

多通道光频扫描干涉的主动引导测距研究进展



刘洋, 李建双, 赫明钊, 缪东晶, 许添松, 姜元凯

中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】 高端装备制造作为服务支撑航空航天、工业测量和大科学装置等领域发展的关键核心技术, 离不开高精度大尺寸绝对距离测量作为技术支撑。光频扫描干涉测距技术凭借其测量量程大、精度高以及能够测量无合作目标等优势, 能够有效满足大型高端装备制造的测量和监测需求。然而要实现高精度的光频扫描干涉测距, 需要具备纳米级别的大带宽调频能力, 要求必须解决调频非线性和光频扫描溯源参考等关键问题。从光频扫描干涉测距技术出发, 系统综述了国内外光频扫描非线性校正方法和光频扫描溯源参考技术的研究现状, 并总结了我国计量科学研究院在多通道光频扫描干涉主动引导测距技术方面的研究进展, 包括原理方法研究、测距系统搭建和技术指标测试等内容, 为该技术在大尺寸计量领域的进一步应用提供了坚实的理论依据和实践指导。

【关键词】 计量学; 大尺寸计量; 绝对测距; 光频扫描干涉; 主动引导; 多通道测量

【中图分类号】

【文献标识码】 A

【文章编号】 2096-9015(2025)00-0001-13

DOI: 10.12338/j.issn.2096-9015.2025.0011

【引用本文】 刘洋, 李建双, 赫明钊, 等. 多通道光频扫描干涉的主动引导测距研究进展 [J]. 计量科学与技术, 待出版.

Research Progress of Active Guided Ranging Based on Multi-Channel Optical Frequency Scanning Interferometry

LIU Yang, LI Jianshuang, HE Mingzhao, MIAO Dongjing, XU Tiansong, JIANG Yuankai

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

【Abstract】 As a critical core technology supporting the development of aerospace, industrial measurement, and large scientific facilities, advanced equipment manufacturing relies heavily on high-precision, large-scale absolute distance measurement as a fundamental technical requirement. Optical frequency scanning interferometry technology, known for its large measurement range, high precision, and the ability to measure uncooperative targets, effectively meets the measurement and monitoring needs of large-scale advanced equipment manufacturing. However, achieving high-precision optical frequency scanning interferometry necessitates a large bandwidth frequency modulation capability at the nanometer level, which requires resolving key issues such as frequency modulation nonlinearity and traceability references for optical frequency scanning. Starting with an overview of optical frequency scanning interferometry technology, this paper systematically reviews the research status of frequency modulation nonlinearity correction methods and optical frequency scanning traceability reference technologies, both domestically and internationally. It also summarizes the research progress made by the National Institute of Metrology of China in the area of multi-channel optical frequency scanning interferometry active guiding ranging technology. This includes studies on the underlying principles and methods, the development of ranging systems, and the testing of technical performance metrics. The paper provides a robust theoretical foundation and practical guidance for the further application of this technology in large-scale metrology.

【Key words】 metrology, large-scale metrology, absolute distance measurement, optical frequency scanning interferometry, active guiding, multi-channel measurement

收稿日期: 2025-01-15; 修回日期: 2025-03-30

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0612702); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52305591); 中国计量科学研究院基础科研业务费 (AKYJJ2409、AKYZD2212)。

作者简介: 刘洋 (1991-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 大尺寸绝对测距及应用, 邮箱: liuyang1@nim.ac.cn。

0 引言

随着我国高端装备制造业快速发展,特别是在航空航天^[1-2]、工业测量^[3-4]和大科学装置^[5-6]等领域,伴随产品尺寸范围不断超越常规认知,大型工件的复杂程度日益提高,对其自动化、高精度的感知能力提出了更为严格的要求,甚至是能够实时动态地完成姿态测量,为此大尺寸计量技术也在不断变革发展^[7]。目前在上述场景中,一些商业化几何量测量仪器,如摄影测量(单目视觉、双目视觉等)、激光跟踪仪、激光追踪仪(跟踪干涉仪)、激光扫描仪(地面激光扫描仪、工业激光扫描仪等)、室内空间定位仪器(iGPS、wMPS等)得到了广泛应用^[8-10],但是不同测量仪器间的测量原理、测量范围和测量精度上均存在差异,为了完成复杂高端装备制造现场测量任务,需要测量仪器间进行数字化组网测量,优势互补,协同完成测量任务,该过程离不开长度控制网对仪器组网全局整体精度和测网构型稳定的支撑^[11]。

长度控制网是通过在空间中多个方位构建多组高精度长度约束,例如在工业测量中常采用激光跟踪仪多站协同或单站转站的方式^[9,12],在全局测量控制网覆盖的测量环境中完成大尺寸工件上关键点的位置乃至整个工件姿态的变化测量^[13-14]。但是随着高端装备制造对高精度、多线程、可重构的数字化测量需求,以激光跟踪仪构建长度控制网将面临如下问题:首先,激光跟踪仪是通过高精度激光干涉测量(增量测距、绝对测距)和高精度角度测量组成的球坐标测量系统逐个获得点位的坐标信息,虽然能够通过内部的光电位置探测实现跟踪目标测量,但是难以同时监测空间多个点位的坐标信息,并且需要人工参与,降低了测量效率;另外,以激光跟踪仪多站协同的测量方式虽然能够实现多任务并行,但是在测量成本上难以控制,测量系统与功能高度冗余,并且仍然无法摆脱离线校准的测量模式,在线测量的溯源标准难以统一。目前除了 Leica、FARO、API 和深圳中图等生产的激光跟踪仪外,德国 Etalon 公司也同样生产了仅具备增量长度测量的激光追踪仪 LaserTRACER-NG^[15],相较激光跟踪仪在测量系统上进行了大幅度的简化,能够在测量成本上得到控制,但是其采用的增量式激光干涉仪测量原理容易受到断光影响,使得其难以满足工业现场人员和工装均较为密集的场所。北京航天测试计量技术研

究所面向大型运载火箭发射现场测试任务研制的调频激光雷达,能够实现 1~50 m 的测量范围,精度在 2 m 处可达 20 μm , 50 m 处可达 300 μm ^[16],为高精度构建大尺寸测量长度控制网提供了新的思路。

因此为了应对高端装备制造不断发展,在能够同时满足大尺寸、高精度测量需求的同时,需要兼顾测量高效率、自动化、智能化,具体体现在以下几个方面:

1)可溯源、高精度绝对测距。高端装备制造的测量尺寸能够达到几十米到上百米,在测量精度方面要求能够达到亚毫米乃至微米的测量精度,且应该能够现场溯源至高精度的波长频率标准;

2)多线程、多任务并行测量。传统单站测量仪器已无法满足大尺寸、高精度长度控制网的构建需求,在立体空间框架下构建量程可拓展、多线程测量的长度控制网已经成为数字化测量趋势;

