

基于扫频采样的飞秒激光大尺寸测距方法研究

张天宇, 曲兴华, 张福民*, 彭博

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 作为一种高精度测量工具, 飞秒激光具有优于传统激光技术的特性, 已被广泛应用于工业生产、航空航天、科学研究等领域。扫频采样法在很大程度上改善了机械振动、扫描速度过慢等问题, 对飞秒激光的绝对测距性能提升有着重要的意义。基于扫频采样原理, 提出了一种利用飞秒激光的大尺寸距离测量方法, 并对该技术的测量原理、干涉光谱和解调算法等方面进行了研究。首先, 根据飞秒激光的锁模生成原理和压电陶瓷的压电效应, 介绍了飞秒激光器连续扫描重复频率的方法。在此基础上, 结合传统的光学采样法原理, 解释了扫频采样法的测距原理, 推导并讨论了光纤延迟线的长度对扫描距离的影响。然后, 搭建了基于扫频采样的飞秒激光测距系统, 在线性导轨上进行了远距离的测量实验, 同时设计了基于迈克尔逊干涉原理的 He-Ne 激光参考光路。根据实验环境修正了空气群折射率, 分析了测量距离对光谱条纹峰值和宽度的影响, 测量了不同目标位置处的激光扫描距离。在 50.4 m 的测量范围内, 扫描距离从 0.56 mm 增加到 1.12 mm, 充分验证了光纤延迟线对提升大尺寸测距能力的重要性。周期性的频率扫描可产生互相关条纹, 通过对测量光谱条纹进行希尔伯特变换处理, 解算出实时的频率变化量和采样倍乘系数, 从而获取被测的距离信息。此外, 为了减小系统的时间延迟误差, 提高测量的准确性, 采用差分原理对算法进行了改进。在希尔伯特算法基础上, 分别对频率和距离进行差分处理, 解算距离信息。实验结果表明, 经过对比, 采用基于距离差分的改进算法处理数据, 性能结果较好。算法改进后, 系统在 50 m 范围内的测量精度从 11 μm 提高到 4 μm , 相对精度从 2.2×10^{-9} 提高到 8×10^{-8} , 测距准确性明显提高。通过分析重复性测量数据, 并与增量式激光干涉仪结果比对, 测量误差的标准差从 10 μm 提高到 2 μm , 最大相对稳定性从 2×10^{-9} 提高到 4×10^{-8} , 测距稳定性明显提高。因此, 该方法有较为优秀的大尺寸测距能力, 具有同时实现高精度、大尺寸、快速绝对测距的潜力, 在未来的精密光谱测量领域有着很大的前景。

关键词 飞秒激光; 光学采样; 大尺寸测距; 干涉光谱

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2708-05

引言

作为七大基本物理量之一, 长度的测量一直是工业生产和科学研究的一个重要环节。近年来, 随着科学技术的迅猛发展, 诸多测量应用领域对距离测量的精度、量程和速度提出了更高的指标要求。传统的激光测量技术显然难以同时满足这些需求。飞秒光学频率梳的诞生则有效地解决了距离测量领域的难题。它不仅实现了光频标准与射频标准的精密连接^[1], 还将测量结果精密地溯源到了国际单位系统中“米”的定义^[2]。由于具有稳定性高、脉冲宽度窄、频谱范围广等优良特性, 飞秒激光对实现大尺寸、高精度的绝对距离测量有

着重要的意义。

2000年, 日本的 Minoshima 和 Matsumoto^[3]首次将光学频率梳应用于绝对距离测量领域, 提出了一种利用信号纵模拍频的测量方法。此后, 各国学者在该领域进行了大量的探索和研究。根据基本原理, 测距方法可以分为多波长干涉法^[4-5]、色散干涉法^[6-7]、双光梳干涉法^[8-9]和光学采样法^[10]等方法。其中, 光学采样法由于具有结构简单、测量精度高优点, 近年来得到了广泛的应用。但传统的光学采样法需借助线性位移台、光纤拉伸器等机械延迟线, 来实现脉冲延迟, 这将带来严重的机械抖动和较长的扫描时间。为解决上述问题, 德国的 Thomas 等^[11]提出了一种基于扫描激光器重复频率的光学采样法。不同于传统的光学采样法, 这种方法

