描方向相反,通过偏振分束器实现激光的共路,合束后的激光分别进入测量干涉仪和辅助干涉仪,通过后续数据处理校正激光器扫描的非线性。2006年,Nikon公司的Slotwinski等^[38]基于上述原理,采用了锁相环校正两个半导体激光器的扫频非线性。此方法需要严格保证两个激光器的扫描同步性,扫频带宽也要严格保持一致。2004年,英国牛津大学的Coe等^[47]采用双外腔式激光器实现了同样的功能,通过比相的数据处理方法校正光频扫描的非线性。在Coe研究基础上,Waden^[26]实现了范围更大的光频扫描,提高了测距精度和分辨率,不仅消除了动态误差,还通过分析扫频期间相位变化解算出了待测距离的连续变化。2015年,英国南威尔士大学的Martinez等^[48]给出了一种能够解决正向扫描激光与反向扫描激光同步性的方案。扫频激光器输出的激光与单频激光器输出的激光经过同一个半导体光放大器,发生四波混频效应,产生一个以单频激光光频为中心镜像扫描的激光,该镜像激光与扫频激光器出射的激光扫描方向相反且扫描速度相同,两种频率的激光通过波分复用器实现分离。然而,四波混频效应是一种非线性效应,实际产生的镜像激光光功率远小于原激光光功率,导致难以实际应用。

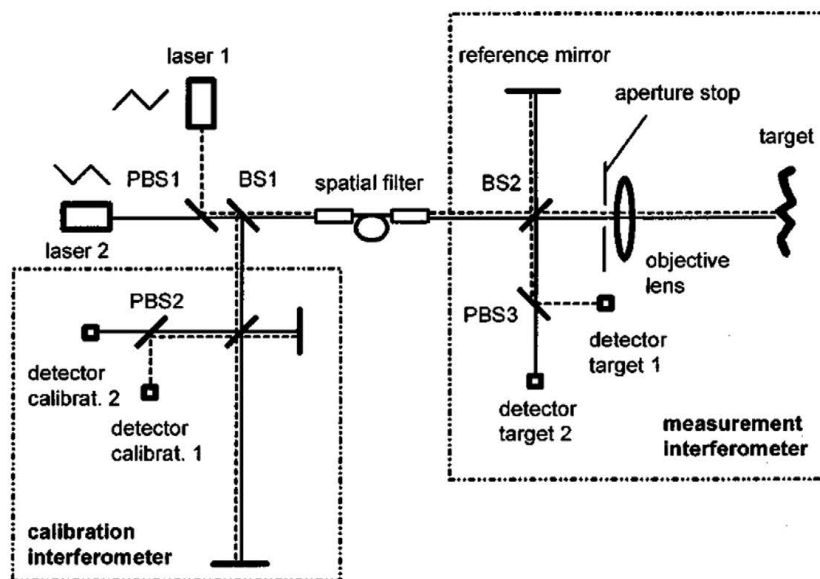


图9 双激光器正反向扫频消除动态误差^[46]

Fig. 9 Two laser diodes are simultaneously tuned upward and downward in frequency to eliminate dynamic error^[46]

2008 年,德国 PTB 的 Hartmann 等^[49]和 Pollinger 等^[50]采用一个稳频激光器搭建干涉仪监控光频扫描期间待测光程的变化,通过后续相位补偿的方法消除了动态误差。2016 年,哈尔滨工业大学的刘国栋课题组提出了一套基于双声光调制器的动态误差消除方法^[11,51]。如图 10 所示,该方法通过单频激光器和双声光调制器构建多普勒测振仪监控光程波动,对 FSI 干涉信号中的相位误差进行逐点补偿,最终在 24 m 的测量范围为范围实现 $8.6 \mu\text{m} + 0.16 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ) 的测量不确定度。由于该系统以一台单频激光器代替了扫频激光器,相比双激光器方案显著降低

