

# 基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对测距

王一霖<sup>\*\*</sup>, 杨凌辉<sup>\*</sup>, 林嘉睿, 刘洋, 郝继贵

天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 提出了一种基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对距离测量方法, 通过检测测量信号与参考信号的相关条纹, 实现了绝对距离测量。研究了一阶相关函数的测量模型, 建立了基于非平衡迈克尔孙干涉光路的测量系统, 通过拟合一阶相关函数包络并提取其峰值精确判断脉冲重合位置, 获得了被测距离。设计并配合长导轨进行了 3 m 的绝对距离测量实验, 并与商用干涉仪测量结果进行实时比对。基于大量实验数据, 针对环境因素及系统误差进行了分析, 并进行了误差消除与补偿。研究表明, 所提方法在 500 min 长期测量中, 在 3 m 的测量范围内的最大测量误差为 5.85  $\mu\text{m}$ , 测量标准差为 2.20  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 测量; 干涉测量; 飞秒光学频率梳; 系统误差; 绝对测距

中图分类号 TB921

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0112003

## Absolute Distance Measurement Based on Coherent Detection by Femtosecond Optical Frequency Comb

Wang Yilin<sup>\*\*</sup>, Yang Linghui<sup>\*</sup>, Lin Jiarui, Liu Yang, Zhu Jigui

*National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** An absolute distance measurement method is proposed based on coherent detection by a femtosecond optical frequency comb. The absolute distance measurement is realized by the detection of coherence patterns between measurement signals and reference signals. The measurement model of the first-order coherence function is studied. The measurement system based on an unbalanced Michelson interferometer is constructed. The target distance is obtained by the envelope fitting of the first-order coherence function and by the high-precision extraction of peaks on the overlapped pulse positions. The 3 m absolute distance measurement experiment on a long range guide is designed and a real-time comparison with those by the commercial interferometers is conducted. In addition, the ambient factors and system errors are analyzed based on a large number of experimental results. The errors are eliminated and compensated. The results show that in the 500 min long term measurement process, the maximum measurement error is 5.85  $\mu\text{m}$  and the standard deviation is 2.20  $\mu\text{m}$  as for the proposed method with a measurement range of 3 m.

**Key words** measurement; interferometry; femtosecond optical frequency comb; system error; absolute distance measurement

**OCIS codes** 120.3180; 120.6160; 120.4825

## 1 引 言

随着大型工业产业的快速发展, 在大尺寸工业测量、航空航天和机械制造领域, 绝对距离测量技术出现了诸多问题<sup>[1]</sup>, 如在现场大尺寸测量中, 很难对测量结果进行评价或对测量系统进行溯源<sup>[2-3]</sup>。采取组合测量法的绝对距离测量系统构成复杂, 且误

差传递过程难以确定。飞秒光学频率梳的出现给绝对距离测量领域带来了新的突破。飞秒光学频率梳在时域上是一系列等间距的窄脉宽脉冲序列, 在频域上是一些等间隔的纵模, 类似于一把梳齿, 也被称为光频梳<sup>[4]</sup>。光频梳的两个重要参数为重复频率和载位包络相移, 将它们锁定到原子钟上, 可以直接在测量现场溯源到时间频率基准。研究者对工业现场

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-08-09 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51705360)、国家自然科学基金创新研究群体项目(51721003)

\* E-mail: icelinker@tju.edu.cn; \*\* E-mail: wangyilin@tju.edu.cn

的重复频率锁定技术进行了深入的研究,如罗浆等<sup>[5-6]</sup>利用共振增强式非线性折射率调制技术实现了半导体可饱和吸收镜锁模的全保偏掺镱光纤激光器重复频率的精确锁定。对于飞秒光学频率梳的长度测量方法,由于飞秒激光器可以锁定至原子钟上,所以可以对测量结果直接在测量现场进行溯源,同时飞秒光学频率梳绝对测距系统相对简单,较易在现场搭建测量系统。