3)测量光束的主动引导。为了满足高端装备制造高效率、自动化的测量需求,需要测量仪器能够提供光束主动引导功能,解决人工参与测量导致测量效率低的缺陷。

1 光频扫描干涉测距

光频扫描干涉测距是一种高精度的大尺寸绝对距离测量新方法,具有测量量程大、系统复杂度低、成本效益高且能够测量无合作目标等优点^[17]。在光频扫描干涉测距系统中,由于测量光路与参考光路之间存在相对的时间延迟,在光电探测器探测的不同时刻会存在光频差或者相位差,通过光频测量和相位测量能够高精度解算待测距离。理想条件下可以直接对干涉信号进行通过傅里叶变换并获取拍频频率,通过拍频频率与距离之间的关系实现绝对测距。为了保证测量的高分辨率,需要进行纳米量级带宽的高精度光频扫描,然而由于光源调制信号噪声、激光腔内温度变化和注入电流非线性变化等因素的存在,将存在光频扫描非线性的影响^[18-19],因此需要校正光频扫描非线性的影响,并需要对光频扫描频率进行高精度测量。

1.1 光频扫描非线性校正方法

光频扫描非线性校正方法主要有主动补偿法与被动校正法。其中主动补偿法通常采用锁相环原理将测量的干涉信号与参考信号进行鉴相后,将两者相位差作为反馈信号,实时对激光器输出的光频率进行控制,通过控制两信号相位差趋近于零,主动补

偿光频扫描的非线性。

2009 年, 美国蒙大拿大学的 P A. Roos 在光频扫描干涉系统中引入了基于两个锁相环的主动补偿非线性校正方法, 其中一个用于调节激光器注入电

流实现快调, 另一个用于调节激光器压电陶瓷实现慢调, 在 5 THz 的光频扫描范围内非线性误差仅为 170 kHz, 如图 1 所示, 在 1.5 m 的范围实现了 31 μm 的半高全宽分辨率和 86 nm 的测量标准差^[20]。

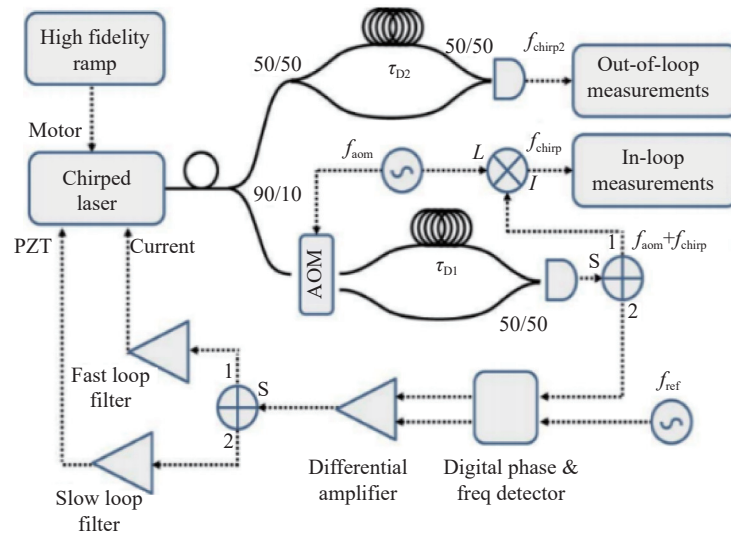


图 1 双锁相环自外差非线性主动补偿法^[20]

Fig.1 Dual phase-locked loop self-heterodyne nonlinear active compensation system^[20]

2010 年, 日本北海道大学的 S. Kakuma 等利用垂直腔面发射激光器作为光频扫描测距光源, 使用了锁相环主动补偿技术实现了 0.9 THz 的无调模扫描范围, 在 8 ~ 14 mm 的测量范围内实现了亚微米级的测量标准差, 如图 2 所示^[21]; 2015 年, 进一步采

用该主动补偿结构并配合铷原子气体池标记扫描频率, 通过最小二乘拟合确定干涉条纹梯度实现了绝对距离测量, 如图 2 所示, 在 8 mm 和 9 mm 的测量范围实现的测距均方根误差优于 5 nm^[22]。

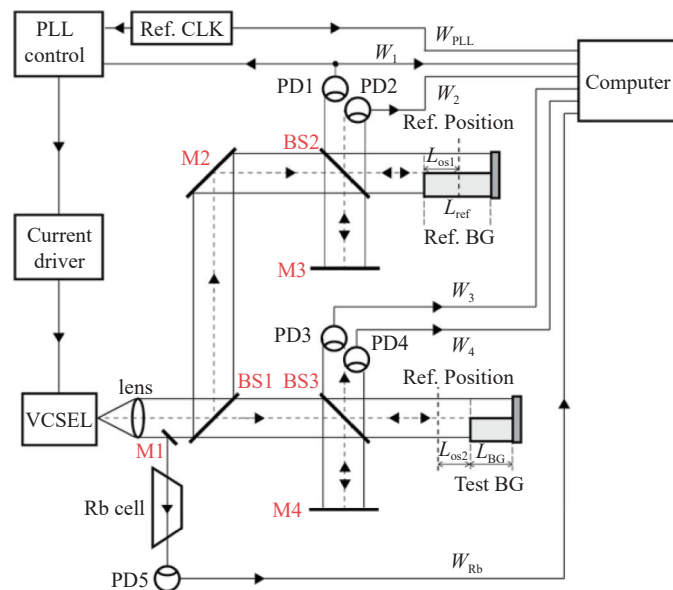


图 2 基于主动补偿和铷原子标记的光频扫描测距系统^[22]

Fig.2 Experimental setup of the FSI system using feedback correction based on phase-locked loop and a Rb-cell generating the frequency marker^[22]

2015年,上海交通大学的J. Qin等提出了一种复合反馈主动补偿法来补偿光频扫描非线性影响,50 GHz光频扫描范围内非线性误差从44 MHz下降到89 kHz,在光频域反射计中通过测量不同长度的光纤,50 m测量范围内测距分辨力为2 mm,750 m则为17.5 cm^[23]。

2020年,北京理工大学的Y. Feng等提出了一种应用光学锁相环的方法对商用激光器的光频扫描非线性进行主动补偿,通过对腔内压电陶瓷的调制响应进行优化,以实现频率啁啾和相干性的有效线

性化。在8 GHz范围内实现了啁啾率为160 GHz/s的高度线性化频率调制,并在光频域反射计中进行测试,在超过200 km的范围内测距分辨力为厘米量级^[24]。

2022年,电子科技大学的H. Zhao等提出了一种基于模型的强化学习控制方法,利用轻量化设计的神经网络模型实现了调频激光线性生成的环路控制,如图3所示^[25],该方法有效提高了光频扫描的线性度,表明了机器学习在光频扫描干涉测距中具有广阔的应用前景。