了系统的成本。但该方案中多普勒测振仪使用等光频采样时钟,导致信号信噪比低下,他们结合锁相环技术实现测振信号与测距信号的非线性同步,有效抑制了非线性时钟采样的影响,提高了信噪比^[52]。2020 年,天津大学郝继贵课题组提出一种基于共路外差干涉的实时补偿方法,通过对 FSI 测量信号中光程变化引起的相位误差进行监控并实时补偿,提升系统在恶劣环境下的测量精度^[53]。FSI 系统如图 11 所示,在大尺寸空间下进行了绝对距离测量实验,10 m 距离内测量重复性优于 $4.26 \mu\text{m}$,并有效提升系统的测量效率,同时降低构建成本与复杂度。

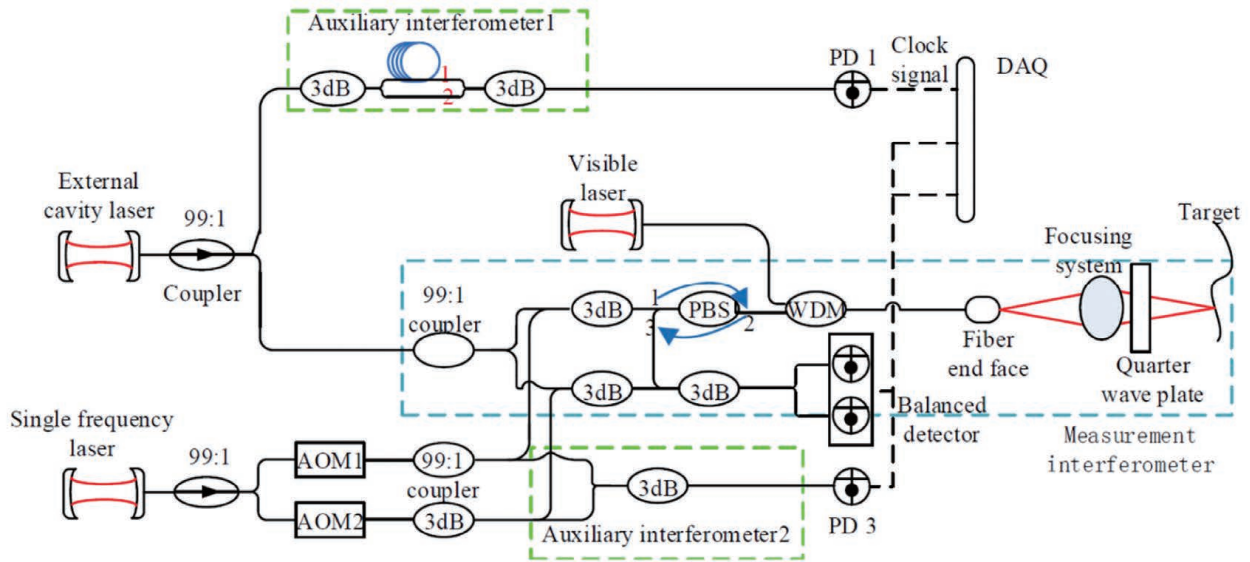


图 10 基于双声光调制器的动态误差消除方法^[51]

Fig. 10 Dynamic error elimination method based on dual acousto-optic modulator^[51]