研究者在飞秒光学频率梳绝对距离测量领域进行了大量研究,所用方法主要包括合成波长干涉法、多波长干涉法、色散干涉法、双光梳干涉法和基于相干探测的飞行时间法。这些方法原理上主要分为两大类,一类是利用飞秒光学频率梳稳定相位关系的相位测量方法<sup>[7]</sup>。Minoshima等<sup>[8]</sup>提出了使用飞秒光学频率梳进行绝对距离测量的思路,在地下310 m的隧道中进行了240 m的绝对距离测量实验,实现了8  $\mu\text{m}/\text{m}$ 的测量分辨率。Schuhler等<sup>[9]</sup>提出了基于飞秒光学频率梳的多波长干涉方法,取得了任意距离测量优于 $10^{-7}$ 的相对测量不确定度。Coddington等<sup>[10]</sup>提出了一种利用两个在重复频率上具有微小差别的飞秒光学频率梳的测距方案,实验中测量距离为1.14 km,测量分辨率达到了纳米量级。该类方法的测量精度受到测距系统复杂度的影响,依赖于电学器件的带宽和探测系统的分辨率,不适用于工业现场。另一类测量方法是利用飞秒光学频率梳的窄脉宽、宽光谱特性的飞行时间法。该类方法通过测定光脉冲在测量光路中的飞行时间,进而计算待测的绝对距离信息。Ye<sup>[11]</sup>提出了使用该方法进行高精度绝对距离测量的方案,该方案结合了相干的条纹干涉方法和非相干的飞行时间法,理论上能够在较大的动态范围内实现光学波长分辨率的绝对距离测量。Wei等<sup>[12]</sup>通过分析飞秒光学频率梳的时间相关函数,提出了它的简化理论模型,并通过光程差为6 m的改进迈克耳孙干涉仪进行了实验验证。Lee等<sup>[13]</sup>利用光学平衡互相关技术,在0.7 km的测量距离和在5 ms的采样时间下测量结果的阿伦方差为117 nm。Wei等<sup>[14]</sup>提出了一种基于多脉冲序列干涉的飞行时间绝对距离测量方法。

综上所述,基于飞秒激光相干探测的飞行时间法利用飞秒脉冲的时域一阶相干图样进行脉冲精密对准,能够在大范围(几十米到上百米)内实现半个光学波长(几百纳米)的测距精度<sup>[15]</sup>。相比于其他相干方法,基于一阶时域相干的方法未使用非线性晶体<sup>[16]</sup>,只需要锁定重复频率,不需要锁定载位包

络相移,在光路及测量系统上相对简单,因而更适用于现场可直接搭建、现场可溯源的高精度长度测量系统。然而,在现场搭建长度溯源测量系统的过程中,一方面,由于测量环境恶劣,环境因素如温湿度漂移、空气气流不稳定等会对测量结果产生较为严重的影响<sup>[17]</sup>。另一方面,在现场构建长度基准的过程中通常需要配合非精密长导轨;同时,在时域相干方法中需要利用扫描参考镜来获取相关图样,而相关图样包络峰值的提取直接决定了该方法的测距精度<sup>[18]</sup>,因此,导轨的直线度及电学噪声等问题也会影响整个系统的最终测量精度。

本文利用非平衡的迈克耳孙干涉光路,对基于飞秒光学频率梳一阶时域相干的飞行时间绝对测距方法进行了数学模型研究。在此基础上提出了基于参考臂导轨触发信号的脉冲精密对准方法。结合非精密导轨进行了3 m的绝对距离测量实验,并与商用干涉仪测量结果进行了实时对比。基于大量的实验数据对环境因素和系统偏差的影响进行了深入分析,在校正上述误差的影响后,将最终测量结果与激光干涉仪的结果进行比对,发现最大误差为5.85  $\mu\text{m}$ ,测量结果的标准差为2.20  $\mu\text{m}$ 。

## 2 测距原理

基于飞秒光学频率梳的时域相干探测的绝对测距方法实验原理如图1所示,其中PZT为压电陶瓷,M为反射镜。飞秒激光器发射出的激光经过准直器射入空间中,经过分光镜(BS)分成两束光。一束光经反射进入参考光路,入射到精密导轨1上固定的反射镜 $M_R$ 后再次反射到BS上;另一束光经透射进入测量光路,入射到精密导轨2上固定的反射镜 $M_T$ 后再次反射到BS上。两束反射光在BS上相干,通过扫描精密导轨1或精密导轨2,经光电探测器(PD)探测后,可在示波器上检测到包含距离信息的一阶时域相干条纹。通过理论分析和计算,可以得到待测的绝对距离 $L$ 。

在时域内,飞秒光学频率梳<sup>[19-20]</sup>可以表示为

$$E(t) = A(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_0 + \Delta\varphi_{cc}t)] \otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - mT_R), \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为脉冲的包络函数; $\omega_c$ 为光波中心波长的角频率; $t$ 为时间; $\varphi_0$ 为激光的任意初始相位; $\Delta\varphi_{cc}$ 为载位包络相移的变化率,它是由脉冲群速度与相速度的差异引起的; $T_R$ 为脉冲周期; $m$ 为飞秒光学频率梳的脉冲序数; $\delta(t - mT_R)$ 为狄拉克函

