

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.08

基于电光采样的飞秒激光精密测距及应用

邱志锋, 孙世超, 李波瑶, 古楚芳, 孙敬华*

(东莞理工学院 电信工程与智能化学院 超快光物理与光信息研究所, 广东 东莞 523808)

摘要: 为探索高精度、高速度激光精密测量, 研究了基于电光采样定时检测技术的飞秒光频梳精密测距, 该光频梳测距系统结合了光纤 Sagnac 干涉环、动态相位偏置的电光调制器、非互易静态相位偏置单元以及光脉冲飞行时间探测, 具备高精度和高速度的优点。研究表明: 该系统在 26 ms 积分时间内可实现 45 nm 的单点测距不确定度, 通过结合二维扫描平移台, 实现了量块台阶高度和硬币表面形貌的精密测量; 并对 3 m 外受附近扬声器声波振动的漫反射金属薄膜进行了动态检测, 还原了所播放的音乐声信号。本研究展示了电光采样定时检测技术在高精度、高速度距离测量中的巨大潜力, 为促进精密测距领域的发展起到重要作用。

关键词: 激光测距; 台阶测量; 电光采样; 光学频率梳

中图分类号: TB9; O439; TH741

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 02-0080-08

Precision femtosecond laser ranging based on electro-optic sampling and its applications

QIU Zhifeng, SUN Shichao, LI Boyao, GU Chufang, SUN Jinghua*

(Institute of Ultrafast Optics and Photonics, School of Electrical Engineering and Intelligitization,

Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: In order to research high precision and high speed laser measurement technology, this study explores precision ranging using a femtosecond optical frequency comb based on electro-optic sampling timing detection technology. The optical frequency comb ranging system integrates a fiber Sagnac interferometer, electro-optic modulators with dynamic phase bias, non-reciprocal static phase biasing units, and optical pulse time-of-flight detection, offering advantages of high precision and speed. The system achieves a 45 nm single-point ranging uncertainty within a 26 ms integration time. Coupled with a two-dimensional scanning translation stage, it enables precise measurements of step heights on gauge blocks and surface morphology of coins. Additionally, it dynamically detects the diffuse reflections from a metallic film 3 m away influenced by nearby speaker sound waves, faithfully reproducing the played music signals. This study demonstrates the great potential of electro-optic sampling timing detection technology in high precision and high speed distance measurement, playing a significant role in advancing the field of precision ranging.

Key words: laser ranging; step measurement; electro-optic sampling; optical frequency comb

收稿日期: 2024-12-28; 修回日期: 2025-02-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4601103); 广东省量子科学战略专项资助项目(GDZX230-2002)

引用格式: 邱志锋, 孙世超, 李波瑶, 等. 基于电光采样的飞秒激光精密测距及应用[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 80-87.

Citation: QIU Z F, SUN S C, LI B Y, et al. Precision femtosecond laser ranging based on electro-optic sampling and its applications[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 80-87.



0 引言

精密测量技术在现代科学与工程中,尤其是在微纳尺度的芯片检测与分析中至关重要。随着技术的不断进步,微纳芯片的设计与制造精度要求越来越高,传统测量方法已难以满足快速、精确的检测需求。因此,研制高精度、高速度的测量系统已成为当前亟待突破的技术挑战。光学方法因其具备高测速、高精度、非接触式测量等独特优势,已广泛应用于各类精密测量领域^[1]。

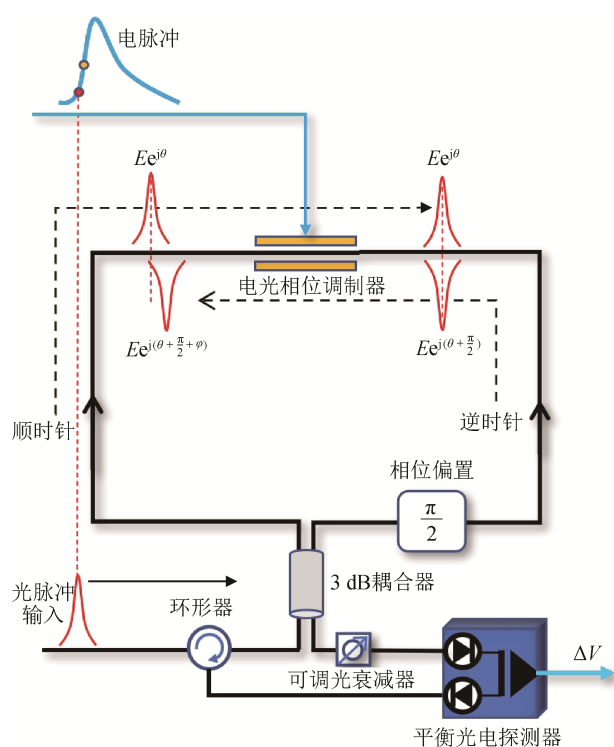
光频梳是一种具有均匀频率间隔的激光光源,能够连接微波和光波系统,具有出色的相干性。在时域中,光频梳表现为等周期排列的超短脉冲序列;在频域中,光频梳表现为等频率间隔的超宽带梳状频谱^[2-4],在光纤通信系统和微波光子学中,光频梳能够实现波分复用系统,通过多载波技术提高系统的传输容量^[5-6];此外,根据傅里叶变换原理,光频梳还可以通过调控各频率分量的幅度和相位来生成任意波形^[7-10];在微波光子滤波器中,光频梳同样具备可重构性和宽带较宽的优势^[11-14]。综上,光频梳技术作为微波光子学的核心组成部分,具有极大的应用潜力和广阔的发展前景。

