

文章编号: 1005-5630(2024)01-0001-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303030034

全保偏飞秒光纤激光器异步锁定技术研究

汤成, 郝强, 刘峥

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于全保偏掺铒光纤激光器、锁相环系统和太赫兹测距光路搭建了一套太赫兹双光梳测距系统。所采用的全保偏掺铒光纤激光器重复频率为 79.261 MHz。利用压电陶瓷 (piezoelectric ceramics, PZT) 和步进电机 (stepper motor, SM) 双级反馈控制的方案, 实现了重复频率锁定和重复频率 1.54 MHz 可调。使用频率计数器对双光梳重复频率锁定效果进行监测, 重复频率锁定的峰峰值抖动为 ± 1.5 mHz, 抖动标准差为 0.4 mHz。将双光梳重频差设置在 10 Hz, 10 min 内重复频率差最大抖动为 3 mHz, 标准差为 0.6 mHz。进一步将异步采样双光梳系统应用于太赫兹测距, 测量移动距离的误差为 3 μ m。该系统具有锁定精度高, 稳定性强等优势, 有望应用于生物无损检测和工业精密加工中。

关键词: 双光梳; 掺铒光纤激光器; 锁相环; 重复频率锁定

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A

Study on asynchronous locking technology of femtosecond fiber laser with full deflection maintaining

TANG Cheng, HAO Qiang, LIU Zheng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, a terahertz dual-comb ranging system is constructed based on a fully bias-maintaining erbium-doped fiber laser, phase-locked loop system and terahertz ranging optical path. In the experiment, the full bias-maintaining erbium-doped fiber laser had a repetition frequency of 79.261 MHz, and the repetition frequency was locked and the frequency was adjustable at 1.54 MHz by piezoelectric ceramic (PZT) and stepper motor (SM) dual-stage feedback control scheme. The peak-peak jitter and standard deviation of jitter were ± 1.5 mHz and 0.4 mHz respectively. The repetition frequency difference of the dual-comb was set at 10 Hz, and the maximum jitter and standard deviation of repetition frequency difference within 10 min were calculated to be 3 mHz and 0.6 mHz. Furthermore, the asynchronous sampling dual-comb system was applied to the terahertz ranging, and the error of measuring the moving distance was 3 μ m. The system has the

收稿日期: 2023-03-03

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(11727812)

第一作者: 汤成 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超快激光技术。E-mail: tangchenghy@163.com

通信作者: 郝强 (1981—), 男, 副教授, 研究方向为超快光纤激光。E-mail: qianghao@usst.edu.cn

advantages of high locking precision and strong stability, and is expected to be used in biological nondestructive testing and industrial precision machining.

Keywords: dual-comb; erbium-doped fiber laser; phase-locked loop; repetition frequency locking

引 言

绝对距离测量在卫星编队飞行校正、航空装备检测和微机电系统测量等领域有着重要应用,双光梳测距技术在其中发挥着极大作用^[1]。太赫兹波段拥有可见和近红外光学波段不具备的强穿透性,未来将在精密测量领域发挥重要作用。

异步采样基于飞秒光梳,它是双光梳测距系统的重要组成部分^[2]。在时域上,飞秒光梳表现为时间间隔相等的脉冲串;在频域上,其表现为一系列的频率间隔相等的梳齿的合集。光学频率梳的发展虽然仅有 20 年左右,但作为一项突破性技术,其推动了精密测量科学和先进测距技术的改革,在光学原子钟^[3]、精密光谱测量^[4]、三维检测^[5]等方面得到了不断的发展。尤其因为其特殊的时频特性,它在绝对距离测量^[6]和相位噪声探测^[7]领域有着重要的应用。2009 年, Coddington 等^[8]从激光雷达中得到启发,率先提出双光梳超外差测距原理。该方案选取 2 台重复频率差很小的飞秒光梳作为测距系统的探测端和发射端。在测量过程中,探测端光梳和发射端光梳重复频率锁定的精度和稳定性决定了异步采样的数据密度,进一步影响着测距的精度,因此保证优异的重复频率锁定效果是十分重要的。