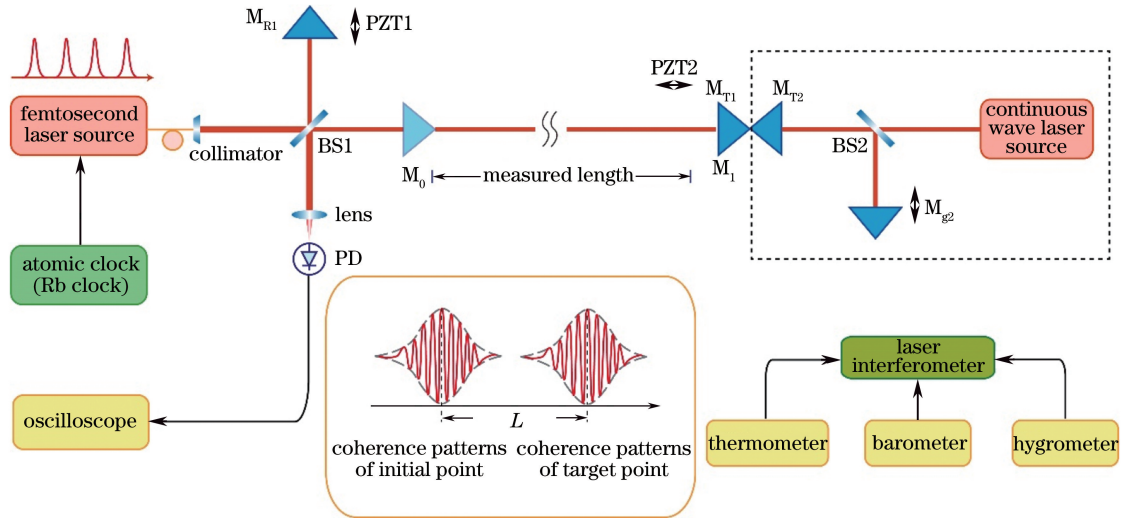


图 1 飞秒光学频率梳距离测量系统的原理图

Fig. 1 Schematic of distance measurement system by femtosecond optical frequency comb

数。脉冲重复频率  $f_{\text{rep}} = 1/T_R$ , 脉冲初始载位包络相移  $f_{\text{ceo}} = \Delta\varphi_{\text{ce}} f_{\text{rep}} / (2\pi)$ 。

假定被测绝对距离是两次测量镜所在的位置差  $L$ , 它可以表示为

$$L = (N \times l_{\text{pp}} + d) / 2, \quad (2)$$

其中

$$l_{\text{pp}} = c_n \times T_R = \frac{c}{n_g \times f_{\text{rep}}}, \quad (3)$$

式中:  $N$  为被测距离的整数部分 ( $N = 0, 1, 2 \dots$ );  $d$  为被测距离的小数部分, 它与 PZT 扫描的距离相等,  $d = 2L - N \times l_{\text{pp}}$ ;  $l_{\text{pp}}$  为脉冲间距;  $c$  为光在真空中的速度,  $c = 2.997792458 \text{ m/s}$ ;  $c_n$  为光在空气中的速度;  $n_g$  为群折射率。由(2)式可知, 确定了  $N$  和  $d$  就可以确定绝对距离  $L$ 。

为了确定  $d$  的值, 在时域内考虑光脉冲<sup>[21-22]</sup>, 则(1)式转化为

$$E(t) = A(t) \exp[i\omega_c t + i(\varphi_0 + \Delta\varphi_{\text{ce}} t)]. \quad (4)$$

如图 1 所示, 由于测量光经过了测量距离  $L$ , 而参考光没有经过测量臂, 当测量光和参考光在 BS 处再次叠加时, 测量光与参考光是不同的飞秒光学频率梳脉冲。假定测量光是飞秒光学频率梳的第一个脉冲, 而参考光来自飞秒光学频率梳的第  $N$  个脉冲。参考光可以表示为

$$E_2(t) = \frac{A(t) \exp(i\omega_c t + i\varphi_0 + iN\Delta\varphi_{\text{ce}})}{2}. \quad (5)$$

测量光可以表示为

$$E_1(t) = \frac{A(t - \Delta t) \exp[i\omega_c(t - \Delta t) + i\varphi_0]}{2}, \quad (6)$$

式中时间差  $\Delta t = 2d/c_n$ 。

测量光与参考光叠加后, 可以表示为

$$E_{\text{total}}(t) = E_1(t) + E_2(t). \quad (7)$$

在 PD 的响应时间远大于飞秒光学频率梳重复频率的条件下, 一阶相关函数的强度可以表示为

$$I = \sum_m \{ |E_{\text{total}}(t)|^2 \} = \sum_m \int_{-\infty}^{+\infty} \{ E_1(t)^2 + E_2(t)^2 + 2\text{Re}[E_1(t)E_2^*(t)] \} dt = \sum_m \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(t)^2 dt + \sum_m \int_{-\infty}^{+\infty} E_2(t)^2 dt + \sum_m \int_{-\infty}^{+\infty} 2\text{Re}[E_1(t)E_2^*(t)] dt, \quad (8)$$