光学-微波鉴相器(Optical-Microwave Phase Detector, OMPD)是微波光子学应用中的一种常见器件,通常用于生成超低噪声微波信号^[15-16]。2012年,韩国高等科学技术研究院的JUNG K等人首次提出了基于光纤环路的光学-微波相位检测器(Fiber-Loop Optical-Microwave Phase Detector, FLOM-PD),该器件能够检测亚飞秒分辨力的光脉冲序列和微波信号之间的相位误差^[17]。2020年,该团队首次提出了基于电光采样的定时检测器(Electro-Optic-Sampling-Based Timing Detector, EOS-TD),用于定时检测和光脉冲飞行时间探测^[18]。

本研究基于电光采样定时检测技术,探索其在高精度距离测量、表面形貌检测和动态检测中的应用,并展示了该技术在高速、高精度测量中的优势,以及在动态检测中(特别是音频识别应用方面)的潜力。

1 电光采样定时检测器基本原理

EOS-TD的原理如图1所示,其核心结构为保偏光纤 Sagnac 环,环内包括电光相位调制器和非互易性 $\pi/2$ 相位偏置单元。飞秒锁模激光器输出的光脉冲依次通过环形器和 3 dB 耦合器,进入光纤 Sagnac 环^[19]。



注: E 为光的振幅, e 为自然对数的底数, j 为虚数单位, θ 为光波的相位, φ 为相位差。

图1 基于电光采样的定时检测器原理图

Fig.1 Schematic diagram of the EOS-TD

在 Sagnac 环内,光脉冲受到与重复频率同步的周期性电波形驱动的电光调制器(EOM)和非互易性 $\pi/2$ 相位偏置单元的作用,从而实现单向相位偏置。尽管光脉冲在同一个 Sagnac 环内传播,但顺时针方向和逆时针方向的光脉冲经历的光程不同,导致其相位产生差异,这种相位差体现在环外的光强输出不平衡上,通过平衡光电探测器(Balanced Photodetector, BPD)可以检测到这种光强差异。随着光脉冲飞行时间的变化,光脉冲与电脉冲的相对位置发生改变,从而实现光脉冲对电脉冲的采样;最终, BPD 输出的电压与光脉冲和电脉冲之间的相位差形成一一对应的关系。

EOM调制信号的电脉冲序列是由高速光电探测器通过直接光学检测锁模激光器的光脉冲序列生成的,这些电脉冲通过光频梳的宽带光谱实现下变频,转化为具有微波频率梳特性的电信号。电脉冲频率模式的间隔与激光的重复频率一致,覆盖范围从直流延伸至高速光电二极管的带宽。在时域中,每个重复周期对应输出1个电脉冲,形成稳定的电脉冲序列。研究表明:光电探测器生成的电脉冲上升沿与光脉冲之间的残余抖动极低,特别是上升沿中点的抖动,可以达到几十阿秒^[20]。

非互易性 $\pi/2$ 固定相位偏置单元的原理结构如图2所示。该单元由2个法拉第旋光镜(Faraday Rotator, FR)、2个光纤准直器、1块二分之一波片和1块四分之一波片组成。2个FR的旋转角度分别为 -45° 和 $+45^\circ$ 。