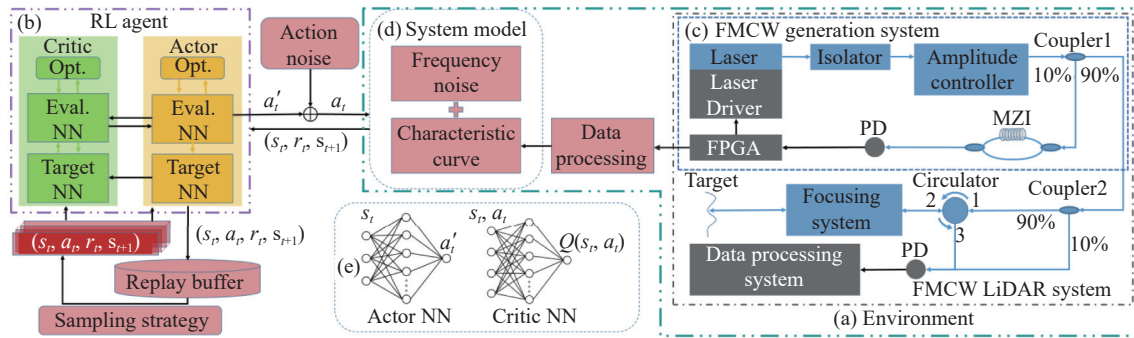


图3 基于模型强化学习控制方法的非线性主动补偿法^[25]

Fig.3 Nonlinear active compensation system based on model-based reinforcement learning control method^[25]

除主动补偿法外,通过在引入马赫-曾德干涉仪作为辅助干涉仪进行重采样的方法也被广泛应用于干涉仪的非线性补偿,由于测量干涉仪和辅助干涉仪在测距过程中使用同一个光频扫描激光器,因此具有相同的非线性规律,从而可为测量干涉仪提供非线性参考,能够对光频扫描的非线性进行被动校正^[26-28]。

2015年,天津大学的孟祥松和张福民等在等光频重采样的基础上,提出了通过信号拼接方式来提高测距分辨力的测量方法,在26 m的测量范围内实现了50 μm 的测距分辨力,与标准干涉仪比对示值误差优于100 μm ^[30]。

2021年,中国科学院的S. Jiang等提出了通过在电路上设计频率倍增器缩短重采样辅助干涉仪中参考光程,突破了奈奎斯特采样定理对参考光程的限制,如图4所示,在参考光纤的长度为3 m时,对6.4 m处目标进行距离测量,测量标准差为9.4 μm ^[31]。

2022年,哈尔滨工业大学的牛可通等针对等光频重采样方法中奈奎斯特采样定理的限制,提出了一种基于移相法重采样的方法,将辅助路信号与测量路信号进行混频,从而使得测量路信号中的时延降低,扩展了系统的测量范围^[32]。

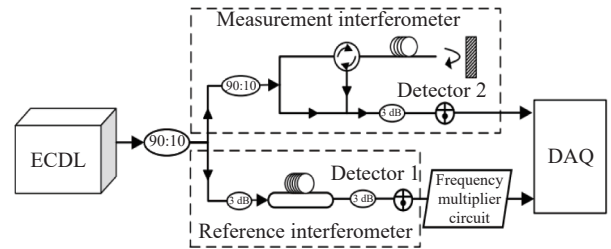


图4 基于频率倍增法进行重采样的非线性被动校正法^[31]

Fig.4 Nonlinear passive correction method based on frequency multiplication for resampling^[31]

对比两种非线性补偿方法,主动补偿法通过抑制光频扫描非线性能够获得较好的扫频线性度,能够大幅度的提升光频扫描干涉的测距性能,但是该方法对控制系统提出了较高的要求,尤其是在环境较为不稳定的情况下需要增强其鲁棒性;被动校正法光路系统简单、测量成本低,但是需要进一步解决引入辅助干涉仪中参考光程的光程漂移和光纤色散失配等问题。

1.2 光频扫描溯源参考技术

光频扫描干涉测距中光频扫描值的确定是影响距离测量的主要因素,目前主要采用的参考源有法布里-珀罗干涉仪、气体吸收池和光学频率梳。其

中法布里-珀罗干涉仪和气体吸收池在使用成本相对较低的同时,对环境变化相对敏感,且提供的标定峰较少,校准精度相对较低、长期稳定性不足,并且法布里-珀罗干涉仪和气体吸收池参数也需要预先经过高精度标定;而通过与光学频率梳进行拍频,以重复频率为频率扫描的空间刻尺能够为光频扫描过程提供十分密集的标定峰,并且通过将重复频率参考至铷原子钟频率标准,能够实现光频扫描的现场溯源,并且随着光学频率梳逐渐的小型化与工程化,逐渐成为了光频扫描溯源参考的理想选择。

2006 年,荷兰代尔夫特理工大学的 B L. Swinkels 将法布里-珀罗干涉仪应用于光频扫描干涉测距系统,通过法布里珀罗干涉仪的谐振峰对光学扫描频率进行监测,在 55 m 测量范围内的测距重复性为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[33]。

2014 年,英国牛津大学的 J. Dale 等提出采用气体吸收池对测量干涉仪的光程进行在线标定,避免了辅助干涉仪中参考光程在实际测量中的漂移问题^[34],如图 5 所示,该系统在 0.2 ~ 20 m 的测量范围内,相对测量不确定度为 $0.41\times 10^{-6}(k=2)$ 。

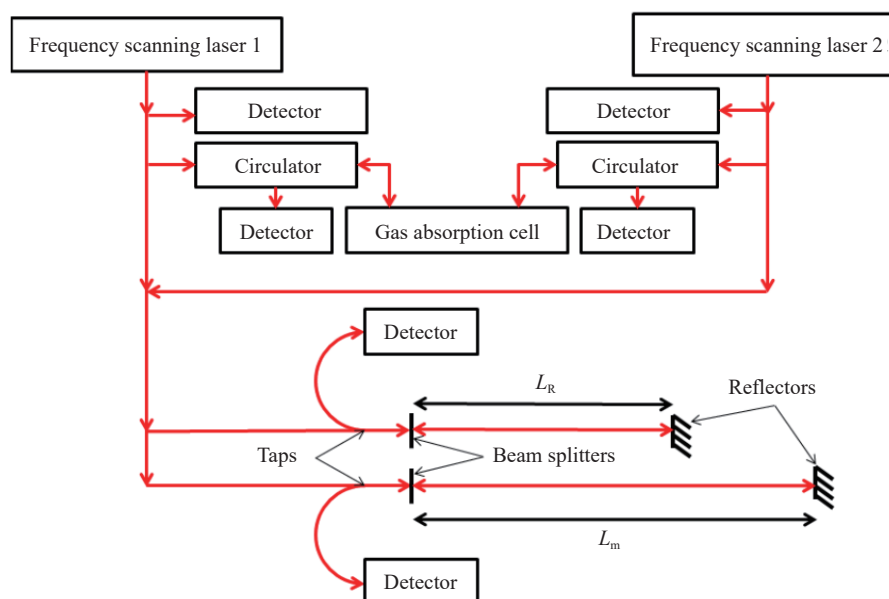


图 5 基于气体吸收池的光频扫描溯源参考方法^[34]

Fig.5 Optical frequency sweep traceability reference method based on a gas absorption cell^[34]

2017 年,美国的 T. DiLazaro 等人在使用气体吸收池标定了光频扫描频率后^[35],通过控制 12 个分布式反馈激光器分段进行光频扫描,得到了 5.5 THz 的线性光频扫描范围,在 1.4 m 的测量范围内测量标准差为 $0.18\text{ }\mu\text{m}$ ^[36]。