实现激光器重复频率锁定的方法主要有如下几种:一是调节激光器谐振腔的几何腔长。一般在腔内加入压电陶瓷(piezoelectric ceramics, PZT),根据压电陶瓷的伸缩带动光纤长度的改变来形成锁定。二是通过控制光纤激光器的折射率。2015 年, Shen 等^[9]在非线性偏振旋转锁模激光器内放置一个电控偏振控制器,采用可控应力挤压的方式控制光纤折射率变化以实现重复频率锁定,锁定后重复频率的标准差为 1.4 mHz,峰峰值抖动为 7.5 mHz。其采用的非保偏结构容易受到室温变化的影响,从而使锁模和锁定的稳

定性降低。2017 年,王少峰等^[10]基于可饱和吸收镜锁模原理搭建了掺铒光纤光梳,将光纤粘在 PZT 上,通过 PZT 的伸缩来带动光纤的移动从而实现重频锁定,锁定后重频的峰峰值抖动为 3 mHz。但其腔内采用的可饱和吸收体^[11](semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)可靠性较差,随着使用时间的增加,其内部会慢慢受到损伤。2018 年,杨松等^[12]在共振增强式非线性折射率调制技术上进行了改进,在激光器内加入能提供线性相移的非互易性元件,优化了腔内锁模泵浦功率,控制了光纤非线性折射率的泵浦功率。锁定后其重复频率最大抖动范围小于 0.4 mHz,标准偏差为 0.1 mHz。2021 年,魏明明等^[13]采用反馈调节电光调制晶体及压电陶瓷共同驱动的方法,完成了对掺铒光纤飞秒光梳的重频锁定,实现了 37 h 的重频锁定。锁定后峰峰值抖动仅为 0.8 mHz,其锁定精度较高,但腔内空间光路较多,不利于集成应用。

本文基于全保偏掺铒光纤激光器、锁相环系统^[14]和太赫兹测距光路搭建了太赫兹双光梳测距系统。其中,2 个掺铒光纤激光器采用非线性放大环形镜(nonlinear amplifying loop mirror, NALM)进行锁模,重复频率均为 79.261 MHz,平均功率分别为 25 mW 和 22 mW,脉冲宽度分别为 98 fs 和 94 fs。采用 PZT 实现了 600 Hz 的重复频率锁定范围,重复频率波动的峰峰值为 ± 1.5 mHz,标准差为 0.4 mHz。基于异步采样飞秒激光器搭建了太赫兹双光梳测距光路,在重复频率差固定为 10 Hz 时,基于飞行时间测量法得到了物体实际移动距离和测量移动距离的误差仅为 3 μm 。

1 实验装置

搭建的太赫兹双光梳测距系统如图 1 所示,包括掺铒光纤激光器^[15]、锁相环控制系统和太

赫兹双光梳测距光路 3 个部分。掺铒光纤激光器如图 1(a)和 1(b)所示。在 Laser1 的光路中, LD1 和 LD2 为中心波长是 974 nm 的光电二极管 (laser diodes, LD), 最大输出功率为 480 mW; WDM1 和 WDM2 为 980/1550 nm 波分复用器 (wavelength division multiplexing, WDM); EDF1 和 EDF2 为长度分别是 0.9 m 和 3.0 m 的单模保偏掺铒光纤; PS 为非互易性相移器 (phaser shifter, PS); COL-1 和 COL-2 为焦距是 10 cm 的光纤准直器 (collimator, COL); HWP 为 1550 nm 的半波片 (half wave plate, HWP), 用于准确调节腔内脉冲的偏振态; SM1 和 SM2 为步进电机; PZT1 和 PZT2 为压电陶瓷; Coupler1 和 Coupler2 为光纤耦合器, 分光比分别为 4 : 6 和 3 : 7; FM 为保偏全反射镜; ISO1 和 ISO2 为 1550 nm 的光纤隔离器; PD1, PD2 和 PD3 均为光电探测器, 用于将光信号转换为电信号。如图 1(b)所示, Laser2 与 Laser1 的光路结构完全相同。重复频率锁定系统主要由锁相环构成, 如图 1(c)所示: Rb 为铷原子钟, 可以输出频率为 10 MHz,