式中:  $*$  代表求共轭;  $\text{Re}$  代表求实部。(7)式中前两个积分是直流常量, 故只考虑第三个积分  $I_2$ :

$$I_2 \propto \sum_m A(t)A(t - \Delta t) \cos(\omega_c \Delta t + \omega_c N \Delta\varphi_{\text{ce}}) \propto \sum_m A(t)A\left(t - \frac{2d}{c_n}\right) \cos\left(\omega_c \frac{2d}{c_n} + \omega_c N \Delta\varphi_{\text{ce}}\right). \quad (9)$$

该积分分量是一个交流分量, 当测量脉冲和参考脉冲在 BS 上正好准时, 通过 PD 探测, 可以在示波器中直接观察到一阶相关条纹。条纹包络的峰值仅与飞秒激光器的重复频率有关, 通过包络峰值的间距可以得到该位置的距离信息。

### 3 绝对距离测量实验

为了验证该方法的有效性,搭建了图 2 所示的实验验证系统。该实验系统分为飞秒光学频率梳时域相干探测系统和激光干涉仪比对系统。实验所用光源为德国 Menlo Systems 公司生产的 C-Fiber 锁模飞秒激光器,通过德国 Menlo Systems 公司生产的 RRESYNCRO 重复频率同步器锁定重复频率,激光器和重复频率同步器均以美国 Symmetricom

公司的 8040C 铷钟的参考信号为基准。飞秒激光器的重复频率为 100 MHz,脉冲宽度为 50 fs,平均输出功率为 33 mW,选用的中心波长为 1582 nm,光谱宽度为 101 nm。待测光信号通过美国 Thorlabs 公司生产的 PDB450C 平衡放大 PD 探测,并使用美国 Tektronix 公司生产的 MDO4054C 示波器观测。参考臂通过德国 PI 公司生产的 M521.DD1 高精度线性导轨进行扫描。

在飞秒光学频率梳时域相干探测系统中,测量

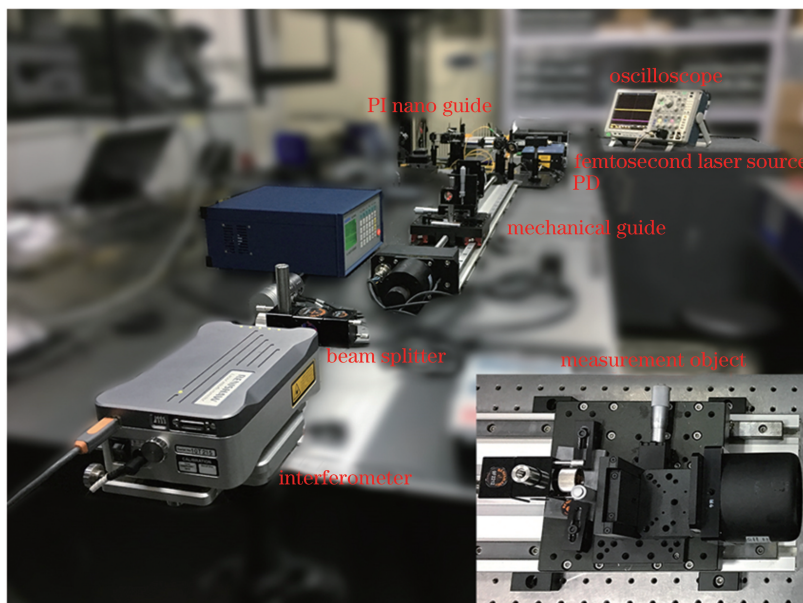


图 2 基于飞秒光学频率梳的长度对比实验的实物图

Fig. 2 Actual layout of distance comparison experiment based on femtosecond optical frequency comb

光从飞秒激光光源射出,经过准直、扩束后射入迈克耳孙干涉测量系统,该测量系统包括分光镜 BS1,参考反射镜  $M_{R1}$ ,测量目标镜  $M_{T1}$ 。使用英国 Renishaw 公司生产的 XL80 迈克耳孙干涉仪进行测量结果的比对, $M_{T2}$ 为激光干涉仪的测量目标镜, $M_{T1}$ 、 $M_{T2}$  紧紧固结在美国 Syntron 公司生产的 86BYG250B 长导轨上, $M_{R1}$ 、 $M_{R2}$ 、 $M_{T1}$ 、 $M_{T2}$  均为角锥棱镜。该实验选取飞秒光学频率梳干涉系统 BS 的近端一点作为测量起点,对 3 m 的位置进行了 50 次重复测量。当测量目标镜在 BS 近端时,通过扫描纳米微动平台上反射镜  $M_{R1}$  的位置得到测量起点的一阶相关条纹;当测量目标镜在远端时,同样通过扫描  $M_{R1}$  的位置得到测量点的一阶相关条纹。将相关条纹数据导入计算机中进行数据处理分析,得到测量的绝对距离。