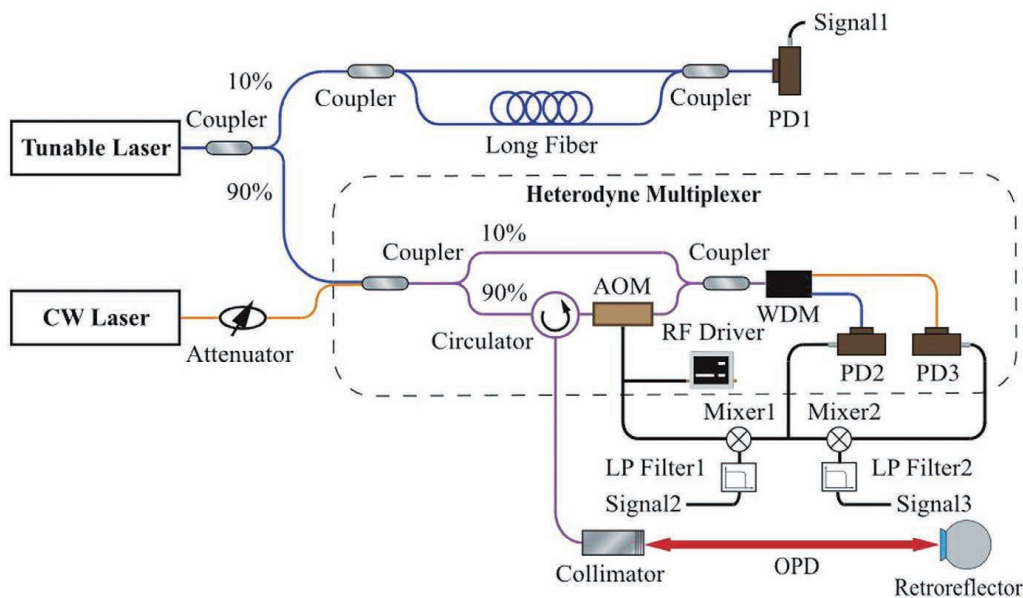


图 11 基于共路外差干涉的动态误差消除方法^[53]

Fig. 11 Dynamic error elimination method based on common path heterodyne interference^[53]

上述方法在补偿动态误差时,系统相对复杂,构建成本高,随之引入的误差因素较多,基于动态预测算法的补偿方法为这一问题提供了另一思路。近年来,西安交通大学刘志刚等使用卡尔曼滤波方法对动态目标的运动状态进行预测,并对光程波动带来的动态误差进行补偿。这类方法使用的光路结构简单,仅需要一个可调谐激光器,极大降低了系统的构建成本^[54-55]。该方法在约 660 mm 的测量距离上进行了验证,经卡尔曼滤波方法补偿的测距标准差从 3.12 μm 提高到 0.23 μm ,但在实际工业测量环境下的测距不确定度和系统可靠性还有待于验证。

4 结束语

FSI 测距作为一种高精度绝对距离测量技术,凭借抗干扰能力强、多目标测量能力以及无模糊范围等优势,在大型装备装置制造过程中扮演了重要的角色,其不仅可以提供高精度、高效率、可现场溯源的绝对距离测量方案,实现空间多路绝对距离测量和多自由度测量,还可以构建大尺寸空间测量定位系统,如长角交会定位系统和多边交会定位系统。Etalon 公司与英国牛津大学和 NPL 合作研发出一种多路绝对测距系统^[20,56]。由于需要提取干涉信号的相位信息,该系统对信号信噪比要求高,只用于合作目标。该系统能够在 30 m 的量程内实现 0.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ 的测量不确定度 (2σ),且最多可扩展 124 路测量通道,目前已应用于大型望远镜等科学装置的变形监控、姿态测量以及微小振动监测中^[57-58]。Nikon 公司研制的 Laser Radar 是一种可以用于大尺寸无合作目标的空间坐标测量定位系统^[38,59]。Laser Radar 长度测量采用 FSI 测距原理,基于长角交会约束,构建球坐标系实现坐标测量定位。其最近推出的 MV430/450 型激光雷达能够在 30/50 m 的测量范围内,实现 20 $\mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ 的测量精度 (MPE),最大测量速度为 4000 point/s。由于其测量速度快且测量精度较高,该系统已广泛用于汽车、飞机、射电望远镜等复杂结构表面的形貌测量^[60]。国内北京航天计量测试技术研究所、哈尔滨工业大学、天津大学等研究机构也设计并制造了样机,但尚未形成成熟的商业化产品。NPL 的 Hughes 等^[61]为解决大尺寸部件制造中的测量问题,设计了基于 FSI 测距的多边定位系统 (PACMAN)。该系统利用空间光调制器 (SLM) 实现光束的偏转控制,通过扩束镜将准直测距光覆盖测量空间内所有目标,由于扫频干涉频域分析具有

多目标测量的能力,通过在空间内布设多台系统,实现了基于多边定位的多目标高精度坐标测量。该系统在德国 PTB 的激光跟踪仪测试墙进行了测试,实验表明,在约 10 m \times 5 m \times 2.5 m 的测量空间范围内,该系统能够实现 40 μm 的测量标准差^[62]。

大型先进装备制造和科学装置建造过程中面临尺度大、精度需求高、部件结构复杂以及环境不可控等诸多问题,这类工业测量任务对现有大尺寸空间测量设备方法提出了新的挑战。面向当前及未来先进装备制造需求,FSI 测距还需在以下几方面进行深入研究。