1 s 稳定性为 2×10^{-11} 的正弦模拟信号; Splitter 为功分器; DDS1 和 DDS2 为任意数字信号发生器 (direct digital synthesis, DDS); LPF1 和 LPF2 为低通滤波器 (low-pass filter, LPF); BPF1 至 BPF4 为带通滤波器 (band-pass filter, BPF), 其中中心频率为 80 MHz, -1 dB 带宽为 20 MHz, 低通滤波器截止频率为 30 kHz; Mixer1 和 Mixer2 为混频器; Amp1 和 Amp2 为信号放大器 (amplifier, AMP); HIV1 和 HIV2 为驱动 PZT 的高压放大器。FPGA1 和 FPGA2 是现场可编程门阵列, 用于实现激光器和锁相环的自动工作。太赫兹双光梳测距光路如图 1(d)所示: Lens 为聚焦透镜; PPLN 是周期极化铌酸锂晶体 (periodically poled lithium niobate, PPLN); PCA1, PCA2 分别为太赫兹天线的发射端和探测端, 太赫兹天线的输入功率须低于 30 mW; GM1, GM2 和 GM3 为全反射镜; BS 为分束镜; AMP 为信号放大器; A/D 为数据采集卡; PC 为电脑; Output1~4 为激光输出端口。

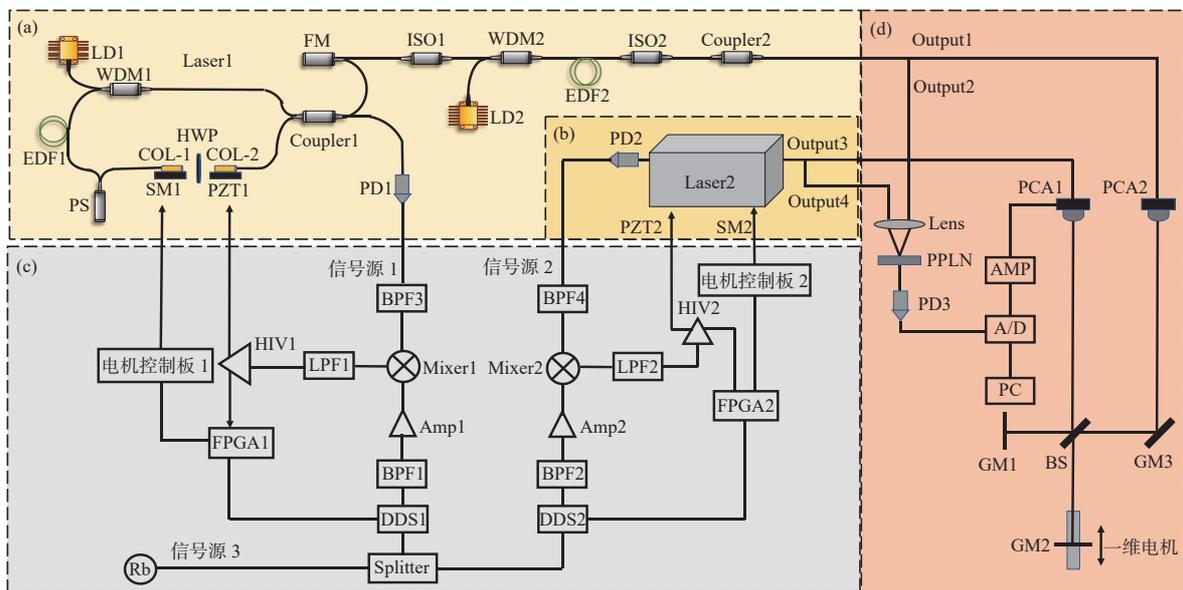


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2 实验方法与结果

全保偏掺铒光纤激光器的谐振腔采用的是 NALM 锁模^[16], 能形成稳定的锁模脉冲输出。当 LD1 输出功率为 380 mW 时, 谐振腔内可实

现锁模脉冲自启动, 脉冲序列表现为多脉冲; 将泵浦光功率降至 115 mW 时, 脉冲序列表现为单脉冲。从 FM 的输出端口测得平均功率为 1.4 mW。腔内输出的种子光经过光纤隔离器进入放大器。当 LD2 的输出功率为 350 mW 时,

放大器的输出功率为 35 mW, 并由光纤耦合器(Coupler2)分成两路脉冲输出, 平均功率分别为 25 mW(Output1)和 10 mW(Output2)。Laser2 的输出端口为 Output3 和 Output4, 平均功率分别为 22 mW 和 9 mW。Output1 和 Output3 的 24 h 输出功率稳定性如图 2(d)所示, 平均功率抖动率仅为 0.2%。全保偏掺铒光纤激光器输出的光谱及自相关曲线如图 2 所示。图 2(a)为