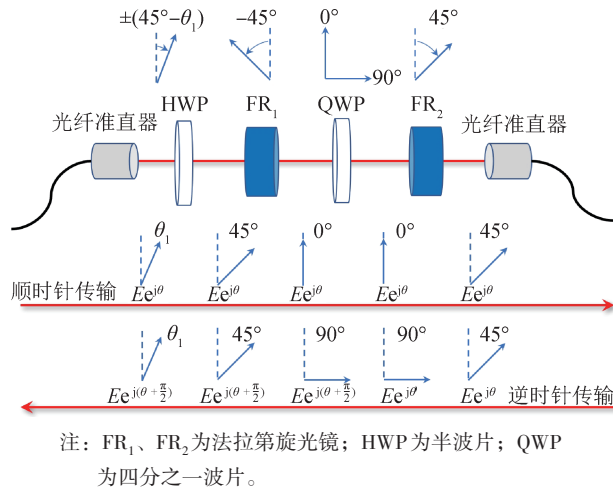


图2 非互易性 $\pi/2$ 固定相位偏置单元的原理图

Fig.2 Schematic diagram of the non-reciprocal $\pi/2$ fixed phase bias unit

对于顺时针传输的光,从左侧光纤准直器出射的线偏振光经过二分之一波片后,偏振方向调整为与右侧光纤准直器出射逆时针传播光相同的光矢量方向;此光束在通过FR₁后,其光矢量方向旋转了 -45° ,与四分之一波片的快轴方向对齐;接着,光束经过FR₂,光矢量方向旋转了 $+45^\circ$,此时恢复到与经过二分之一波片后的偏振方向一致,最终通过右侧光纤准直器耦合进光纤。

对于逆时针传输的光,从右侧光纤准直器出射的线偏振光经过FR₂后,其光矢量方向与四分之一波片的慢轴方向对齐。接着,光束通过FR₁后,

其光矢量方向调整为与二分之一波片和出射光一致,最后通过左侧光纤准直器耦合进光纤。

根据波片的原理,沿快轴传播的光相对于沿慢轴传播的光具有更短的光程,表现为相位超前。在此使用四分之一波片,使得顺时针传输的光在相位上比逆时针传输的光超前 $\pi/2$,最终实现非互易 $\pi/2$ 静态相位偏置。

若不考虑环路损耗引起的光强度变化,从光纤耦合器输出的2路干涉光的光功率 P_1 、 P_2 可分别表示为

$$P_1 = P_{\text{avg}} \cos^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (1)$$

$$P_2 = P_{\text{avg}} \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (2)$$

式中: P_{avg} 为入射光的平均功率, $\Delta\Phi$ 为对向传输的光脉冲到达3 dB光纤耦合器时的相位差。为了将干涉信号的工作点移至线性区,以提高鉴相灵敏度、系统稳定性和抗噪能力,在系统中引入了图2中所示的非互易性 $\pi/2$ 固定相位偏置单元。加入这2个相位偏置单元后,平衡探测器的输出信号 U_{out} 可以近似表示为

$$U_{\text{out}} = GRP_{\text{avg}} \cos\left(\varphi_0 \sin \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

式中: G 为平衡探测器的跨阻增益, R 为平衡探测器的响应率, φ_0 为相位调制器的调制深度, ϕ 为光脉冲中心与电脉冲调制信号对应位置的相位差。当 φ_0 与 ϕ 均较小时,输出信号可进一步线性简化为

$$U_{\text{out}} = GRP_{\text{avg}} \varphi_0 \sin \phi \quad (4)$$

对应的鉴相灵敏度 K_d 为

$$K_d = \frac{U_{\text{out}}}{\phi} = GRP_{\text{avg}} \varphi_0 \quad (5)$$

2 测量系统

基于电光采样的光频梳测距系统如图3所示,该系统使用基于非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)锁模的掺铒光纤飞秒激光器作为光源,输出波长为1 556 nm,重复频率为155 MHz,最大输出功率可达100 mW。激光器输出的光信号经 1×2 的10:90保偏光纤耦合器分为参考臂和测量臂。

在参考臂中,光脉冲序列通过带宽为12 GHz的高速光电探测器(型号为Lightsensing, LSHIPD-

A12G)转换为光电流脉冲串,作为电调制信号作用于带宽为10 GHz的EOM(型号为exail, MPZ-LN-10),脉冲串的重复频率与光脉冲重复频率一致。通过调节光学延迟线,可精确控制参考臂与测量臂的相对位置,使光脉冲与电脉冲的上升沿对准,从而确保在EOS-TD的EOM中,飞秒光脉冲和电脉冲始终在同一时刻相遇。

在测量臂中,光脉冲通过环形器、光纤准直器和透镜聚焦至待测物体表面,物体表面的反射光沿原路返回测量系统。由于物体表面的台阶或振动,光脉冲的飞行时间会发生微小变化,这些变化由EOS-TD检测并转换为电压信号输出。该电压信号经过低通滤波器处理后,由数据采集卡采集后存储于计算机中,且在上位机界面实时显示飞行时间差。