1) 小型化、宽带可调谐激光器。从早期的半导体激光器到目前广泛使用的宽带可调谐外腔式激光器,激光器扫频性能不断改进推动了 FSI 测距的持续发展。具有良好环境适应性的小型化宽带可调谐激光器是目前的主要发展方向,此外仍需不断提高其光频扫描线性,从而提升测距精度,简化系统结构。

2) 高精密、现场可溯源的光频扫描监测。光频测量精度直接影响 FSI 测距精度,密集、高精度、现场可溯源光频测量是 FSI 测距的重要研究内容,是在当前光频扫描线性水平下提高 FSI 测距性能的基础,同时满足大型先进装备制造扁平化溯源发展的需求。通过光频梳实时标定辅助干涉仪光程差可以获取目前最高精度的光频参考,且光频特征密集、现场可溯源。但需要解决光频梳系统成本、体积、现场适应性问题。

3) 紧凑、可靠的光路。光频扫描监测、非线性校正、动态误差消除往往引入相应的激光器和干涉光路,导致目前 FSI 测距光路比较庞大复杂。因此需要思考上述问题不同的解决方案,简化光路,提高系统的可靠性。

4) 高效的数据处理系统。FSI 测距数据处理量与光频扫描范围、数据采样率成正比例关系,宽带调谐、高采样率是实现高精度、高分辨率 FSI 测距的前提,因此不仅需要从数据处理算法角度思考提升数据处理效率的方法,还应考虑用光学、电学等器件替代部分软件功能,提升整体的测量效率。

FSI 测距具有测量精度高、测量速度快、测量灵敏度好、可用于非合作目标、可现场溯源等优点,非常适合在航空、航天、船舶制造等工业现场下完成大尺寸距离测量任务。希望随着 FSI 测距光源及关键技术的不断突破,国内外研究者能够不断提升测量指标,研发新型大空间精密测量设备,为 FSI 测距技术及其工业测量应用带来新的突破。

参 考 文 献

- [1] Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D. GPS satellite surveying[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [2] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [3] Fleming A J. A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 190: 106-126.
- [4] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light[J]. Applied Optics, 1986, 25(17): 2976-2980.
- [5] Thiel J, Pfeifer T, Hartmann M. Interferometric measurement of absolute distances of up to 40 m[J]. Measurement, 1995, 16(1): 1-6.
- [6] Stone J A, Stejskal A, Howard L. Absolute interferometry with a 670-nm external cavity diode laser[J]. Applied Optics, 1999, 38(28): 5981-5994.
- [7] Smith E D, Zvyagin A V, Sampson D D. Real-time dispersion compensation in scanning interferometry [J]. Optics Letters, 2002, 27(22): 1998-2000.
- [8] Warden M S. Precision of frequency scanning interferometry distance measurements in the presence of noise[J]. Applied Optics, 2014, 53(25): 5800-5806.
- [9] Deng Z W, Liu Z G, Li B, et al. Precision improvement in frequency-scanning interferometry based on suppressing nonlinear optical frequency sweeping[J]. Optical Review, 2015, 22(5): 724-730.
- [10] Yang H J, Deibel J, Nyberg S, et al. High-precision absolute distance and vibration measurement with frequency scanned interferometry[J]. Applied Optics, 2005, 44(19): 3937-3944.
- [11] Deng Z W, Liu Z G, Jia X Y, et al. Dynamic cascade-model-based frequency-scanning interferometry for real-time and rapid absolute optical ranging [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21929-21945.
- [12] Pan H, Zhang F M, Shi C Z, et al. High-precision frequency estimation for frequency modulated continuous wave laser ranging using the multiple signal classification method [J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6956-6961.
- [13] Xu J X, Kong M, Xu X K. Laser frequency scanning interferometry based on estimating signal parameters via rotational invariance technique[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(3): 034205.
徐靖翔, 孔明, 许新科. 基于旋转不变技术信号参数估计的激光扫频干涉测量方法[J]. 物理学报, 2021, 70(3): 034205.
- [14] Xu X K, Liu G D, Chen F D, et al. Research on a kind of high precision and fast signal processing algorithm for FM/CW laser radar[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 92970D.
- [15] Xu X K. Research on key technologies of laser frequency scanning interference absolute distance measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
许新科. 激光扫频干涉绝对距离测量关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] Liu Z, Liu Z G, Deng Z W, et al. Suppression of nonlinear frequency sweep in frequency sweeping interferometer based on order tracking technique[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0112003.
刘哲, 刘志刚, 邓忠文, 等. 扫频干涉测距光频率非线性阶次跟踪抑制方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0112003.
- [17] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements [J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2026-2028.
- [18] Baumann E, Giorgetta F R, Deschênes J D, et al. Comb-calibrated laser ranging for three-dimensional surface profiling with micrometer-level precision at a distance[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 24914-24928.
- [19] Wu X J, Wei H Y, Zhang H Y, et al. Absolute distance measurement using frequency-sweeping heterodyne interferometer calibrated by an optical frequency comb[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2042-2048.
- [20] Dale J, Hughes B, Lancaster A J, et al. Multi-channel absolute distance measurement system with sub ppm-accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24869-24893.
- [21] Prellinger G, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Spectroscopically *in situ* traceable heterodyne frequency-scanning interferometry for distances up to 50 m [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(8): 084003.
- [22] Prellinger G, Meiners-Hagen K, Pollinger F. Dynamic high-resolution spectroscopic frequency referencing for frequency sweeping interferometry [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2016, 4(2): 024012.
- [23] Shi G, Zhang F M, Qu X H, et al. Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wavelaser[J]. Acta Physica Sinica, 2014,