激光器 Laser1 的光谱及自相关曲线, 其中心波长为 1 565 nm, 光谱谱宽为 42 nm, 输出脉冲经过 1 550 nm 的保偏单模光纤压缩后, 脉冲宽度为 98 fs。图 2(b)为 Laser2 的光谱及自相关曲线, 其中心波长为 1 562 nm, 光谱谱宽为 45 nm, 使用 1 550 nm 保偏单模光纤压缩后, 可得到脉冲宽度为 94 fs 的脉冲输出。激光器样机实物图见图 2(c)。

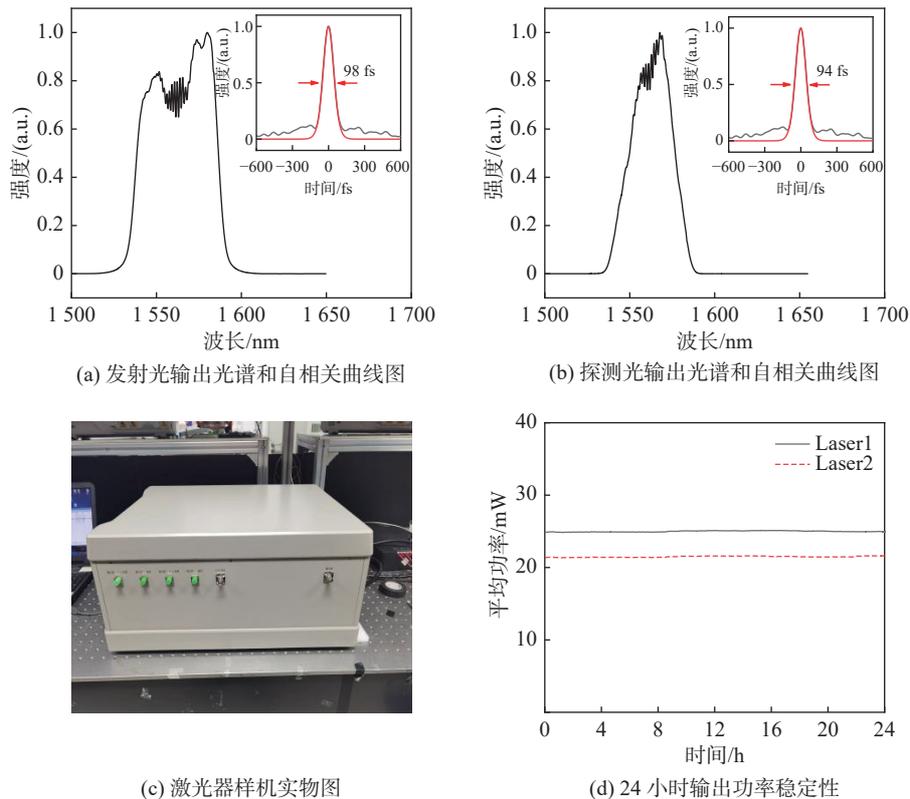


图 2 激光器输出光谱脉宽功率参数及实物图

Fig. 2 Power parameters of laser output spectral pulse width and the prototype images

PZT 驱动电压范围为 0~150 V, 最大行程量为 20 μm , 计算可知重复频率最大调节范围约为 1.12 kHz。由于谐振腔内的光纤暴露在环境中, 环境温度的变化势必导致光纤折射率的变化。实验发现, 环境温度每上升 1 $^{\circ}\text{C}$, 光纤折射率提高 0.000015, 重复频率下降 800 Hz。假设温度上升 2 $^{\circ}\text{C}$, 重复频率则下降约 1.6 kHz, 因此仅依靠 PZT 无法实现对重复频率的长时间锁定。所以需要在谐振腔内加入步进电机 (stepper motor, SM), 通过 SM 的移动来补偿 PZT 伸缩量的不足。该 SM 的最大行程量为 25 mm, 最小步进量为 30 nm, 在 80 MHz 重复频率附近时,