收稿日期: 2018-07-10, 修订日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675380, 51775379)资助

作者简介: 张天宇, 1994年生, 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室硕士研究生

e-mail: zhangtianyu202134@tju.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

通过改变光学频率梳的重复频率,精密地控制系统中测量光路和参考光路的时间延迟。扫频光学采样法不仅消除了机械振动的影响,还具有响应速度快、稳定性高、装置成本低等优点。目前,这种改进的光学采样法已被应用于绝对距离测量领域^[12-13],以追求各方面性能的突破。

本文深入分析了扫频采样法的基本原理,并提出了一种基于该原理的大尺寸测距方法。飞秒光纤激光器被施加外部调制信号后,其重复频率随之周期性扫描,实现光学采样测距。该方法在参考臂中引入一段光纤延迟线,可以产生“倍增效应”,扩大扫描距离。搭建了基于光频梳的扫频采样测距系统,进行了绝对测距实验,并与增量式激光干涉仪进行了精度对比。利用差分原理改进了测量算法,实验结果表明,系统的测量性能显著提高。

1 扫频采样测距原理

飞秒激光在时域上表现为一系列周期性的脉冲序列,其信号的周期或重复频率由飞秒激光器的内腔长度决定。对于环形内腔结构的光纤激光器,脉冲信号的重复频率 f_{rep} 可以表示为

$$f_{\text{rep}} = \frac{1}{T} = \frac{c}{nL_{\text{cav}}} \quad (1)$$

其中 T 为脉冲信号的重复周期, c 为光在真空中的传播速度, n 为内腔介质的折射率, L_{cav} 为激光器的内腔长度。可以看出,对于固定结构的激光器,当内腔长度发生改变时,脉冲信号的重复频率会随之发生改变。在激光器的内部结构中接入压电陶瓷器件,其长度会受调制信号影响而发生改变。因此,可通过施加周期性的外部信号,控制飞秒激光的重复频率进行精密地扫描,以实现扫频采样。

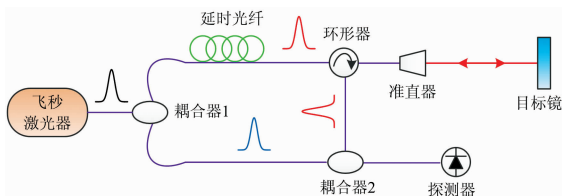


图 1 扫频采样法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency scanning and optical sampling

基于扫频采样方法的测距原理如图 1 所示。飞秒激光器发出的脉冲序列经光纤耦合器 1 分为两路：一路脉冲经过长光纤延迟线,通过环形器后射向空间目标镜,作为测量光路;另一路只经过耦合器尾纤,作为参考光路。两路脉冲在耦合器 2 处发生干涉,由探测器接收干涉信号。由于引入光纤延迟线,测量光路和参考光路长度相差较大,其光程差 L_i 可表示为

$$L_i = m_i \frac{c}{f_{\text{rep}i} n_g} \quad (2)$$

其中, $f_{\text{rep}i}$ 为测量过程中的实时重复频率, n_g 为脉冲的群折射率, m_i 为光程的倍增系数,即测量光路和参考光路中脉冲序列的数量之差。对式(2)两端求导,可得某一时刻的扫描

距离,表示为

$$\partial L_i = m_i \frac{c}{f_{\text{rep}i}^2 n_g} \partial f_{\text{rep}i} \quad (3)$$

其中 ∂L_i 和 $\partial f_{\text{rep}i}$ 分别为某一时刻距离和频率的扫描量。可以看出,光纤延迟线的引入,使得扫描距离扩大了 m_i 倍,即“倍增效应”。当被测距离增加时,整数 m_i 会变大,扫描距离随之扩大。理论上,当扫描距离大于脉冲间距 L_{rep} ,即 $\partial L_i > c/(f_{\text{rep}i} \cdot n_g)$ 时,非模糊范围可以覆盖整个测量范围。此时,本系统可实现无死区的绝对测距。