- 63(18): 184209.
- 时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 184209.
- [24] Zhao H, Liu B G, Liu G D, et al. Nonlinearity correction and dispersion analysis in FMCW laser radar[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9297: 929729.
- [25] Jia L H, Wang Y, Wang X Y, et al. Nonlinear calibration of frequency modulated continuous wave LIDAR based on a microresonator soliton comb[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1025-1028.
- [26] Waden M S. Absolute distance metrology using frequency swept lasers[D]. Oxford: Oxford University, 2011.
- [27] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13139-13149.
- [28] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [29] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Phase-locking and coherent power combining of broadband linearly chirped optical waves[J]. Optics Express, 2012, 20(23): 25213-25227.
- [30] Roos P A, Reibel R R, Berg T, et al. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3692-3694.
- [31] Barber Z W, Babbitt W R, Kaylor B, et al. Accuracy of active chirp linearization for broadband frequency modulated continuous wave lidar[J]. Applied Optics, 2010, 49(2): 213-219.
- [32] Barber Z W, Giorgetta F R, Roos P A, et al. Characterization of an actively linearized ultrabroadband chirped laser with a fiber-laser optical frequency comb[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1152-1154.
- [33] Mateo A B, Barber Z W. Precision and accuracy testing of FMCW lidar-based length metrology[J]. Applied Optics, 2015, 54(19): 6019-6024.
- [34] Mateo A B, Barber Z W. Multi-dimensional, non-contact metrology using trilateration and high resolution FMCW lidar[J]. Applied Optics, 2015, 54(19): 5911-5916.
- [35] Dilazaro T, Nehmetallah G. Multi-terahertz frequency sweeps for high-resolution, frequency-modulated continuous wave lidar using a distributed feedback laser array[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2327-2340.
- [36] DiLazaro T, Nehmetallah G. Phase-noise model for actively linearized frequency-modulated continuous-wave lidar[J]. Applied Optics, 2018, 57(21): 6260-6268.
- [37] Swann W C, Gilbert S L. Line centers, pressure shift, and pressure broadening of 1530-1560 nm hydrogen cyanide wavelength calibration lines [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(8): 1749-1756.
- [38] Slotwinski A. Compact fiber optic geometry for a counter-chirp FMCW coherent laser radar: US7139446[P]. 2006-11-21.
- [39] Shang Y, Lin J R, Yang L H, et al. Compensation of sampling error in frequency scanning interferometry [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10621: 106210K.
- [40] Wojtkowski M, Srinivasan V J, Ko T H, et al. Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation[J]. Optics Express, 2004, 12(11): 2404-2422.
- [41] Xu X K, Liu G D, Liu B G, et al. High-resolution laser frequency scanning interferometer based on fiber dispersion phase compensation [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 219501.
- 许新科, 刘国栋, 刘炳国, 等. 基于光纤色散相位补偿的高分辨率激光频率扫描干涉测量研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 219501.
- [42] Xu X K, Liu G D, Liu B G, et al. Research on the fiber dispersion and compensation in large-scale high-resolution broadband frequency-modulated continuous wave laser measurement system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): 074102.
- [43] Liu G D, Xu X K, Liu B G, et al. Dispersion compensation method based on focus definition evaluation functions for high-resolution laser frequency scanning interference measurement [J]. Optics Communications, 2017, 386: 57-64.
- [44] Lu C, Liu G D, Liu B G, et al. Method based on chirp decomposition for dispersion mismatch compensation in precision absolute distance measurement using swept-wavelength interferometry [J]. Optics Express, 2015, 23(25): 31662-31671.
- [45] Pan H, Qu X H, Zhang F M. Micron-precision measurement using a combined frequency-modulated continuous wave lidar autofocusing system at 60 meters standoff distance [J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15186-15198.
- [46] Schneider R, Thuermel P, Stockmann M. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 33-37.