2018 年,西安交通大学的 W. Deng 等人提出采用法布里-珀罗干涉仪来提供光频扫描溯源参考,通过解调相位与扫描光频率相结合的方式计算测量距离,如图 6 所示,在 5 MHz 的采样率和 360 mm 的测量范围内,实现了 $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 的测量标准差和 $49.5\text{ }\mu\text{m}$ 的最大示值误差^[37]。

2019 年,法国斯特拉斯堡大学的 W. Yu 等人提出了一种基于光学频率梳校准光频扫描干涉绝对测距系统,如图 7 所示,光频扫描激光器产生的激光被分为两路,分别完成测距并与光学频率梳进行参考,

当光频扫描时每经过一个光梳重复频率时会周期性地产生干涉信号,通过记录干涉信号对应的扫描频率,即可标定光频扫描变化量,该方法大幅提高了扫描光频的校准精度,在测量 0.84 m 距离时测量重复性为 75 nm ^[38]。

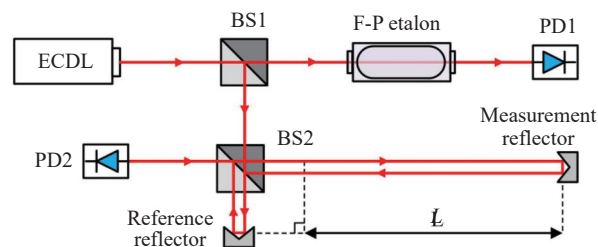


图 6 基于法布里-珀罗干涉仪的非线性被动校正法^[37]

Fig.6 Nonlinear passive correction method based on a Fabry-Pérot interferometer^[37]

2022 年,天津大学的尚岳等提出了一种基于气

体吸收池标定的光频扫描干涉绝对测距方法,采用氰化氢气体的吸收光谱特征为系统辅助干涉仪光程提供光频参考,并利用光学频率梳对吸收光谱谱线

进行了标定,与激光干涉仪进行对比实验,在 20 m 测距范围内,最大示值误差小于 50 μm ,测量重复性优于 4 μm ^[39]。

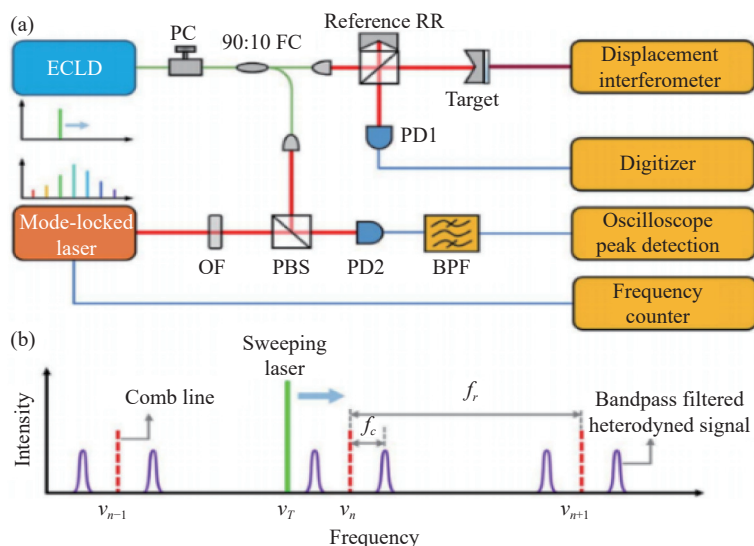


图 7 光学频率梳校准的扫频干涉测距系统^[38]

Fig.7 Frequency scanning interferometer ranging system based on optical frequency comb calibration^[38]

2024 年,天津大学的 J. Liu 等提出了采用重复频率为 100 MHz 的光学频率梳标定扫描光频的方法,通过窄带光电探测器将拍频信号转换为脉冲信号,并采用结合希尔伯特变换和自适应拟合的方法提取脉冲的峰值位置。在 6 m 的测量范围内,对 500 mm/s 的运动导轨测速误差仅为 240 $\mu\text{m/s}$ ^[40]。

2 多通道绝对测距技术

2004 年,英国牛津大学的 A. Reichold 等提出了将光频扫描干涉测距技术和多边定位方法相结合,并将其应用到了大型强子对撞机中关键结构装置的三维几何结构的监测过程^[41];随后,牛津大学联合英国 NPL 和德国 ETALON 公司合作开发了多通道绝对测距系统 MULTILINE^[34,42],最优配置能够从 124 通道中,同时测量 20 m 范围内目标的绝对距离,不确定度优于 0.5 $\mu\text{m/m}$,然而在增加测量路数时需要新增硬件单元与之匹配,同时其采用气体吸收池进行光频扫描溯源参考并修正光频扫描非线性,但是该仪器装置缺乏有效的光束引导策略与测量方法,目前仍局限应用于大型装置的对准与其关键部件的位移监测过程。另一方面,法国 CNAM 于 2019 年提出了一种高频微波的合成波长测距方法^[43],调制频率约为 5 GHz,在稳定控制的测量环境

中 100 m 的测距范围可以实现 2 μm ($k=1$) 的测量不确定度,在 5.4 km 处的测量分辨率能达 25 μm ;后续提出了基于该核心装置和转镜系统完成多边定位的方案^[44],并对测量系统中的机械误差进行了分析,该系统需要高精度的相位测量环节与之配合,同时紧凑式的光纤设计需要考虑到因为环境变化产生的光纤漂移引入的测量误差影响。

自光学光频梳诞生以来,便被高精度几何量计量领域给予厚望。2000 年,日本电气通信大学的 K. Minoshima 教授提出了应用飞秒模间拍频的相位测距方法^[45],310 m 的地下隧道内实现了长达 240 m 的绝对距离测量,测量分辨力为 50 μm 。此后陆续发展了多种测量方法与手段。2015 年,德国卡尔斯鲁厄理工大学的 C. Weimann 等人提出了基于模间拍合成波长法的多通道绝对测距多边定位方案,如图 8(a)所示^[46]。选择最大模间拍频约为 24 GHz,定位重复精度为 24.1 μm ,但模间拍频的相位测量法受限于电学相位的解算过程。韩国先进科学技术研究院的 S. Han 等人利用衍射光学器件实现多通道绝对测距^[47],如图 8(b)所示。当单目标移动长度为 1 m 且平均时间为 0.5 s 时,线性测量偏差为 279 nm,测量标准差为 79 nm,同时测量了距离约 3.7 m 且固定四个目标的圆形刚体,平均时间为 0.5 ms 时阿伦

偏差为 5.289 角秒,但是由于衍射光学器件的定向分束特性导致该方法灵活性不高。2018 年,天津大学郑继贵教授团队提出了基于衍射光学器件的飞秒脉冲时域互相关多目标长度测量方法^[48],约 3 m 的长度范围内相对精度优于 10^{-6} ,同时构建了简易的多边定位系统对光束分束的初始起点进行定位,定位重复精度分别为(9.71 μm 、31.94 μm 、41.27 μm),