对应重复频率变化量约为 1.54 MHz, 最小重复频率步进为 1.8 Hz。该步进电机对重复频率的调节量足以补偿普通室外早晚的温度变化。

重复频率的锁定系统主要由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器 3 部分构成。搭建的锁相环系统见图 1(c)。光纤耦合器(Coupler)输出端口的光学脉冲重复频率信号通过光电探测器(PD1, PD2)转换为电学模拟信号。光电探测器输出的电学信号进入带通滤波((BPF3、BPF4), 信号由方波输入转换为正弦波输出。铷原子钟提供的正弦信号通过比较器转换为数字信号, 为 DDS1 和 DDS2 提供参考信号。通过 FPGA1 和

PFGA2 分别对 DDS1 和 DDS2 进行控制, 输出频率为 76.261 MHz 的正弦模拟信号。经 BPF1 和 BPF2 滤波后将信号输入放大器 (AMP1、AMP2) 中, 再利用混频器 (Mixer1、Mixer2) 将脉冲重复频率信号和铷原子钟产生的正弦信号进行混频, 得到误差信号。使用无源低通滤波器 (LPF1、LPF2) 将误差信号里的高频信号滤除。误差信号输入高压放大器 (HIV1、HIV2) 获得 20 dB 的信号增益, 经过高压放大器形成两路输出。一路用于驱动谐振腔内压电陶瓷 (PZT1、PZT2); 另一路连接到 FPGA 作为 PZT 工作状态的监测。电机控制电路板, 通过接收 FPGA 发出的控制信号来驱动 SM。

实验中, PZT 是控制重复频率锁定的重要器件, 它的性能影响着整个锁重频系统的响应特性和锁定效果。通过优化锁相环电路, PZT 的锁定范围设定在 600 Hz。将锁模振荡器的光纤盘绕于封闭的铝制金属盒体内, 盒底放置温控模块 (thermoelectric cooling, TEC) 来控制谐振腔温度。4 min 的内谐振腔重复频率随腔内温度变化曲线如图 3 所示, 可看出前 2 min 温度波动较大时, 重复频率随之显著波动。当温度稳定在 26.5 °C, TEC 将腔内温度的波动控制在 0.3 °C 以内时, 外界温度变化对重频漂移造成的影响显著降低, 重复频率锁定效果得到提高。

将双光梳的重复频率分别设定在 79.261 000 MHz 和 79.261 001 MHz, 均进行了 36 h 的频率锁定测试, 重频锁定峰峰值为 ± 1.5 mHz, 标准差为 0.4 mHz, 如图 4(a) 所示。当双光梳系

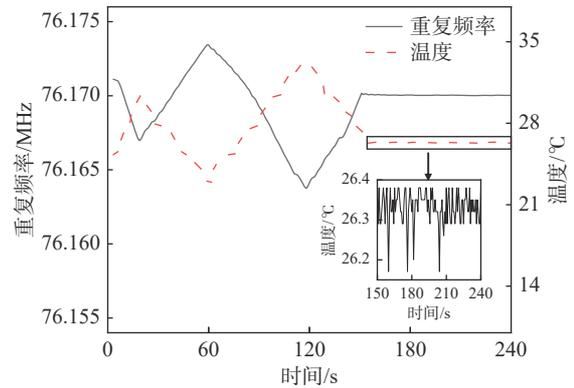


图 3 谐振腔重复频率随温度变化图

Fig. 3 Diagram of cavity repetition frequency with temperature

统刚开机时, 频率有偶尔跳动的现象, 跳动范围为 ± 4 mHz, 如图 4(a) 中画圈部分所示。原因在于系统开机时, 半导体泵浦源、驱动电路开始产生一定的热量, 热量传导至腔内, 导致腔内温度上升, 重频漂移量超过 PZT 的补偿范围, 此时 SM 移动补偿重频漂移。当系统运行 2 h 后达到热平衡, 谐振腔内温度保持稳定, SM 的静默时间超过 6 h, 此期间重复频率锁定精度较好。图 4(b) 所示为截取图 4(a) 黑色虚线框内 10 min 的重复频率差的变化, 最大抖动为 3 mHz, 标准差为 0.6 mHz。