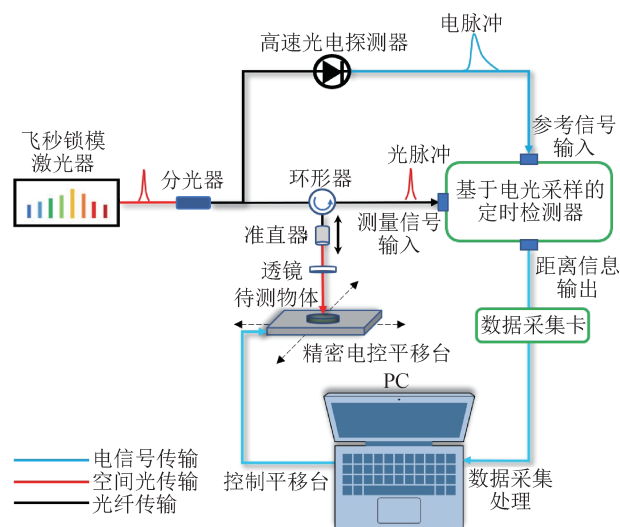


图3 基于电光采样的光频梳测距系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the optical frequency comb ranging system based on electro-optic sampling

3 测量应用

3.1 距离测量

测量系统采用脉冲飞行时间法,通过测量光脉冲在空间中飞行的时间来计算待测物体的距离。由于参考臂的调制信号为光电流脉冲,并且将其上升沿中点作为初始参考点,此时调制电压不为0 V,平衡光电探测器的输出电压也不为0 V。因此,需要在光纤Sagnac环外加入可调光衰减器,重新平衡进入BPD(型号为Thorlabs, PDB435C)的

2路光输入比例,确保光脉冲与电脉冲的上升沿中点相遇时,EOS-TD的输出电压为0 V。

在测量开始前,需要标定EOS-TD输出电压与距离之间的关系。为此,将光纤准直器安装在电控平移台(型号为OptoSigma, SGSP-13ACT-B0)上,其最大行程为13 mm,定位误差不超过0.01 mm,重复定位误差不超过0.003 mm。在EOS-TD前引入一个1×2的10:90光纤耦合器,其中,10%的光功率用于监测当前回收到的光功率,90%的光功率输入EOS-TD测量光脉冲飞行时间。以平面镜作为被测物体,通过控制电动平移台进行轴向扫描(扫描范围为6 mm,步长为10 μm,共测量600次),使用分辨率为1 nW、测量不确定度为±5%的光功率计(型号为Thorlabs, S144C、PM100D)记录光功率数据,使用分辨率为14位、200 MS/s采样率的数据采集卡(型号为GaGe, CSE1422)采集EOS-TD输出的电压值。其中,光功率数据的标准差为 1.1×10^{-6} W,轴向扫描的EOS-TD输出电压数据如图4(a)所示,当输出接近0 V时,曲线呈现良好的线性。以曲线上输出为0 V的横坐标位置为原点,向左右各延伸0.5 mm,构成一个总长为1 mm的测量区间,用于计算该线性区的斜率,最终得到该区间的鉴相灵敏度 K_d 约为567 mV/mm。

在实际测量物体表面不同位置时,由于物体表面反射率的差异,回收的光功率会发生变化。根据公式(5)可知:当输入到EOS-TD的光功率发生变化时,鉴相灵敏度也会相应变化。因此,在进行测量之前,需要对鉴相灵敏度进行校准。鉴相灵敏度的校准方法为:以平面镜为待测物体,通过调节透镜与平面镜的相对位置,从而调整测量光路中回收的光功率;记录不同光功率下的鉴相斜率,并建立查找表,通过插值法进行校准。实验结果如图4(b)所示,输入光功率与鉴相灵敏度之间呈现高度线性关系($R^2 = 0.9997$)。

3.1.1 测量系统的轴向分辨力

为了评估系统的轴向分辨力,对平面镜进行了单点重复测量,并通过艾伦偏差(Allen Deviation)对测量结果进行评估。如图5所示,在26 ms的积分时间内,最终测得系统的轴向分辨力为45 nm。积分时间大于10 ms之后,测量结果的艾伦偏差开始变大主要是由于温度变化、机械震动、