但单光梳测距方法只能实现空间的离散距离测量,存在较大范围的测量盲区。2019 年,韩国先进科学技术研究院的 S. Han 等人以双光梳系统作为测长装置并以猫眼反射器作为目标装置设计了空间三维多边定位系统^[49],在 1 m³ 的范围内与三坐标测量机进行对比,坐标测量的最大误差分别为(38.8 μm 、42.8 μm 、68.5 μm)。

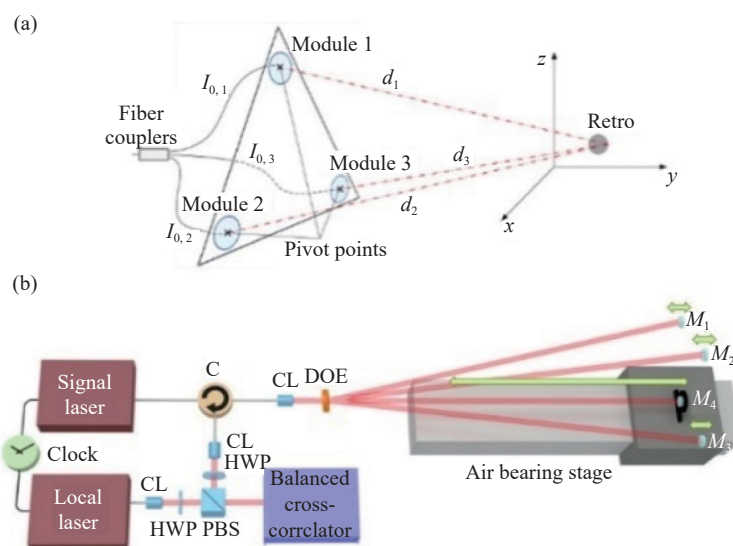


图 8 多通道绝对测距方法

Fig.8 Multi-channel laser ranging methods

多通道绝对测距技术凭借分光原理来拓展测量维度,在高端装备制造领域的复杂测量场景下具有广阔的应用前景,例如在空间目标坐标测量中,需要应用多通道绝对测距技术和多边定位算法完成高精度的坐标解算工作。但是目前多通道绝对测距技术中,各测量通道在协同控制以及动态引导方面依旧存在着技术瓶颈,需要开发出有效的光路引导控制方法,以此来突破多通道绝对距离测量在测量自动化程度与灵活性方面所面临的限制,从而推动其更好地应用与发展。

3 基于快反镜的主动引导控制

快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM, 快反镜)通过电动驱动系统实现快速旋转,从而改变光线的传播方向,是实现光束主动引导经济性较高的常用器件^[50],广泛应用于激光通信、航空航天、光电跟踪等领域^[51-54]。近年来,科研人员广泛采用快反镜作为光束主动引导的核心单元。2005 年,法国 CEA 的 F. Filhol 等设计了一种由压电双晶片驱动器激发

的快反镜,在真空条件下,以低至 1 V 的峰峰值驱动电压实现了 78° 的光学扫描范围^[55]。2008 年,美国空间动力学实验室的 R. Wassom 等面向空间应用设计了双轴精细快反镜,并配备了一面尺寸为 75 mm×150 mm 的轻量级反射镜^[56]。2012 年,美国麻省理工学院 J. Kluk 等提出了一种面向精密光学平台的高带宽双轴快反镜,利用位置回路实现快反镜的回路控制,实现了 10 kHz 的系统带宽和 ± 3.5 mrad 的行程范围^[57]。2015 年,美国加州理工学院的 K. Patterson 等为快反镜设计了反馈控制器,并用于日冕测量仪器,通过对低频姿态控制系统飘移的反馈补偿与对高频音调扰动的前馈取消,实现了观测过程中 0.4 μrad 的指向稳定精度^[58]。2017 年,奥地利维也纳工业大学的 E. Csencsics 等修改了快反镜的旋转刚度,使每个轴的调谐频率与所需的驱动频率相匹配,减少了 10 倍的电流消耗,并增加了 7.7 倍的调谐快反镜扫描范围^[59]。2022 年,韩国高等工程研究院的 H. Kim 等为便携式光谱传感器制造并引入了具有高分辨率和高速度倾斜能力的快反镜,实

现了 $1.27\ \mu\text{rad}$ 的分辨率和 $282\ \text{Hz}$ 的固有频率^[60]。

国内也对基于快反镜的光束主动引导设备进行了许多研究。2008 年, 湖南工业大学的 Q. Zhou 等利用柔性铰链和柔性机构来构建快反镜的结构, 并引入了一个激光束抖动控制测试台, 以改进快反镜的抖动控制技术^[61]。2011 年, 中国科学院的丁科等在 PID 控制算法基础上加入了自适应前馈环节, 构成误差自适应前馈复合控制, 在不增加系统复杂性的同时缓解了光束抖动, 提高了卫星平台捕获跟瞄系统的瞄准精度^[62]。2016 年, 同为中国科学院的 J. Tian 等使用 MEMS 加速度计和陀螺仪作为反馈组件, 实现了基于 CCD 的快反镜跟踪控制系统, 提出了将自适应滤波器集成到快反镜控制系统的简化方法有效提高了闭环反馈控制系统的稳定性^[63]。2020 年, 天津大学的尚岳等提出利用二维快反镜取代精密二维转台并将其应用于光频扫描干涉测距中^[64], 实现测距光束的快速偏转与定位, 在提升系统动态性能的同时降低了系统构建成本与复杂度。2024 年, 中国科学技术大学的 J. Hou 等人提出了一种通过拟合系统的传递函数和修改阶跃响应来塑造输入信号的控制方法^[65], 并运用于开环控制模式下的快反镜, 减小了控制的超调量和稳定时间的同时提高了工作带宽。

以快反镜为基础的主动引导方式, 有着速度快、经济性良好以及稳定性强等诸多优势。借助理的光路设计, 能够让测距装置在自由空间内达成

较大角度范围的测量, 进而契合高端装备制造领域对于高效率、自动化测量的相关需求。

4 多通道光频扫描干涉的主动引导测距技术研究

中国计量科学研究院开展了多通道光频扫描干涉的主动引导测距技术研究, 分别在基于重采样的光频扫描干涉绝对测距技术、多通道光频扫描干涉绝对测距技术和光束主动引导测距技术上开展了系统性研究工作, 其中多通道测距技术与光束主动引导测距技术都建立在高精度光频扫描干涉绝对测距技术可行的基础上。该研究在中国计量科学研究院室内大长度基准装置上进行了测试, 测试结果如下:

- (1) 单通道测距范围不小于 $0\sim 50\ \text{m}$, 测量不确定度优于 $15\ \mu\text{m}(k=2)$;
- (2) 多路测量可拓展路数为 4 路;
- (3) 研制的空间光束的主动引导测距装置主动引导的机械转角优于 $\pm 20^\circ$ 。