进一步采用飞行时间法开展了太赫兹脉冲测距技术研究^[17]。用 2 台重复频率锁定的掺铒光纤激光器作为光源, 其中 Laser1 作为发射光, 重频为 f_{r1} ; Laser2 作为探测光, 重频为 f_{r2} 。 $f_{r2} = f_{r1} + \Delta f_r$, Δf_r 为 2 台掺铒光纤激光器的重复频率差值。图 1(d) 为太赫兹双光梳测距光路, 把

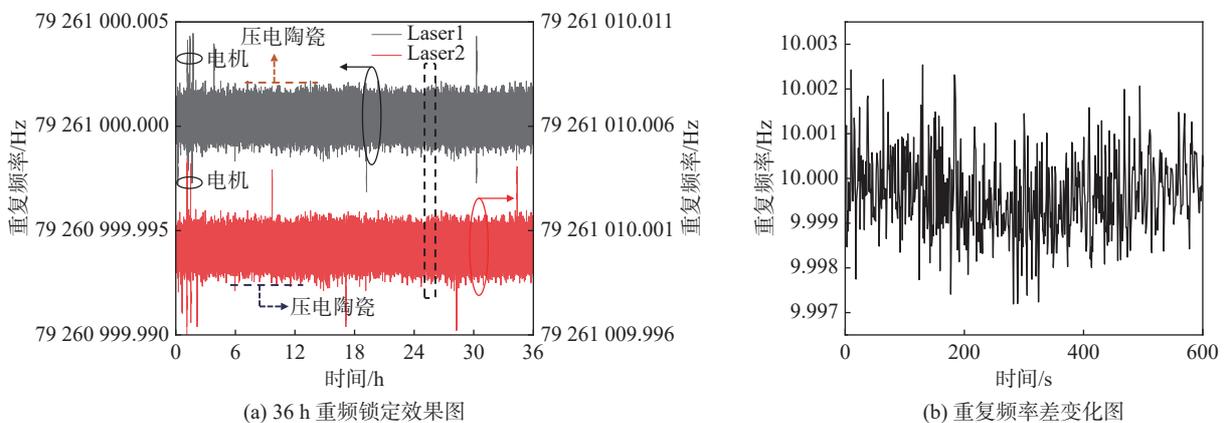


图 4 重复频率锁定效果图

Fig. 4 Repetition rate locking effect

Laser2 的输出光接入太赫兹天线 (PCA1) 产生太赫兹信号。该信号经过太赫兹分束镜 (BS) 后分为参考信号和目标测量信号。它们在经过参考反射镜 (GM1) 和放在步进电机上的测量反射镜 (GM2) 反射后形成 2 束具有一定时间延迟的脉冲信号。延迟时间由参考臂和测量臂的臂长差来决定。脉冲信号在太赫兹分束镜 (BS) 处相遇产生干涉, 最后聚焦输入太赫兹探测天线 (PCA2)。太赫兹信号再经跨阻放大器 (AMP) 放大后输入数据采集卡 (A/D)。聚焦透镜 Lens 则将 Output2 和 Output4 的脉冲光会聚到 PPLN 上, 通过非共线和频的方式产生触发信号, 接着经过 PD3 转换成射频信号, 最后输入到 A/D 作为数据采集卡的时钟信号。在测量过程中, 每隔 $1/\Delta f_r$ 的测量周期内分别得到 1 个参考干涉信号 (I_r) 和 1 个测量干涉信号 (I_m), 被测距离 D 可表示为

$$D = \frac{c}{2n_g} \cdot \Delta t \cdot \frac{\Delta f_r}{f_{r1}} \quad (1)$$

式中: c 为光脉冲群速度; n_g 为空气群折射率; Δt 为参考信号和目标测量信号之间的时间延迟。在双光梳重复频率差 Δf 为 10 Hz 时, 反射镜 (GM2) 放置在电机上移动。移动 1 次可产生 2 个太赫兹信号, 根据数据采集卡收集到的数据得到 2 个太赫兹信号的时间间隔 Δt 为 3.7 ps, 测量移动距离 D 为 0.597 mm, 与实际移动距离 (0.6 mm) 的误差为 $-3 \mu\text{m}$, 测距结果如图 5 所示, 该系统适用于太赫兹器件面型检测的应用^[18]。