两个测量位置之间的绝对距离可以表示为

$$L = (N \times c_n \times T_R \pm d)/2. \quad (10)$$

整数部分可以通过非精密长度测量设备确定,

如米尺、商用测距仪;小数部分可以通过一阶相关条纹计算得出。

测量时使用 PZT2 提供的参考信号来确定条纹重合时导轨移动的距离。在示波器上得到的测量结果如图 3 所示。

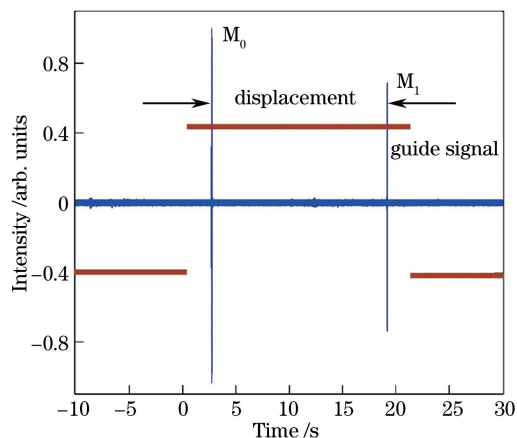


图 3 示波器上的测量结果

Fig. 3 Measurement results on oscilloscope

在激光干涉仪比对系统中,使用英国 Renishaw 公司生产的 XL80 迈克耳孙干涉仪进行测量结果的比对。 $M_{R1}$ 、 $M_{R2}$ 、 $M_{T1}$ 、 $M_{T2}$  均为角锥棱镜, $M_{T1}$ 、 $M_{T2}$  紧紧固结在美国 Syntron 公司生产的 86BYG250B 非精密长导轨 PZT2 上。受限于导轨长度,测量臂达不到 3 m,故在实验中采用折叠光路的方式,通过放置角锥棱镜,在较短的移动范围内使测量靶镜移动 750 mm,等效移动距离为 3 m。示波器的测量结果如图 3 所示。

首先将长导轨 PZT2 移动到 BS 近端位置,即测量零点处,并扫描高精度线性导轨得到一阶相关条纹,如图 3 中  $M_0$  所示。然后将移动平台移动

到 3 m 测量点附近,再次扫描高精度线性导轨,得到测量点的一阶相关条纹,如图 3 中  $M_1$  所示,并记录此时激光干涉仪的测量结果。为了补偿温度、气压、湿度等环境因素对空气折射率的影响,使用 XL-80 的温湿度传感器 XC-80 记录环境信息,环境温度为 18.02 °C,相对湿度为 19.09%,气压为 103.66 kPa。

在获得零点和测量点的一阶相关条纹后,将数据传入计算机,通过 Matlab 软件截取数据的主峰部分,如图 4(a)、(c) 所示,并进行条纹峰值点提取和高斯包络拟合<sup>[23]</sup>,如图 4(b)、(d) 所示,提取整个包络的峰值。