光频扫描干涉测距系统主要分为三个部分, 即辅助路、测量路和标定路, 如图 9 所示。在测量过程中测量信号会受到光频扫描非线性影响, 因此加入了基于长延时光纤的辅助干涉仪, 利用等光频重采样法校正光频扫描非线性; 标定路通过光学频率梳与光频扫描激光器拍频的方式, 实时标定扫描光频率, 实现测距的现场溯源^[66]。

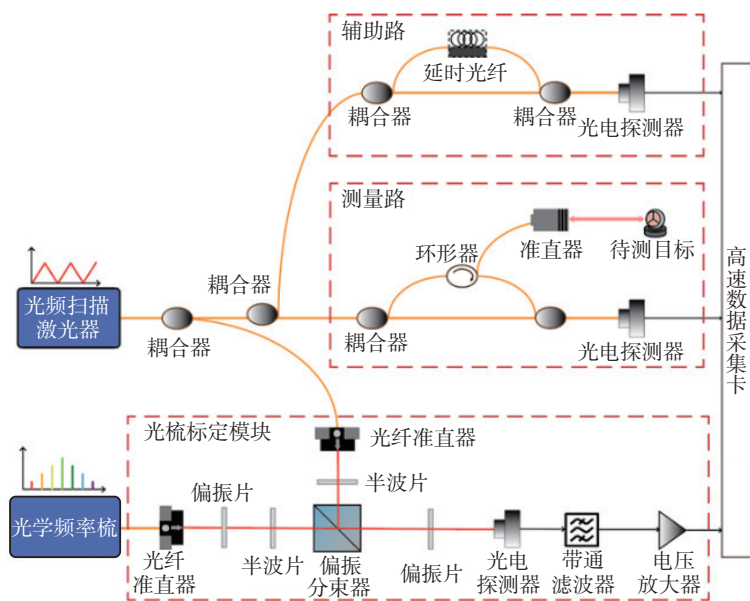


图 9 光频扫描干涉测距系统原理图

Fig.9 Schematic diagram of the optical frequency scanning interferometric ranging system

测距中光频扫描激光器的扫描波长设置为 1540 ~ 1560 nm, 扫描速度设置为 10 nm/s, 光学频率梳的重复频率约为 200 MHz。测距系统中的高速数据采集卡负责采集测量信号、辅助信号与光梳拍频信号, 采样率为 12.5 MSa/s。此外, 为了方便光频扫描干涉测距系统的结果解算, 利用 MATLAB 将解算算法编写至图形界面程序, 如图 10 所示, 利用该图形界面程序已经具备测试数据的解算, 目前该程序具备参考光程差解算、测量距离解算、TCP 环境参数获取、程序参数修改、解算结果图像输出和自动保存解算结果等功能。

多通道光频扫描干涉测距拓展光路直接用于替

换光频扫描干涉光路中的测量干涉仪, 如图 11 所示。光频扫描激光 1×4 分束器被分为 4 束激光, 每束激光分别输出给测量干涉仪, 即每束激光都被耦合器分为两束光, 一路作为参考光, 另一路作为测量光打到待测目标后回光与参考光进行合束。合束光的数量即为可拓展的通道数, 通过 4×1 光开关即可切换不同通道进行测量工作, 使该通道的合束光在光电探测器上发生拍频, 产生测量拍频信号。由于将 1×4 分束器与设置于测量干涉仪分光之前或合束之后, 这使得在切换通道前后, 测距的零点不会受光开关切换动作的影响。



图 10 光频扫描干涉测距系统软件界面

Fig.10 Software interface of the optical frequency scanning interferometric ranging system

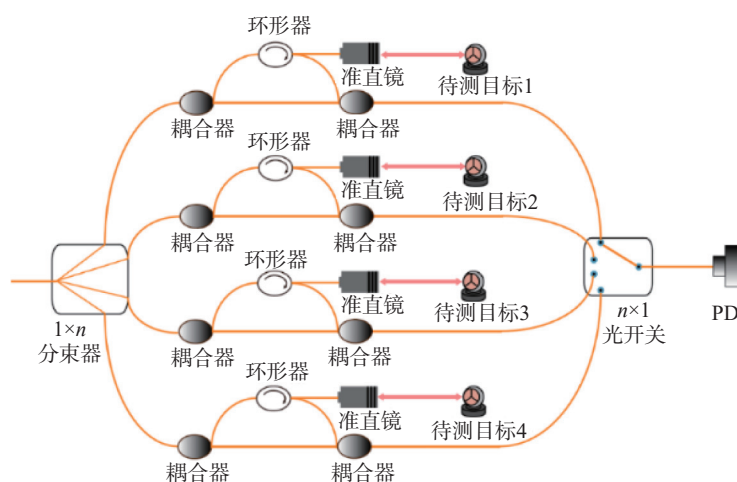


图 11 在探测端进行拓展的多通道测距光路

Fig.11 Multi-channel ranging optical path expanded at the detection end

在光频扫描干涉测距系统的精度测试中, 绝对距离测量范围为 0 ~ 50 m, 分别测量 1 m、5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 和 50 m 的位置, 每个测量位置上

分别采集 5 组测量数据, 结果表明, 当测量范围为 0 ~ 50 m 时, 示值误差均分布在 $(-15, 15) \mu\text{m}$ 范围内, 测量系统和结果如图 12 和图 13 所示。



图 12 光频扫描干涉测距精度测试现场图
Fig.12 Accuracy testing of absolute distance measurement based on frequency scanning interferometry

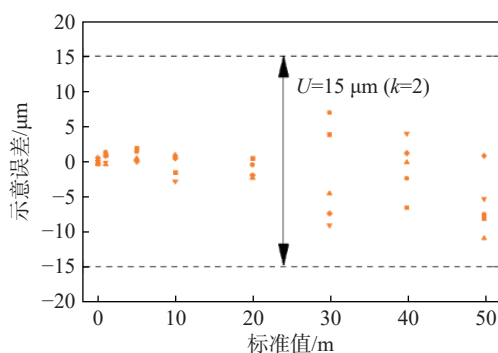


图 13 光频扫描干涉测距精度测试示值误差
Fig.13 Indication error plot of accuracy testing of absolute distance measurement based on frequency scanning interferometry

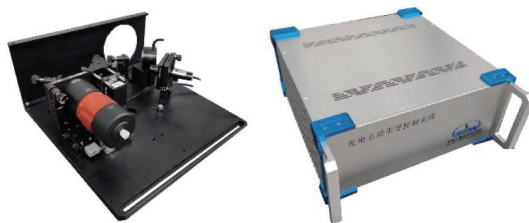


图 14 主动引导硬件光路和控制系统实物图

Fig.14 Physical image of active guidance hardware optical path and control system