- [47] Coe P A, Howell D F, Nickerson R B. Frequency scanning interferometry in ATLAS: remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(11): 2175-2187.
- [48] Martinez J J, Campbell M A, Warden M S, et al. Dual-sweep frequency scanning interferometry using four wave mixing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(7): 733-736.
- [49] Hartmann L, Meiners-Hagen K, Abou-Zeid A. An absolute distance interferometer with two external cavity diode lasers [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(4): 045307.
- [50] Pollinger F, Meiners-Hagen K, Wedde M, et al. Diode-laser-based high-precision absolute distance interferometer of 20 m range [J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6188-6194.
- [51] Lu C, Liu G D, Liu B G, et al. Absolute distance measurement system with micron-grade measurement uncertainty and 24 m range using frequency scanning interferometry with compensation of environmental vibration[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30215-30224.
- [52] Lu C, Xiang Y, Gan Y, et al. FSI-based non-cooperative target absolute distance measurement method using PLL correction for the influence of a nonlinear clock [J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2098-2101.
- [53] Shang Y, Lin J R, Yang L H, et al. Precision improvement in frequency scanning interferometry based on suppression of the magnification effect [J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5822-5834.
- [54] Tao L, Liu Z G, Zhang W B, et al. Frequency-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6997-7000.
- [55] Jia X Y, Liu Z G, Tao L, et al. Frequency-scanning interferometry using a time-varying Kalman filter for dynamic tracking measurements[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 25782-25796.
- [56] Schodel R. Modern interferometry for length metrology: exploring limits and novel techniques [M]. Bristol: IOP Publishing, 2018.
- [57] Rakich A, Dettmann L, Leveque S, et al. A 3D metrology system for the GMT [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9906: 990614.
- [58] Rakich A, Schurter P, Conan R, et al. Prototyping the GMT telescope metrology system on LBT [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10700: 107001S.
- [59] Nikon Metrology NV. Laser radar MV331/351[EB/OL]. [2021-08-01]. https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/large_volume_laser/.
- [60] Nikon Metrology NV. Laser radar APDIS MV430/MV450 MV430E/MV450E[EB/OL]. [2021-08-01]. https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/support/download/brochures/pdf/2ce-nnth-1_200930.pdf.
- [61] Hughes B, Warden M S. A novel coordinate measurement system based on frequency scanning interferometry[J]. The Journal of the CMSC, 2013, 8(2): 18-24.
- [62] Hughes B, Campbell M A, Lewis A J, et al. Development of a high-accuracy multi-sensor, multi-target coordinate metrology system using frequency scanning interferometry and multilateration[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10332: 1033202.

Frequency Scanning Interferometry Absolute Distance Measurement

Wu Tengfei, Zhou Qiang, Lin Jiarui, Yang Linghui, Zhu Jigui*

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Significance With the continuous development of large equipment manufacturing technology, the increase of measurement scale and the improvement of accuracy requirements make the existing large size precision measurement technology is severely challenged. Length is the most basic and core observation in the field of mechanical geometry measurement. From space-scale measurement and positioning systems, to three dimensional coordinate measurement systems in industrial manufacturing, and even micro-nano scale observation systems, high precision distance measurement plays a fundamental and crucial role. Frequency scanning interferometry distance measurement, with its good comprehensive performance in accuracy, efficiency, field adaptability, traceability and

other aspects, is especially suitable for large size absolute distance measurement tasks in the current industrial measurement environment.