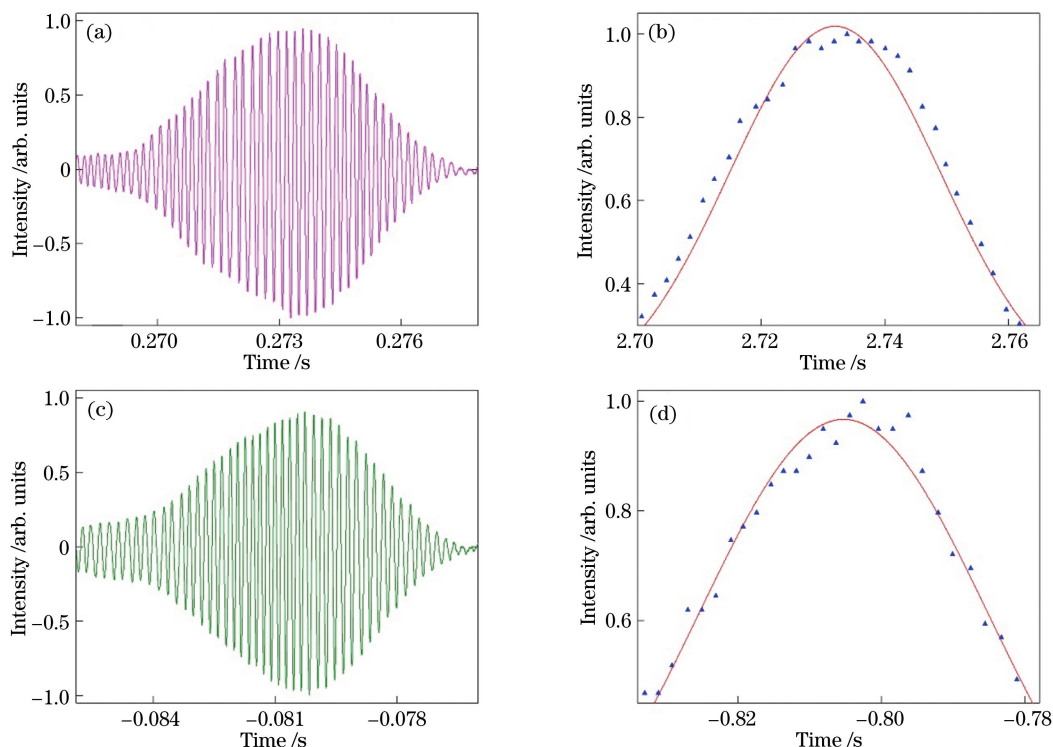


图 4 数据处理过程。(a)初始点的相关条纹;(b)初始点的峰值提取与包络拟合;(c)测量点的相关条纹;(d)测量点的峰值提取与包络拟合

Fig. 4 Data processing. (a) Coherence pattern of initial points; (b) peak extraction and envelope fitting of initial points; (c) coherence pattern of target points; (d) peak extraction and envelope fitting of target points

经过数据处理,得到最终的测量结果与测量偏差如图 5 所示。对 50 组测量结果进行分析,并与激光干涉仪测量结果进行比对,在未考虑环境因素及系统偏差所带来的实验误差的情况下,以测量结果的标准差评价其重复性,得到测量的标准差为 3.30  $\mu\text{m}$ ,与激光干涉仪的最大误差为 738.42  $\mu\text{m}$ 。

#### 4 测量结果的误差分析及修正

在长期实验过程中,环境因素会产生变化<sup>[24]</sup>,而这些变化均会导致空气折射率的波动,进而导致

测量的整数部分产生测量误差。导轨直线度不足会带来测量误差,测量时测量线与标准线不重合带来的阿贝误差等系统误差也会带来测量误差。下面对测量误差进行修正。

##### 4.1 环境因素的影响

分析图 5 的拟合曲线,可以看出曲线向固定方向漂移。实验时实时监测的温湿度变化曲线如图 6 所示,可以看出,温湿度的变化与曲线的漂移具有相同的趋势。通过 Ciddor 方程计算得到,在 1560 nm 波长下,当其他环境因素保持恒定时,温度每提升

1 °C, 测量误差增大 0.7 μm; 其他环境因素保持恒定而相对湿度提升 1% 时, 会产生 0.66 μm 的测量误差。因此需要通过补偿来修正环境因素对实验结果的影响。

$$D = \frac{c}{n \cdot f_{\text{rep}}}, \quad (11)$$

式中:  $n$  为空气的折射率;  $f_{\text{rep}} = 100 \text{ MHz}$ 。

空气折射率会直接影响测量结果的准确性。在实验中实时记录环境条件(温度、湿度、压强), 并使用 Ciddor 方程对实验结果进行补偿<sup>[25]</sup>。补偿结果如图 7 所示, 经过补偿, 测量结果与激光干涉仪测量结果的最大误差为 9.35 μm, 测量结果的标准差为 2.79 μm。

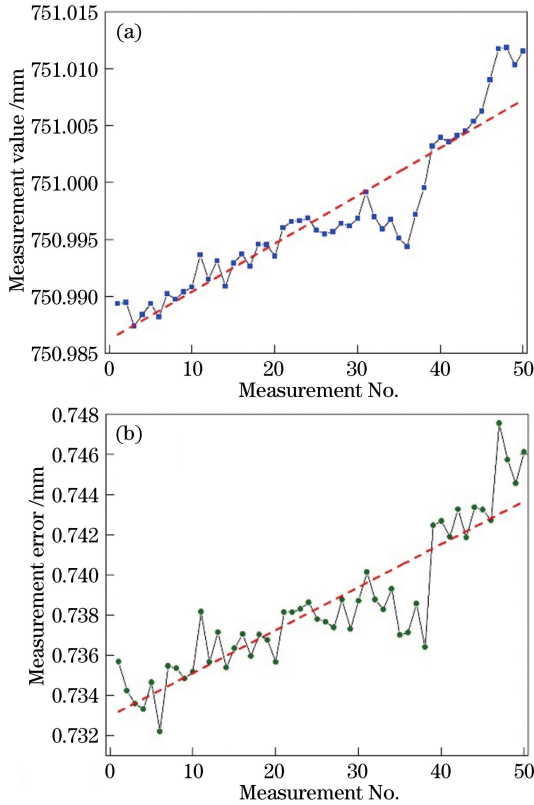


图 5 测量结果及测量偏差。(a) 测量结果; (b) 测量偏差  
Fig. 5 Measurement results and errors. (a) Measurement results; (b) measurement errors