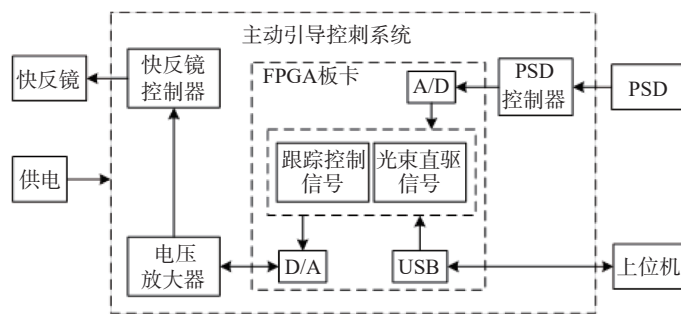


图 15 光束主动引导控制系统原理图

Fig.15 Principle diagram of active beam guidance control system

光束主动引导系统分为主动引导硬件光路、主动引导控制系统与上位机三部分,其中光束引导硬件光路主要由准直镜、反射镜、双色镜、相机、快反镜、光电位置探测器 PSD 和指示光组成,主动引导系统的硬件光路如图 14 所示。光束主动引导系统可以根据实际需要对各个测量通道进行拓展,在本文的研究工作中,对其中一个通道构建主动引导硬件光路验证主动引导的可行性。

主动引导控制系统主要由 FPGA 板卡、快反镜控制器、PSD 控制器与电压放大器组成,如图 15 所示。其中 PSD 将探测的位置信号输出给 PSD 控制器,经过模数转换后输出给 FPGA 板卡处理。上位机将控制输出的指令通过 USB 串口输出给 FPGA 板卡,经过处理后通过数模转换输出给电压放大器,再输出给快反镜控制器,实现快反镜的角度驱动^[67]。

同时编写了基于 LabVIEW 的光束引导上位机软件,并将其与光束引导控制驱动功能、视觉识别功能集成于一体,光束通过相机识别粗调节至待测目标附近后,利用 PSD 的回光位置,对快反镜方向进行细调节,直至 PSD 以较高的回光强度位于中心位置时,即可认为对准测量目标,并进行测距,如图 16 所示。

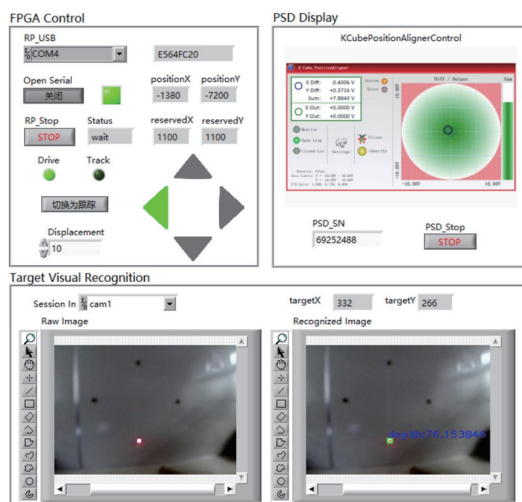


图 16 光束主动引导系统的软件部分
Fig.16 Software components of an active beam guidance system

5 结论

本文针对多通道光频扫描干涉的主动引导测距技术的研究进展进行了系统介绍。从光频扫描干涉的调频非线性校正和光频扫描溯源参考等方面进行详细阐述,同时针对现阶段的原理研究、装置搭建和指标测试等实验内容进行介绍,为未来将光频扫描干涉绝对测距技术进一步应用到几何量测量领域,如大长度标准装置、大尺寸测量控制网、大型装置多线程监测和多边定位及姿态测量等提供重要参考。

为进一步拓展光频扫描干涉绝对测距应用领域,在光频扫描干涉测距和多通道主动引导控制等方面还需要在以下方面进一步提升:

1)相位法动态测量。目前利用等光频重采样法来实现光频扫描非线性校正,采用相位法解算同样可以实现高精度绝对测距,并且相较于等光频重采样法通过 IQ 解调能够大幅提升测量速率,有希望应用于动态测量;

2)无合作目标测量。光频扫描干涉系统在无合作目标测量上具备高相干测量优势,后续将继续研究在无合作目标测量过程中提升探测回光强度,以实现高精度的无合作目标绝对距离测量,进一步拓展应用场景;

3)目标自动识别跟踪。目前主动引导依然需要依赖人的参与,来进行目标的初步定位,后续将进一步结合视觉传感器和大数据模型实现对测量目标的

自动识别,同时开发相关跟踪算法来实现对测量视场内测量目标的自动跟踪,快速地完成对待测距离的测量。

参考文献

- [1] Davide B, Haddad H K, I. M F, *et al.* Experimental and numerical investigation of an aircraft wing with hinged wingtip for gust load alleviation[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2023, 119: 1.
- [2] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(7): 1367-1373.
- [3] Peng W, Xiao Y. Least squares based geometric error measurement for sparse view CT: a 2D simulation study[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(3): 1.
- [4] 潘协龙. 自动化检测技术在汽车制造领域中的应用研究 [J]. *时代汽车*, 2022(23): 25-27.
- [5] 朱丽春. 500 米口径球面射电望远镜 (FAST) 主动反射面整网变形控制 [J]. *科研信息化技术与应用*, 2012, 3(4): 67-75.
- [6] 蔡国柱. 大型离子加速器先进准直安装方法研究 [D]. 兰州: 中国科学院研究生院 (近代物理研究所), 2014.
- [7] 马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势 [J]. *计测技术*, 2006(6): 1-5.
- [8] B A P, P A, C C, *et al.* Building infrastructure analysis using total station and unmanned aerial vehicle drone for surveying and modelling[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, 1169(1): 1.
- [9] D M, Luca M, Fiorenzo F, *et al.* Dimensional measurements in the shipbuilding industry: on-site comparison of a state-of-the-art laser tracker, total station and laser scanner[J]. *Production Engineering*, 2022, 17(3-4): 625-642.
- [10] 吴文涛, 何赞泽, 杜旭, 等. 融合相机与激光雷达的目标检测与尺寸测量 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(6): 169-177.
- [11] 刘廷明. 精密工程测量控制网的建立方法——上海光源工程首级控制网的建立 [J]. *江西测绘*, 2007(S1): 15-18.
- [12] 梅中义, 范玉青. 基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配技术 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(1): 65-69.
- [13] 杨振, 范百兴, 李广云, 等. 激光跟踪仪精密测边网的建立与解算 [J]. *测绘通报*, 2018(S1): 184-188.
- [14] 吴斌, 许友, 杨峰亭, 等. 激光跟踪绝对测长多面法三维坐标测量系统 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 140-145.
- [15] Schneider C. LaserTRACER- A new type of self tracking laser interferometer[C]. *Proceedings of the IWAA*, 2004.
- [16] 刘柯, 张容卓, 缪寅宵, 等. 调频激光雷达测量技术及在航空航天领域的应用 [J]. *宇航计测技术*, 2021, 41(4): 1-8.
- [17] Deng Z, Liu Z, Jia X, *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.
- [18] Tian Y, Cui J, Wang Z, *et al.* Nonlinear correction of a laser scanning interference system based on a fiber ring resonator[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(4): 1030-1034.
- [19] Tang L, Jia H, Shao S, *et al.* Hybrid integrated low-noise linear chirp frequency-modulated continuous-wave laser source based on self-injection to an external cavity[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 1948-1957.