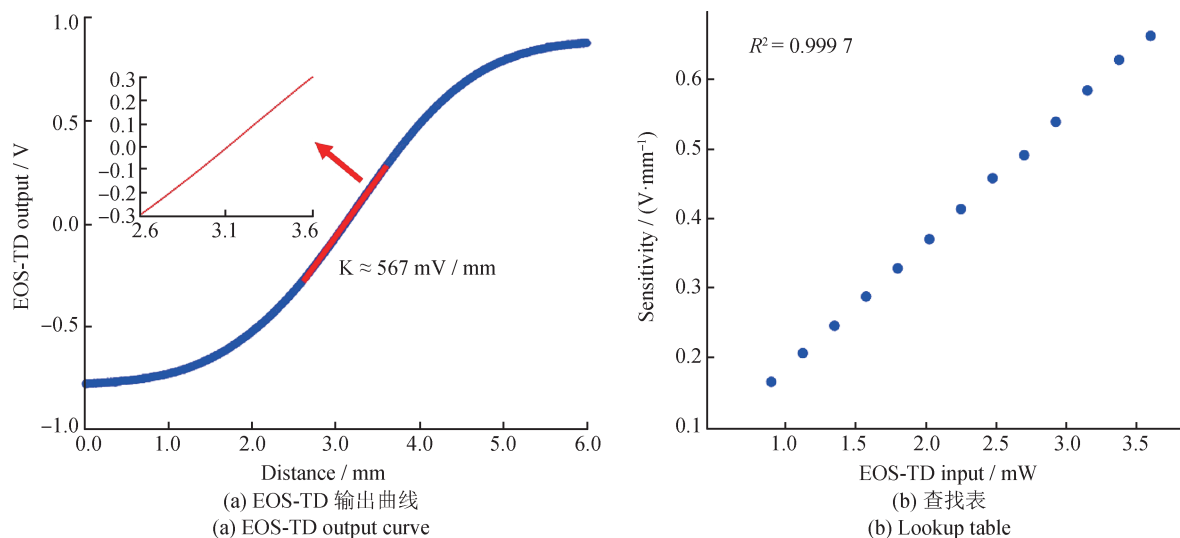


图4 EOS-TD的输出与鉴相灵敏度的校准

Fig.4 EOS-TD output and calibration of phase detection sensitivity

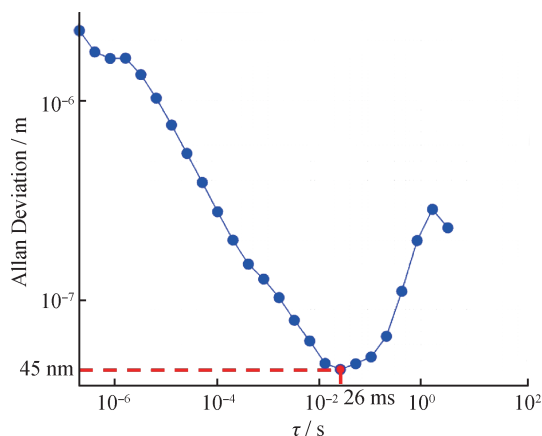


图5 轴向分辨率艾伦偏差

Fig.5 Axial resolution Allan deviation

电学系统参数(电流稳定性、增益系数等)漂移等因素,光脉冲和电脉冲之间的系统性定时抖动导致测量精度不再随着积分时间的增加而提升。

3.1.2 台阶高度测量

对由 1.5 mm 与 2.0 mm 量块组成的 500 μm 台阶进行一维扫描,并使用数显千分尺对 2 个量块的厚度进行了验证,测量结果如图 6 所示,分别为 (1.501 ± 0.001) mm 和 (2.001 ± 0.001) mm。

随后,将 2 个量块平放在一块精加工的金属垫片上,再将其放置在电控平移台上,沿着垂直于台阶的方向进行一维扫描,扫描结果如图 7 所示。该系统能够精确地测量出台阶为 500 μm,测量误差约为 4.3 μm。