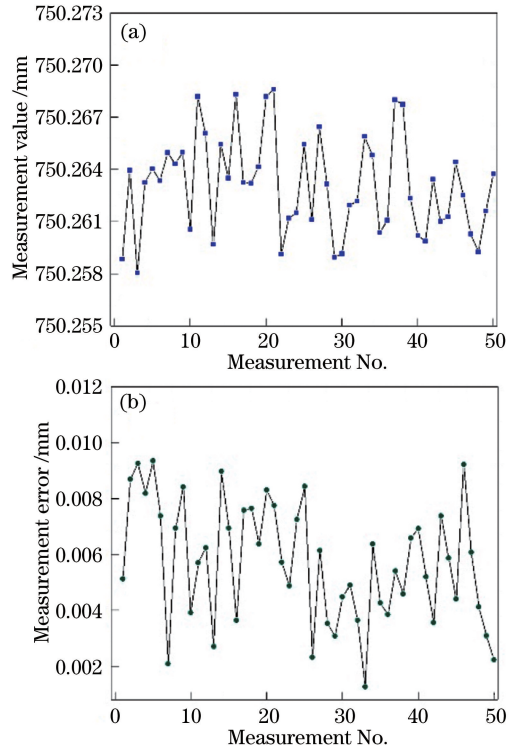


图 7 修正环境条件下的测量结果与测量偏差。(a) 测量结果; (b) 测量偏差

Fig. 7 Measurement results and errors of environmental factors after correction. (a) Measurement results; (b) measurement errors

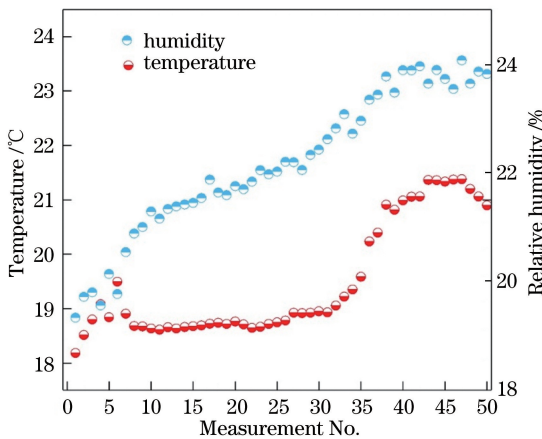


图 6 测量过程中的环境参数变化  
Fig. 6 Variance of ambient factors during measurement

由测量原理及(9)式可知, 测量结果的误差由整数部分  $N$  和小数部分  $d$  共同决定。实验选取 3 m 进行绝对距离测量, 即整数部分取  $N = 1$ , 代表相邻两个飞秒脉冲之间的距离, 这段距离的计算公式为

#### 4.2 系统误差的影响

由图 7 可知, 飞秒光学频率梳测量系统的测量结果与激光干涉仪的测量结果有一个稳定的系统误差, 经过分析, 这一系统误差是由于阿贝误差与导轨直线度不足。阿贝误差通常是由测量线与基准线不在一条直线上引起的。飞秒光学频率梳测量系统的目标靶镜和激光干涉仪的测量靶镜是通过机械结构固定在一起的, 会存在一个夹角  $\theta$ , 这个夹角造成的阿贝误差是系统误差的主要来源, 阿贝误差可表示为

$$\Delta L_{\text{Abb}} = L_{\text{Abb}} \times \theta, \quad (12)$$

式中  $L_{\text{Abb}}$  为阿贝臂长。

在对 50 组实验数据以及阿贝误差进行分析后,可以得到每组实验中由阿贝误差造成的系统误差为定值,因此通过激光干涉仪进行标定,可以对测量的阿贝误差进行补偿。

该实验所使用的长导轨使用时间过长,直线度显著下降,也会对测量结果的准确性造成影响。但由于实验测量的是一段固定的导轨范围,可以通过激光干涉仪标定后对该部分系统误差进行补偿。经过补偿后,得到的测量结果如图 8 所示。