- [20] 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.
- [21] Kakuma S, Katase Y. Resolution improvement in vertical-cavity-surface-emitting-laser diode interferometry based on linear least-squares estimation of phase gradients of phase-locked fringes[J]. *Optical review*, 2010, 17: 481-485.
- [22] Kakuma S. Frequency scanning interferometry with nanometer precision using a vertical-cavity surface-emitting laser diode under scanning speed control[J]. *Optical Review*, 2015, 22: 869-874.
- [23] Qin J, Zhou Q, Xie W, *et al.* Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. *Optics letters*, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [24] Feng Y, Xie W, Meng Y, *et al.* High-performance optical frequency-domain reflectometry based on high-order optical phase-locking-assisted chirp optimization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6227-6236.
- [25] Zhao H, Yuan G, Xiao J, *et al.* Linearization of nonlinear frequency modulated continuous wave generation using model-based reinforcement learning[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 20647-20658.
- [26] 李超林, 刘俊辰, 张福民, 等. 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述 [J]. *光电工程*, 2022, 49(7): 210438.
- [27] 谈宜东, 林晨啸. 调频连续波激光雷达光源非线性校正技术(特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(3): 0328001.
- [28] 宋鲁明, 张福民, 孙栋, 等. 基于可调谐激光器扫频干涉绝对距离测量方法研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 1-15.
- [29] Yüksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. *Optics express*, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [30] 孟祥松, 张福民, 曲兴华. 基于重采样技术的调频连续波激光绝对测距高精度及快速测量方法研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(23): 43-49.
- [31] Jiang S, Liu B, Wang H. FMCW laser ranging method based on a frequency multiplier[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 918-922.
- [32] 牛可通. 基于相位噪声补偿的超相干扫频干涉测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [33] Swinkels B L. High accuracy absolute distance metrology[C]. *Proceedings of ESA/CNES ICSO 2006*, 2006.
- [34] 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.
- [35] DiLazaro T, Nehmetallah G. Phase-noise model for actively linearized frequency-modulated continuous-wave lidar[J]. *Appl Opt*, 2018, 57(21): 6260-6268.
- [36] 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.
- [37] Deng W, Liu Z, Deng Z, *et al.* Extraction of interference phase in frequency-scanning interferometry based on empirical mode decomposition and Hilbert transform[J]. *Applied optics*, 2018, 57(9): 2299-2305.
- [38] Yu W, Pfeiffer P, Morsali A, *et al.* Comb-calibrated frequency sweeping interferometry for absolute distance and vibration measurement[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5069-5072.
- [39] 尚岳, 吴腾飞, 林嘉睿, 等. 基于光谱标定的光频扫描干涉绝对测距方法 [J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 166-176.
- [40] Liu J, Liu M, Chen G, *et al.* Dynamic Measurement with High Precision Using Frequency Agile Spatial Encoding Integrated FMCW LiDAR[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(10): 4036-4047.
- [41] Reichold A, Kolbe L, Brenner W. Performance Measurement of CRM in financial services[J]. *Performance measurement and management: Public and private*, 2004, 1: 859-866.
- [42] Shihua Z, Dandna S, Hao J, *et al.* Absolute distance measurement using sinusoidal phase modulating frequency sweeping interferometry with a reference interferometer[J]. *Optics express*, 2022, 30(21): 1.
- [43] Guillory J, de La Serve M T, Truong D, *et al.* Uncertainty assessment of optical distance measurements at micrometer level accuracy for long-range applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(6): 2260-2267.
- [44] Guillory J, Truong D, Wallerand J P, *et al.* A sub-millimetre two-wavelength EDM that compensates the air refractive index: uncertainty and measurements up to 5 km[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 35(2): 025024.
- [45] Minoshima K, Matsumoto H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5512-5517.
- [46] Weimann C, Hoeller F, Schleitzer Y, *et al.* Measurement of Length and Position with Frequency Combs[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015.
- [47] Han S, Kim Y J, Kim S W. Parallel determination of absolute distances to multiple targets by time-of-flight measurement using femtosecond light pulses[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25874-25882.
- [48] Liu Y, Lin J, Yang L, *et al.* Construction of traceable absolute distances network for multilateration with a femtosecond pulse laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26618-26632.
- [49] Han S, Kim S, Oh J S, *et al.* Absolute distance measurement system for precise 3D positioning[C]. *Applied Optical Metrology III*, 2019.
- [50] 王硕, 程勇策, 郎野, 等. 基于快反镜补偿的激光主动探测单元设计 [J]. *电视技术*, 2023, 47(7): 44-48, 52.
- [51] 朱伟鸿, 汪洋, 王栎皓, 等. 卫星激光通信 MEMS 快速反射镜可靠性研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(9): 230-242.
- [52] 李成浩. 可用于大口径、大视场空间望远镜稳像精度测试的动态目标模拟方法研究 [D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [53] 刘力双, 夏润秋, 吕勇, 等. 音圈电机快速控制反射镜研究现状 [J]. *激光杂志*, 2020, 41(9): 1-7.
- [54] 舒郁, 陈青山, 夏润秋, 等. 光电跟踪系统音圈电机快反镜的预先修正控制 [J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 811-815.

- [55] Filhol F, Defay E, Divoux C, *et al.* Resonant micro-mirror excited by a thin-film piezoelectric actuator for fast optical beam scanning[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 123: 483-489.
- [56] Wassom S R, Davidson M. Development of a Low-Cost Fine Steering Mirror[C]. *Proceedings of the 39th Aerospace Mechanisms Symposium*, 2008.
- [57] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [58] Patterson K, Shields J, Wang X, *et al.* Control design for momentum compensated fast steering mirror for the WFIRST-AFTA coronagraph instrument [C]. *SPIE*, 2015.
- [59] Csencsics E, Schitter G. System design and control of a resonant fast steering mirror for lissajous-based scanning[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22(5): 1963-1972.
- [60] Kim H S, Don Lee K, Lee C H, *et al.* Development of piezoelectric fast steering mirror with tilt error compensation for portable spectroscopic sensor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2023, 237(12): 1847-1857.
- [61] Qingkun Zhou, Pinhas Ben-Tzvi, Dapeng Fan, *et al.* Design of fast steering mirror systems for precision laser beams steering [C]. *International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 2008.
- [62] 丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制 [J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 184-189.
- [63] Tian J, Yang W, Peng Z, *et al.* Application of MEMS accelerometers and gyroscopes in fast steering mirror control systems[J]. *Sensors and Actuators A*, 2016, 16: 1-13.
- [64] 尚岳. 光频扫描干涉构建三维坐标控制网方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [65] Hou J, Li H, Qian L, *et al.* Control of a Micro-Electro-Mechanical System Fast Steering Mirror with an Input Shaping Algorithm[J]. *Micromachines*, 2024, 15(10): 1215.
- [66] Xu T, Liu Y, Cui J, *et al.* Calibration methods of optical path difference in optical frequency scanning interferometry with resampling resolving[J]. *Measurement*, 2025, 5: 116854.
- [67] Liu Y, Li J, He M, *et al.* Development of a beam-guided laser detection module for absolute ranging[C]. *AOPC 2024: Optical Sensing, Imaging Technology, and Applications*, 2024.

本文编辑: 霍祎炜