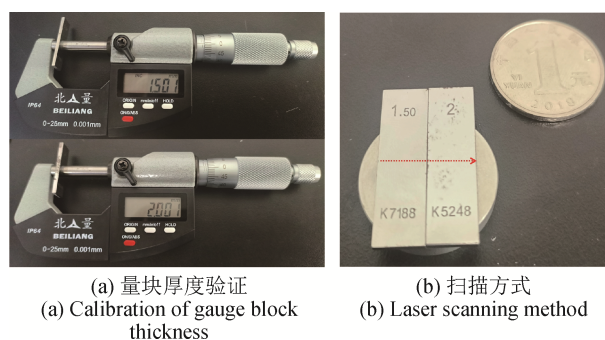


图6 量块厚度验证与激光扫描方式

Fig.6 Calibration of gauge block thickness and laser scanning method

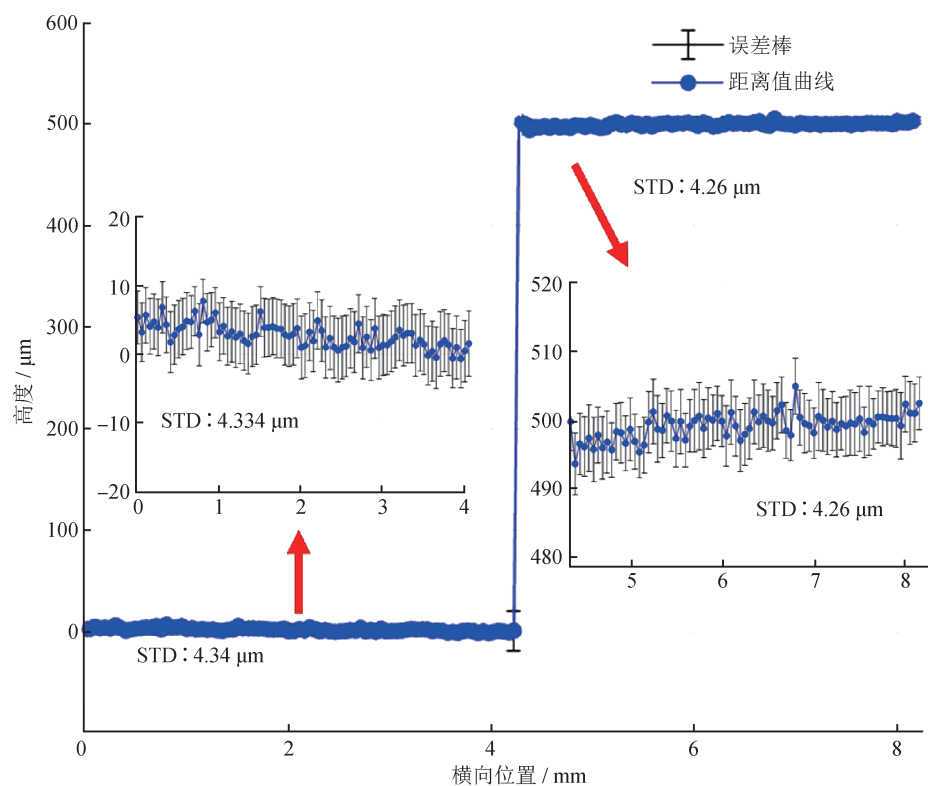
3.1.3 一元硬币表面形貌测量

如图 8 所示,该系统对一元硬币表面上的“元”字进行了精确的二维扫描,成功展现了“元”字图案的微小特征和表面细节,充分展示了其在微观尺度上的测量能力。

3.2 动态位移测量

将粘附有金属薄膜的铝合金工件置于距离测量光路约 3 m 的位置,并在金属薄膜约 15 cm 的距离放置扬声器播放歌曲。声波通过空气振动驱动金属薄膜产生同步振动,从而导致照射在薄膜表面的光程发生动态变化,这一过程等效实现了对金属薄膜动态位移的测量。

为了更好的获取金属薄膜动态位移信息,测量系统(如图 9 所示)使用了分辨力为 24 位,采样率为 102.4 kS / s 的数据采集卡(型号为 VKinging,



注：标准偏差(Standard Deviation, STD)

图 7 500 μm 台阶测量结果

Fig.7 500 μm step measurement results

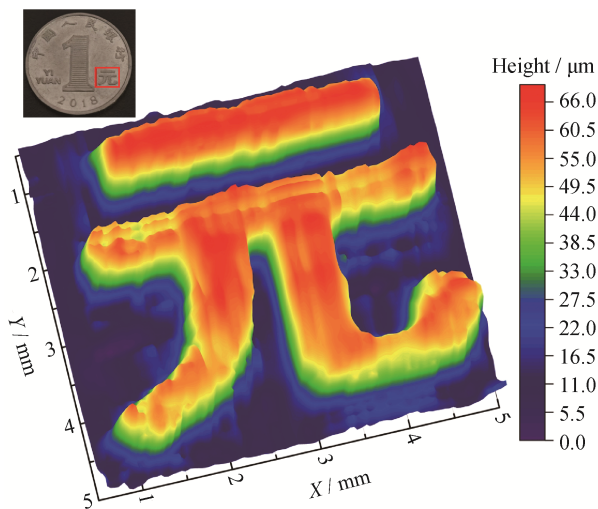


图 8 一元硬币“元”字表面形貌测量结果

Fig.8 Surface morphology measurement results of the character "Yuan" on a One-Yuan coin