Progress Since the 1990s, extensive research on the error factors of frequency scanning interferometry (FSI) ranging has been conducted, resulting in a series of key technologies. When the scanning of optical frequency is linear, the FSI distance measurement accuracy is mainly determined by the phase measurement accuracy of interference signal and the measurement accuracy of optical frequency change.

The phase extraction of FSI interference signals is generally achieved through the principle of orthogonal phase discrimination, which can achieve high accuracy, but requires high signal-to-noise ratio of interference signals. The spectrum analysis method can extract the frequency characteristics of the target under the condition of low signal-to-noise ratio. Since the femtosecond optical frequency comb is a series of frequency combs with equal optical frequency interval in the frequency domain and the optical frequency corresponding to each comb can be directly traced to the international standard, the scanning optical frequency range can be monitored by using the frequency characteristics of the optical frequency comb with high accuracy (Fig. 2). More intensive optical frequency monitoring information can be provided by the auxiliary interferometer, and the signals of the measured optical path are sampled at equal optical frequency interval. Thus, the scanning optical frequency range can be measured with high precision, and the nonlinear error of scanning frequency can be effectively corrected (Fig. 3). In addition to the above idea of realizing nonlinear correction through optical frequency monitoring, another idea is to rely on the phase-locked loop technology to actively correct the scanning speed of the tunable laser in real time (Fig. 4). In the industrial measurement environment, the optical path difference of the auxiliary interferometer as the measurement reference will change, so the accuracy of the optical path of the auxiliary interferometer needs to be strictly guaranteed. The optical path difference of the auxiliary interferometer is usually recalibrated regularly with a more accurate measurement reference, such as a gas absorption tank with hydrogen cyanide encapsulation (Fig. 6). For tasks requiring large scanning bandwidth or long distance measurement, the dispersion mismatch of the long fiber auxiliary interferometer will cause accuracy loss of several hundred microns, which needs to be compensated by efficient and fast numerical algorithms.

Industrial field environment will cause fluctuation of measurement optical path difference. When two lasers are simultaneously tuned upward and downward in frequency, the distance measurement errors can be compensated because the dynamic errors induced by optical path fluctuation are equal but opposite (Fig. 9). In addition, the dynamic error can be compensated by constructing a common path velocimeter to monitor the optical path fluctuations and through a single frequency laser (Fig. 10 and 11).

Conclusions and Prospects FSI distance measurement has formed a set of relatively mature theory and technology. FSI distance measurement can not only provide a high-precision, efficient and on-site traceable absolute distance measurement scheme to achieve spatial multi-path absolute distance measurement and multi-degree of freedom measurement, but also build a large-size spatial measurement and positioning system, such as the multilateral spatial coordinate positioning system and the spherical coordinate positioning system. Measurement instruments based on the principle of FSI distance measurement have been widely used in large advanced industrial equipment and scientific equipment manufacturing and monitoring process in the industrial measurement tasks. At present, the laser radar, which adopts photoelectric phase-locked loop and dual-laser optical frequency opposite scanning technology, has been widely used in industrial measurement. The absolute multiline technology, which based on the phase comparison method of auxiliary interferometer, has the highest FSI distance measurement uncertainty. In recent years, with the improving of the tunable laser and key optoelectronic devices, many new FSI distance measurement techniques, such as optical frequency resampling based on auxiliary interferometer and optical frequency comb, have been extensively and deeply studied. However there are some shortcomings in efficiency of extracting interferometry signal phase and frequency spectrum, stability of measurement datum, reliability of the dynamic error suppression, etc. It is hoped that with the continuous breakthrough of laser source and key technology, researchers can continuously improve the measurement performance index and further develop new large-size space measurement equipment, which will bring new breakthroughs for FSI distance measurement technology and its industrial measurement application.

Key words measurement; absolute distance measurement; frequency scanning interferometry; large space coordinate measurement; industrial measurement

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.4640