2 实验部分

2.1 装置

实验系统装置如图 2 所示。信号源(Tektronix AFG3022)产生周期性的调制信号,经压电控制器(THORLABS MDT694B)转为稳定的驱动电压,精密地控制飞秒激光器的重复频率变化。飞秒激光器(Onefive Origami-15)发出的光经过扫频采样光路,参考光中的一部分由计数器(Agilent 53230A)探测,记录实时的重复频率;参考光和测量光干涉后由示波器(LeCroyWaveRunner 610Zi)探测,记录当前的互相干条纹。利用 He-Ne 激光干涉仪(Agilent 5519B)搭建迈克尔逊光路,用于验证本文实验的结果。此外,系统中的空间测量光束和干涉仪的光束要保证严格平行。

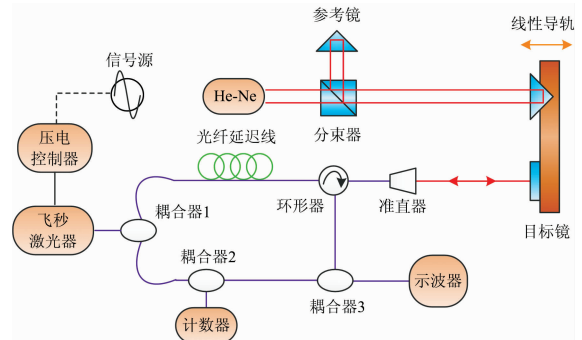


图 2 实验系统装置图

Fig. 2 Experimental setup of distance measurement

2.2 远距离测量实验

我们在长导轨上进行了远距离的测量实验。环境条件稳定,温度为 17.72 °C,气压为 996.05 hPa,湿度为 41.71%。基于修正的 Edlen 公式^[14]计算,环境中的空气群折射率为 1.000 283 03。飞秒激光器的中心波长为 1 560 nm,重复频率为 250 MHz。在 150 V 的驱动电压下,其重复频率扫描范围约为 2 kHz。光纤延迟线由一段单模光纤和一段色散光纤组成,总长度为 120 m。色散光纤的作用是补偿单模光纤的色散效应,减小其对脉冲干涉的影响,可通过自相关仪调整色散光纤长度来实现。

在测量过程中,首先需要确定一个测量基准点。记录当前的干涉条纹,解算出此时的整数 m_1 和重复频率 $f_{\text{rep}1}$,根据式(2),计算出两光路的光程差 L_1 。然后,移动目标镜到被测点。根据此时的解算参数 m_2 和 $f_{\text{rep}2}$,计算出当前的光

程差 L_2 。该段绝对距离 d 可以表示为

$$d = \frac{1}{2}(L_2 - L_1) \quad (4)$$

移动被测目标镜，每隔 4.2 m 的距离间隔，重复测量 10 次，不同目标位置处的干涉条纹如图 3 所示。可以看到，当被测目标向远处移动时，干涉条纹的幅值在不断降低，这是由于飞秒激光在空气中受到了瑞利散射和米氏散射的影响。同时，由于扫频范围不变，而扫描距离增加，所以条纹的宽度随着距离的增加而略微减小。此外，通过在小范围内移动