VK701N- SD)。为了更清晰地复原歌曲中的人声部分，设置了1个300 ~ 1 500 Hz的二阶数字带通滤波器，测量系统对金属薄膜进行连续测量。同时，使用传统电子麦克风对扬声器播放的歌曲进行录音，录音得到的音频数据与光学测量数据进行对

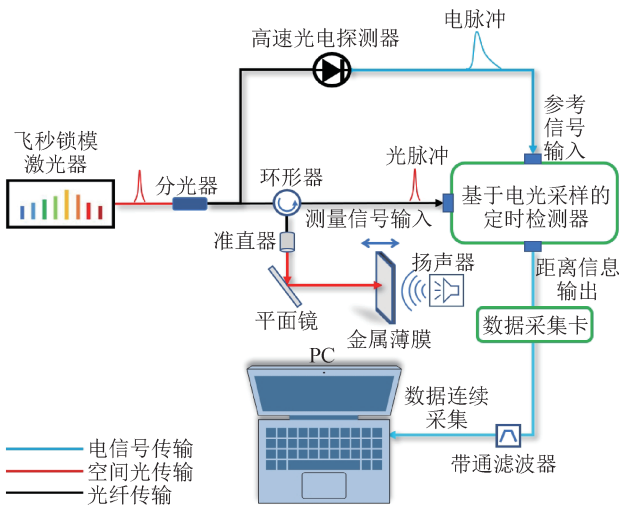


图 9 金属薄膜动态位移测量与声音还原

Fig.9 Dynamic displacement measurement of metal thin film and sound reconstruction

比，结果如图10、图11所示。在扬声器播放儿歌时，测量系统成功捕捉到金属薄膜的微小振动，并清晰还原了歌曲的音频信息。使用音乐软件的听歌识曲功能，对光学测量得到的音频数据文件进行识别，能清晰地播放并准确识别出所属歌曲，

这充分展示了该测量系统在动态位移测量及非线性声学分析中的性能。

图 11 中, 光学采样在大于 800 Hz 时的功率谱密度比麦克风采样要弱, 可能是由于与扬声器有一定距离的金属薄膜的响应带宽偏低。

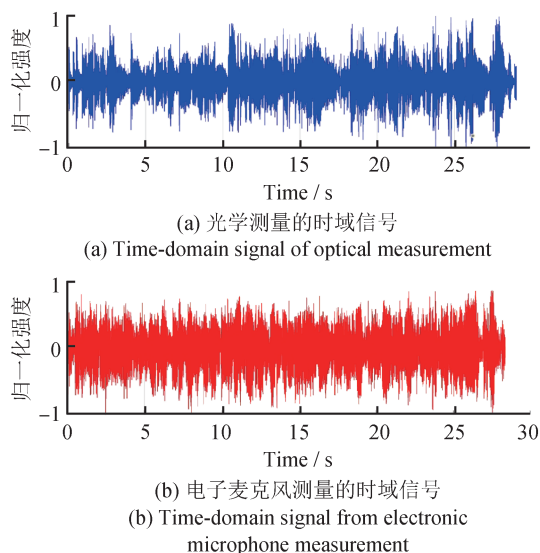


图 10 时域信号对比

Fig.10 Comparison of time-domain signals

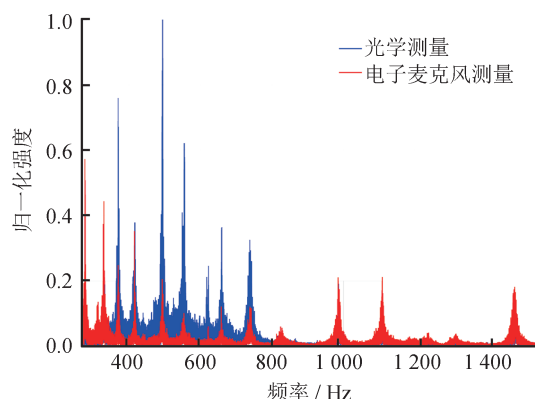


图 11 频率信号对比

Fig.11 Comparison of frequency-domain signals

4 结论

针对高精度、高速度、多场景适用的位移测量需求, 研究了一种基于电光采样的定时检测器 (EOS-TD) 与光学频率梳的测量系统。该系统结合光纤 Sagnac 干涉环、电光调制动态相位偏置、非互易静态相位偏置单元及光脉冲飞行时间技术, 实现了高精度与高测速。实验验证表明: 该系统在 26 ms 的积分时间内达到了 45 nm 的轴向分辨力。

