

光电一体小型化双飞秒激光频率梳仪器研发

马宇轩¹, 周思宇¹, 吴冠豪^{2,*}

(1. 光维(广东)科技有限公司 佛山 528251;

2. 清华大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 北京 100084)

Email: guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn

摘要: 本文报告了一套小型化、仪器化的双光梳光源, 通过光电一体集成化设计大幅浓缩至掌机尺寸, 比传统的实验台搭建双光梳系统或商品化双光梳机柜的体积缩小了数十乃至上百倍, 并且能够自动启动锁定和维持长期稳定运行。该双光梳设备能够轻易地长途搬运并在工业、航天、车载等环境条件复杂的场景下使用, 为双光梳测量技术从科研平台拓展至广阔的实地测量打下坚实基础, 提升我国相关领域对距离、光谱、时间、频率等物理量的外场精密测量能力。

关键词: 双光梳; 小型化; 绝对距离测量; 光频测量

1、研究背景

飞秒激光频率梳是本世纪发明的一种重要的光学测量工具, 能够通过超低时间抖动的飞秒激光脉冲序列对光频或微波频率进行高精度的频率测量感知, 或将时间、距离、电磁场等物理量转换为频率测量并大幅提升对原始物理量的测量精度。双光梳异步采样技术由于精度高、测速快、可溯源、实时性、无机械扫描等诸多优势逐渐成为绝对距离测量、光谱测量、时间频率传递、太赫兹检测等领域的研究热点。但目前双光梳光源存在系统结构复杂、体积庞大、造价昂贵、操作门槛高、小型化仪器化程度低等痛点问题, 因此使用场景极度受限, 严重阻碍了各种双光梳技术的推广和落地使用, 这也正是目前双光梳测量技术虽然比传统测量技术有诸多指标上的优势, 但仍然无法转化为实用仪器对传统仪器进行升级迭代的瓶颈所在。

本文针对这一痛点问题, 在光学、机械、电学、软件等多维度对双光梳光源系统进行优化集成, 形成了小型化、仪器化的双光梳设备整机, 将实验室内原本需要一台机柜实现的双光梳光源大幅缩小至仅为 220mm×172mm×55mm 的掌机尺寸, 并结合双光梳测距设备实现了更优的测量精度和长期稳定测量能力。

2、研究内容

(1) 全保偏全光纤低噪声飞秒锁模激光器

飞秒锁模激光器是光梳的核心, 它的锁模稳定性、时间抖动和相位噪声等指标直接影响后续测量的精度极限。本文采用非线性放大环路反射镜(NALM)锁模原理[1], 设计了全保偏全光纤

的谐振腔结构，并对色散进行了精准补偿，具有光谱平滑、脉冲超短、自启动好、环境稳定、噪声低、寿命长、无老化等多种优势，形成优质的光频梳光源核心。将尽可能多的谐振腔光纤缠绕在柱状压电陶瓷上，实现重复频率的大范围调节和锁定。同时，设计还考虑了光纤盘绕和装调的便利性，使整个光学部分能够卷曲在一个小于手机面积的扁平封装里，兼顾了高指标、稳定性和小型化。

(2) 全功能控制、驱动、锁定电路集成

传统双光梳系统中大部分电子学模块都是以成品设备形式出现，并在各个不同功能、不同生产商的设备间用光纤、电缆进行复杂的连接。因此，对电子学系统的全功能模块自研是双光梳小型化的另一个重要方面。本设计中，对整套双光梳所需的若干电源、总控、时钟、泵浦驱动、控温、高压驱动、鉴相锁相等电子学模块均进行了小型化自研，并通过合理的统筹分配系统资源大幅降低了不必要的热耗、不同源的噪声等问题，在缩小体积的同时进一步提升了性能。

(3) 抗力热干扰能力设计和系统小型化集成

飞秒激光振荡器是系统中最脆弱、对环境最敏感的部分，又是整个系统的核心，在面对环境条件相对恶劣的工业、航天 [2] 使用场景时，必须对其进行良好的力热保护。对谐振腔核心底板支撑增加合适刚度的减震垫，能够有效地衰减高频处的高强度共振，使光源核心能够通过航天级力学振动测试。通过对光源增加控温系统，并将热沉与电子发热元件统一规划风道，能够大幅减小谐振腔由于温度波动带来的重复频率大范围漂移。

对设备内整体空间进行上述优化布局和充分利用，能够实现最小体积的双光梳光源尺寸为 $220\text{mm} \times 172\text{mm} \times 55\text{mm}$ ，如 Fig. 1 所示。



Fig. 1. The compact and miniaturized dual-comb laser device with all optical and electronic parts included.

(4) 双光梳光源的测量能力验证

为了验证所研发的小型化双光梳能否同时保证测量精度、长期稳定性和可靠性，我们以所研设备为光源，在无人看守状态下进行了数小时的双光梳绝对测距实验，在距离 1m，测速 1kHz 情况下连续测量了大于两千万个数据点，重复性精度达到 $3.2 \mu\text{m}$ ，并且没有任何坏点出现，充分验

证了光源的优异指标和可靠性，数据结果如 Fig. 2 所示。

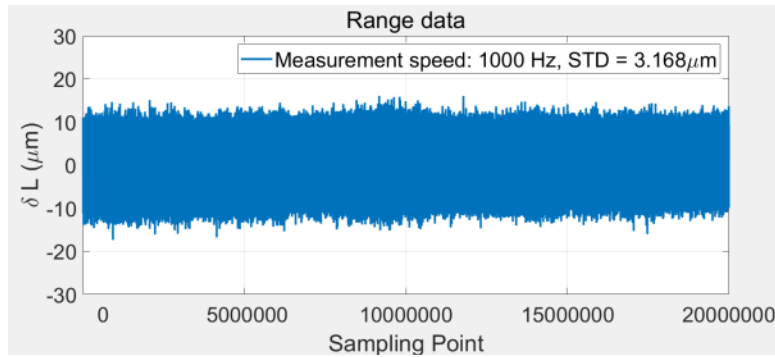


Fig. 2. Long-term absolute distance measurement result using the presented dual-comb laser device.

3、结论

本文从光、机、电全方位简要阐述了双光梳光源的小型化关键技术，实现了目前世界上体积最小的光电一体化双光梳设备，与当前普遍的大机柜式双光梳光源形成代差，并结合绝对距离精密测量为例展示了其指标优越性、长期稳定性和可靠性。该小型化双光梳仪器打破了多年来传统双光梳使用场景极度受限的巨大壁垒，为各种双光梳精密测量技术向更多应用场景的仪器化落地铺平了道路，未来有望催生一系列工业用或航天用的双光梳绝对距离测量仪、双光梳吸收光谱分析仪、双光梳太赫兹异步采样光谱仪等国产高端仪器。

参考文献

- [1] KUSE N, JIANG J, LEE C C, et al. All polarization-maintaining Er fiber-based optical mirror[J]. Optics Express, 2016, 24(3):3095-3102.
- [1] ZHOU S Y, GU Y Y, YANG Y T, et al. Space application and test design of dual-comb ranging technique[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3):127-135.