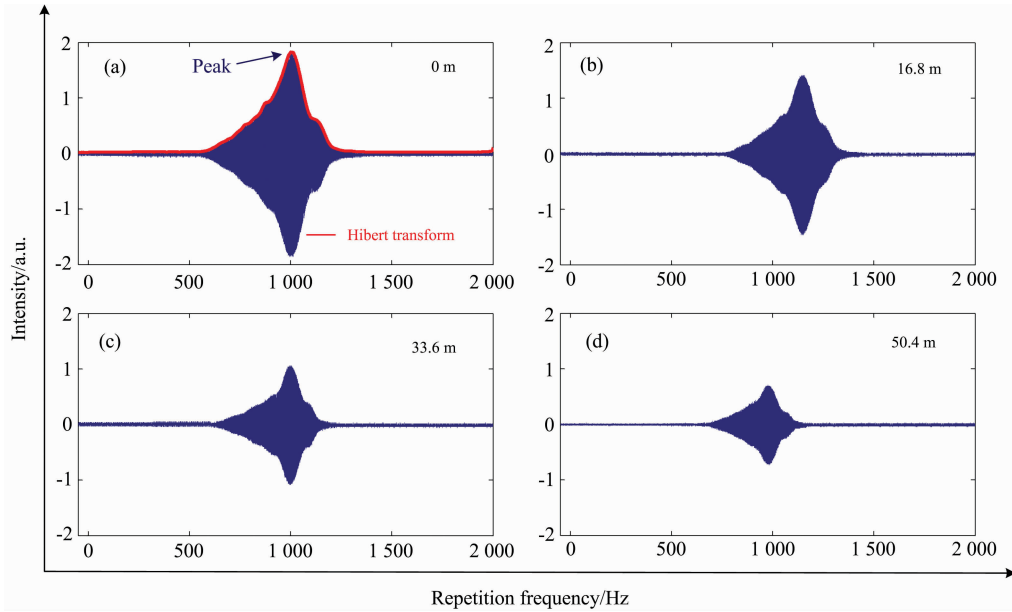


图 3 不同目标位置的干涉条纹

Fig. 3 Interference fringes at different target positions

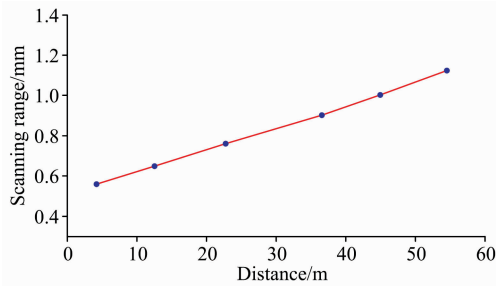


图 4 不同距离位置的扫描距离

Fig. 4 Scanning widths at different distances

3 测距算法的优化

由于被测信号经过多个光学和电学器件，干涉条纹与扫描频率存在时间延迟，影响测量精度。采用周期性三角波作为调制信号，基于差分原理，对算法进行优化，如图 5 所示。假设当前的真实频率为 f_{rep} ，两个条纹对应的频率分别为 $f_{\text{rep}} - \Delta f_1$ 和 $f_{\text{rep}} + \Delta f_2$ (Δf_1 和 Δf_2 为频率误差)。根据式 (2)，分别对频率和距离进行差分，2 种算法的最终距离可分别表示为

目标镜，测量了不同距离位置的实际扫描距离，如图 4 所示。可以看到，随着距离的不断增大，扫描距离从 0.56 mm 扩大到 1.12 mm。这不仅体现了该系统良好的大尺寸测距能力，还与前面的原理分析有较好的吻合。

实验中采用的算法是希尔伯特变换法。如图 3(a) 所示，对被测位置的干涉条纹进行希尔伯特变换，峰值对应的重复频率即为当前时刻的重复频率。然而实际系统中存在延迟效应，该算法不能准确地解算出实时的重复频率，需要对其进行优化。

$$d_1 = \frac{mc}{n_g \left(f_{\text{rep}} + \frac{\Delta f_2 - \Delta f_1}{2} \right)} \quad (5)$$

$$d_2 = \frac{mc}{n_g \left[f_{\text{rep}} + \frac{(\Delta f_2 - \Delta f_1)}{2} - \frac{(\Delta f_2 + \Delta f_1)^2}{4f_{\text{rep}} + 2(\Delta f_2 - \Delta f_1)} \right]} \quad (6)$$

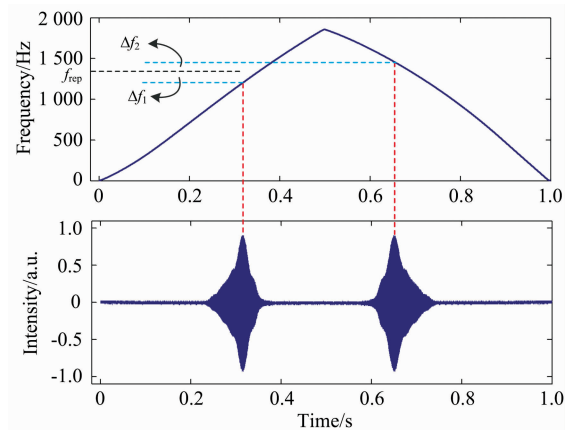


图 5 基于差分原理的优化算法

Fig. 5 Optimization algorithm based on the difference principle

从式(5)和式(6)可以看出, 频率误差不同时, 2 种算法最后得到的距离误差也不同。通过对比分析公式, 当系统参数不确定时, Δf_1 和 Δf_2 的数值关系难以确定, 2 种算法的优缺点无法评判。理论上, 2 种算法的选择需要根据实际的系统环境确定。在本系统中, 分别采用希尔伯特变换和两种改进的算法对长距离实验数据进行处理, 并与激光干涉仪进行比对, 实验结果如图 6 所示。对比图 6(a)—(c)可以看出, 经过差分原理优化, 测距精度得到提高。其中, 改进距离差