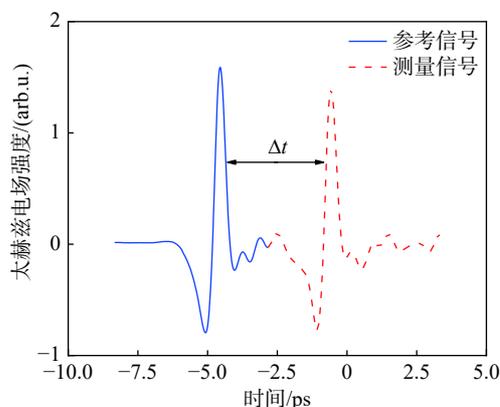


图 5 测距结果图

Fig. 5 Ranging result

3 结 论

综上所述, 基于重复频率锁定技术和掺铒光纤激光器搭建了异步采样双光梳系统。通过优化锁相环系统, PZT 的锁定范围达到 600 Hz, 重复频率峰峰值抖动为 $\pm 1.5 \text{ mHz}$, 抖动标准差为 0.4 mHz 。通过进一步控制锁模脉冲振荡器的环境温度, 显著减少 SM 的补偿次数, 在 36 h 的测量时间内系统稳定运行。将该异步采样双光梳系统应用到太赫兹双光梳测距中, 测量误差仅为 $3 \mu\text{m}$ 。本文搭建的异步采样双光梳系统外壳尺寸为 $65 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$, 整体重量为 20 kg, 满足室外应用需求, 具有稳定性高和抗干扰性强的优势。

参考文献:

- [1] 吴冠豪, 周思宇, 杨越棠, 等. 双光梳测距及其应用 [J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504002.
- [2] 马骏超, 孟丽丽, 张瑞雪, 等. 光学频率梳的相干合成研究进展 [J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1056 – 1068.
- [3] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637 – 701.
- [4] 高宇炜, 方守龙, 武腾飞, 等. 双飞秒激光频率梳光谱测量技术研究进展 [J]. 应用光学, 2021, 42(1): 157 – 175.
- [5] WANG C, DENG Z J, GU C L, et al. Line-scan spectrum-encoded imaging by dual-comb interferometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1606 – 1609.
- [6] 王国超, 李星辉, 颜树华, 等. 基于飞秒光梳多路同步锁相的多波长干涉实时绝对测距及其非模糊度量程分析 [J]. 物理学报, 2021, 70(4): 040601.
- [7] 龚梓博, 陆星, 施可彬, 等. 光学频率梳非线性传输及其在相位噪声探测中的应用 [J]. 中国光学, 2015, 8(1): 39 – 44.
- [8] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351 – 356.
- [9] SHEN X L, HE B Q, ZHAO J, et al. Repetition rate stabilization of an erbium-doped all-fiber laser via opto-mechanical control of the intracavity group

- velocity[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031117.
- [10] 王少峰, 武腾飞, 曹士英, 等. 全保偏掺 Er 光纤激光器重复频率锁定技术的研究 [J]. *计测技术*, 2017, 37(6): 8 – 12,55.
- [11] 罗浆, 杨松, 郝强, 等. SESAM 锁模全保偏光纤激光器重复频率的精确锁定 [J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 62 – 67.
- [12] 杨松, 郝强, 曾和平. 非线性放大环形镜被动锁模光纤激光器重复频率精确锁定研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801007.
- [13] 魏明明, 郭文阁, 闫露露, 等. 掺铒光纤飞秒光梳频率锁定研究 [J]. *光电子·激光*, 2021, 32(3): 317 – 322.
- [14] 谢建东, 严利平, 陈本永, 等. 可调谐激光器激光波长宽范围自动偏频锁定 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 211 – 219.
- [15] 曹顺, 郝强, 曾和平. 掺铒单模光纤飞秒脉冲激光器和放大器 [J]. *光学仪器*, 2020, 42(6): 66 – 72.
- [16] CHEN F H, HAO Q, ZENG H P. Optimization of an NALM mode-locked all-PM Er: fiber laser system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2119 – 2122.
- [17] WU G H, ZHOU Q, SHEN L F, et al. Experimental optimization of the repetition rate difference in dual-comb ranging system[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(10): 106602.
- [18] 韩冰, 葛锦蔓, 任心仪, 等. 基于光频梳的太赫兹器件面形测量技术研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(17): 1704001.

(编辑: 李晓莉)