通过对台阶高度测量、一元硬币表面形貌测量以及金属薄膜动态振动的分析, 验证了系统的高精度与可靠性。研究结果充分表明: 该系统在高精度位移测量及非线性动态机械分析中具有巨大潜力, 为科学研究与工程应用提供了有力支撑。

未来, 可通过选用更高线性度的光电探测器来产生更加稳定的电脉冲、减少激光器的强度噪声、缩短光纤光路、增加保护壳来避免环境干扰等手段来进一步提高系统的测量精度; 通过积极探索新兴领域的应用, 该系统有望在动态、实时、非接触精密测量等方向展现更广泛的实用价值。

参考文献

- [1] 吴冠豪, 施立恒, 李尔格. 基于光学频率梳的表面形貌测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 209-220.
WU G H, SHI L H, LI E G. Surface topography measurement technology based on optical frequency comb[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 209-220. (in Chinese).
- [2] DIDDAMS S A. The evolving optical frequency comb[J]. JOSA B, 2010, 27(11): 51-62.
- [3] COLE D C, PAPP S B, DIDDAMS S A. Downsampling of optical frequency combs [J]. JOSA B, 2018, 35 (7) : 1666-1673.
- [4] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum [J]. Science, 2020, 369 (6501). DOI: 10.1126/science.aay3676
- [5] LUNDBERG L, KARLSSON M, LORENCES - RIESGO A, et al. Frequency comb-based WDM transmission systems enabling joint signal processing [J]. Applied Sciences, 2018, 8 (5). DOI: <https://doi.org/10.3390/app8050718>.
- [6] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, TROCHA P, et al. Comb-based WDM transmission at 10 Tbit/s using a DC-driven quantum-dash mode-locked laser diode[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31110-31129.
- [7] JIANG Z, LEAIRD D E, HUANG C B, et al. Spectral line-by-line pulse shaping on an optical frequency comb generator [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(12): 1163-1174.
- [8] HUANG C B, JIANG Z, LEAIRD D E, et al. Spectral line-by-line shaping for optical and microwave arbitrary

- waveform generations [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(4): 227–248.
- [9] CARAQUITENA J, MARTÍ J. Dynamic spectral line-by-line pulse shaping by frequency comb shifting [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 2084–2086.
- [10] KIRCHNER M S, DIDDAMS S A. Grism-based pulse shaper for line-by-line control of more than 600 optical frequency comb lines [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3264–3266.
- [11] SUPRADEEPA V R, LONG C M, WU R, et al. Comb-based radiofrequency photonic filters with rapid tunability and high selectivity [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(3): 186–194.
- [12] ZHU X, CHEN F, PENG H, et al. Novel programmable microwave photonic filter with arbitrary filtering shape and linear phase [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9232–9243.
- [13] XU X, WU J, NGUYEN T G, et al. Advanced RF and microwave functions based on an integrated optical frequency comb source [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2569–2583.
- [14] XU X, TAN M, WU J, et al. Advanced adaptive photonic RF filters with 80 taps based on an integrated optical micro-comb source [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1288–1295.
- [15] XIE X, BOUCHAND R, NICOLODI D, et al. Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise [J]. *nature photonics*, 2017, 11(1): 44–47.
- [16] JUNG K, KIM J. Subfemtosecond synchronization of microwave oscillators with mode-locked Er-fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2958–2960.
- [17] JUNG K, KIM J. Long-term stable sub-femtosecond synchronization of microwave signals with mode-locked Er-fiber lasers [C]// 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. IEEE, 2012: 1–4.
- [18] NA Y, JEON C G, AHN C, et al. Ultrafast, sub-nanometre-precision and multifunctional time-of-flight detection [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 355–360.
- [19] 王凯, 林百科, 宋有建, 等. 基于光学-微波同步的低噪声微波产生方法 [J]. *物理学报*, 2022, 71(4): 107–114.
- WANG K, LIN B K, SONG Y J. et al. Low-noise microwave generation based on optical-microwave synchronization [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2020, 14(6): 355–360. (in Chinese).
- [20] HYUN M, AHN C, NA Y, et al. Attosecond electronic timing with rising edges of photocurrent pulses [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17460-6>.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 邱志锋(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光频率梳及精密三维测量与成像。



通信作者: 孙敬华(1974—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为超短超强激光脉冲的产生与放大、非线性光学频率变换、超快量子光学、飞秒激光频率梳及精密三维测量与成像、超短脉冲激光精密加工等。