分后的实验结果比较好, 精度从 $11 \mu\text{m}$ 提高到 $4 \mu\text{m}$, 在 50 m 范围内相对精度从 2.2×10^{-9} 提高到 8×10^{-8} 。对比 3 种算法处理后的测量偏差, 相差很小, 所以单独提出标准差进行比对, 如图 6(d)所示。可以看出, 算法优化后的效果明显, 标准差从 $10 \mu\text{m}$ 提高到 $2 \mu\text{m}$, 最大相对稳定性从 2×10^{-9} 提高到 4×10^{-8} , 这表明大尺寸距离测量的稳定性显著提升。综上, 对比 3 种算法, 基于距离差分的算法效果比较好, 这对于本方法的性能提升有着重要意义。

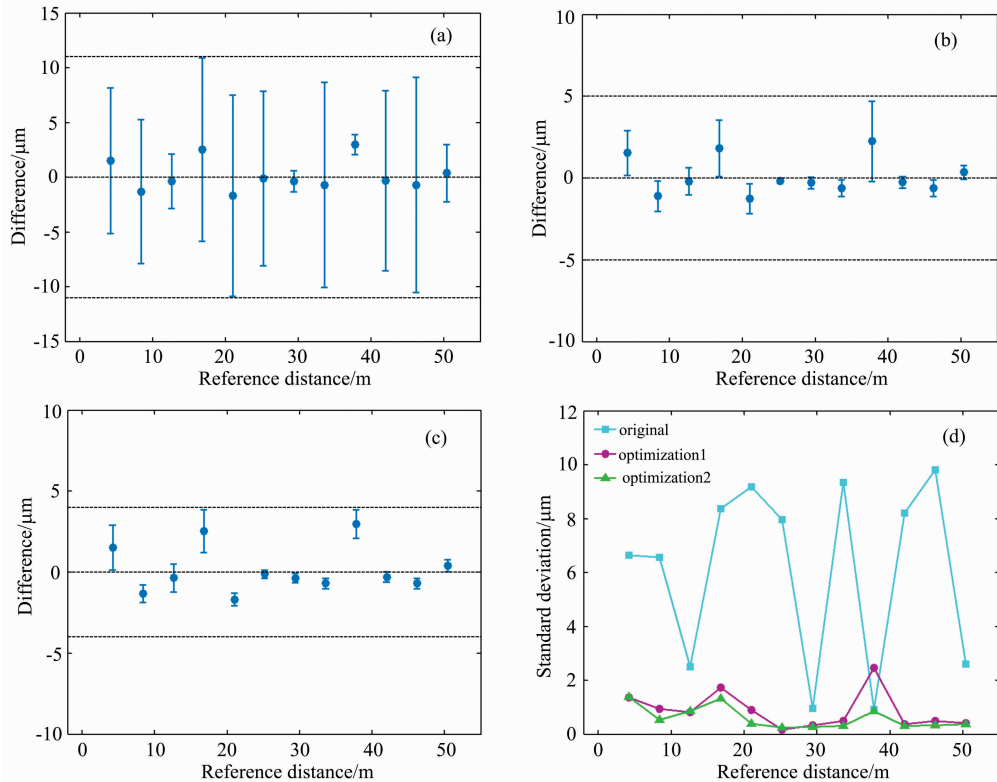


图 6 测量实验结果

(a): 原始算法的结果; (b): 频率差分后的结果; (c): 距离差分后的结果; (d): 三种算法的标准差比较

Fig. 6 Results of measurement experiment

(a): The result of the original algorithm; (b): The result of the frequency difference;

(c): The result of the distance difference; (d): Comparison of precision among three algorithms

4 结 论

在扫频采样原理的基础上, 进行了飞秒激光的大尺寸测距方法研究。通过周期性的扫描重复频率, 可以获得不同位

置的干涉条纹, 从而计算出当前的绝对距离。在长导轨上进行远距离测量实验, 采用差分原理改进后的算法, 与 He-Ne 干涉仪比对, 50 m 范围内偏差小于 $4 \mu\text{m}$, 相对误差小于 8×10^{-8} , 体现了较好的大尺寸测距性能。

References

[1] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, et al. Science, 2000, 288(5466): 635.
 [2] Quinn T J. Metrologia, 2003, 40(2): 103.
 [3] Minoshima K, Matsumoto H. Applied Optics, 2000, 39(30): 5512.
 [4] Steven A van den Berg, Persijn S T, Kok G J, et al. Physical Review Letters, 2012, 108(18): 183901.
 [5] Wu G, Liao L, Xiong S, et al. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4362.
 [6] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, et al. Optics Express, 2011, 19(7): 6549.
 [7] Steven A van den Berg, Van S E, Bhattacharya N. Scientific Reports, 2015, 5: 14661.

- [8] Liu T A, Newbury N R, Coddington I. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18501.
- [9] Zhao X, Qu X, Zhang F, et al. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 807.
- [10] Wei D, Takahashi S, Takamasu K, et al. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4881.
- [11] Hochrein T, Wilk R, Mei M, et al. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1613.
- [12] Yang L, Nie J, Duan L. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3850.
- [13] Nakajima Y, Minoshima K. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25979.
- [14] Bonsch G, Potulski E. *Metrologia*, 1998, 35(2): 133.

Study on the Large-Scale Distance Measurement Method for Femtosecond Laser Based on Frequency Scanning and Optical Sampling

ZHANG Tian-yu, QU Xing-hua, ZHANG Fu-min*, PENG Bo

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

Abstract As a high-precision measurement tool, femtosecond laser is superior to traditional laser technology and has been widely used in industrial production, aerospace, scientific research and other fields. The method of frequency sweeping and optical sampling has greatly improved mechanical vibration and slow scanning speed, which has great significance for improving the absolute ranging performance of femtosecond laser. A large-scale distance measurement method using femtosecond laser is proposed based on the principle of frequency sweeping and optical sampling, and research is performed on the measurement principle, interference spectrums and demodulation algorithm of this technology. Firstly, according to the generation principle of mode-locked femtosecond laser and the piezoelectric effect of piezoelectric ceramics, the method of continuous scanning repetition frequency of femtosecond laser was introduced. On this basis, the traditional optical sampling principle was used to explain the range measurement principle of optical sampling method, and the influence of the fiber delay line length on the scanning range was deduced and discussed. Then, a distance measurement system using femtosecond laser was set up, long distance measurement experiments were carried out on a linear guide, and the He-Ne reference light path based on Michelson interference principle was designed. The group refractive index of air was modified according to the experimental environment, the influence of measured distance on the spectrum of interference fringes was analyzed, and the scanning ranges at different target positions were measured. In the range of 50.4 m, the scanning range increased from 0.56 to 1.12 mm, and it fully proved the importance of fiber delay line for improving large-scale ranging capabilities. Periodic scanning frequency could generate cross-correlation fringes, the real time frequency variations and sampling multiplication factors were calculated by performing Hilbert transform processing on the interference spectrums, and the distance information was obtained. In addition, in order to reduce the time delay error of the system and improve the accuracy of the measurement, the difference principle was used to improve the algorithm. The experimental results show that, by contrast, the improved algorithm based on distance difference is used to process data and the performance results are better. After the algorithm is improved, the measurement accuracy of the system is improved from 11 to 4 μm in the range of 50 m, and the relative accuracy is improved from 2.2×10^{-9} to 8×10^{-8} , which indicates that the accuracy is significantly improved. The repeatability measurement data is analyzed and compared with the results of incremental laser interferometers, the standard deviation of measurement error is improved from 10 to 2 μm , and the maximum relative stability is improved from 2×10^{-9} to 4×10^{-8} , which indicates that the stability is significantly improved. Therefore, the method has excellent capability of large-scale distance measurement, the potential of achieving high-accuracy, large-scale and fast absolute range measurement simultaneously, and great prospects in the field of precision spectrum measurement in the future.

Keywords Femtosecond laser; Optical sampling; Large-scale distance measurement; Interference spectrum

(Received Jul. 10, 2018; accepted Nov. 28, 2018)

* Corresponding author