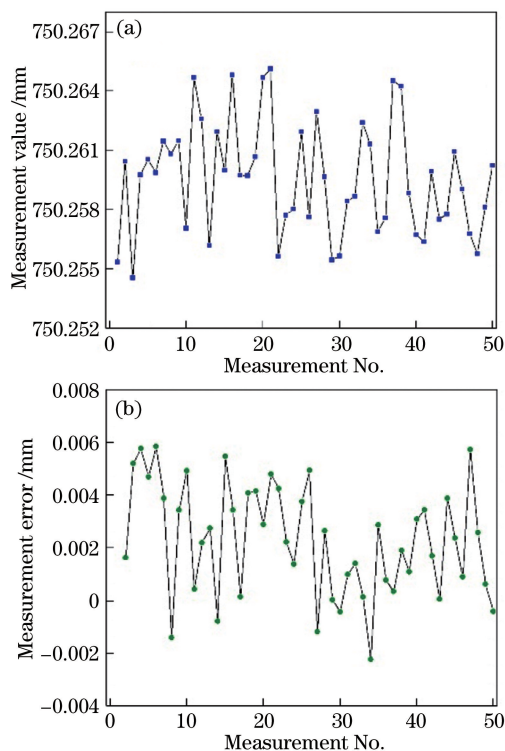


图 8 优化后的测量结果及测量偏差。(a)测量结果;(b)测量偏差

Fig. 8 Measurement results and errors after optimization. (a) Measurement results; (b) measurement errors

通过激光干涉仪测量结果标定得到的结果与激光干涉仪测量结果的最大误差为  $5.85 \mu\text{m}$ ,测量标准差为  $2.20 \mu\text{m}$ 。

在以上实验的基础上,再次对 3 m 的距离进行测量。为了与补偿方法一致,每组实验进行 50 次重复测量,并重复进行 5 组实验,经过数据处理与误差补偿得到最终测量结果如图 9 所示。

## 5 结 论

分析了基于相关函数探测的飞秒光学频率梳绝对距离测量方法的基本原理,并通过测距实验验证了该方法的准确性,同时分析了系统误差的产生原

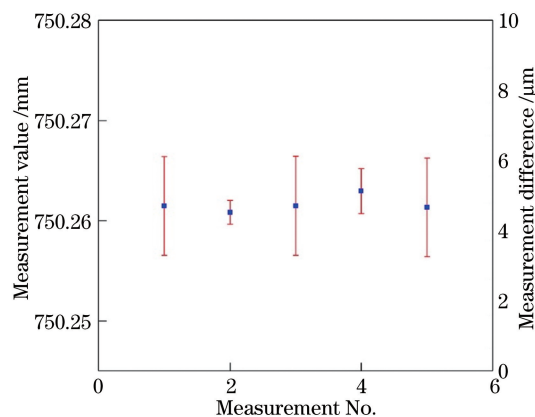


图 9 最终测量结果

Fig. 9 Final measurement results

因并进行了优化处理。搭建了飞秒光学频率梳时域相干探测系统和激光干涉仪比对系统,通过高精度线性导轨获得零点与测量点的一阶相关条纹信息,并通过计算机进行峰值提取、曲线拟合,获得了被测距离。通过 Ciddor 方程补偿环境因素造成的测量误差,并对系统误差进行了分析与补偿,最终在 500 min 的长期测量中,在 3 m 的测量范围内,获得的最大测量误差为  $5.85 \mu\text{m}$ ,测量标准差为  $2.20 \mu\text{m}$ 。实验结果表明,该方法结构简单,易于在测量现场搭建,并可以在现场进行溯源,测量精度高,满足了大尺寸制造领域对高精度绝对距离测量的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Ye S H, Zhu J G, Zhang Z L, *et al.* Status and development of large-scale coordinate measurement research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29 (4A): 1-6.  
叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展 [J]. *计量学报*, 2008, 29(4A): 1-6.
- [2] Zhang F M, Qu X H, Dai J F, *et al.* A method of precision evaluation for field large-scale measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2159-2163.  
张福民, 曲兴华, 戴建芳, 等. 一种现场大尺寸测量精度的评价方法 [J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2159-2163.
- [3] Hu W C, Qiu Z R, Zhang G X. *In-situ* calibration method for large-scale space angle optical measurement system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(10): 1008006.  
胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间角度检测系统的现场标定方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1008006.

- [4] Kim S W. Combs rule[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 313-314.
- [5] Luo J, Yang S, Hao Q, *et al.* Precise locking the repetition rate of a SESAM mode-locking all polarization maintaining fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0206003.  
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): 0206003.
- [6] Hao Q, Wang Y F, Luo P, *et al.* Self-starting dropout-free harmonic mode-locked soliton fiber laser with a low timing jitter[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2330-2333.
- [7] Cundiff S T, Ye J. Femtosecond optical frequency combs[J]. *Review of Modern Physics*, 2003, 75(1): 325-342.
- [8] 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.
- [9] Schuhler N, Salvadé Y, Lévêque S, *et al.* Frequency-comb-referenced two-wavelength source for absolute distance measurement [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(21): 3101-3103.
- [10] 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.
- [11] Ye J. Absolute measurement of a long, arbitrary distance to less than an optical fringe [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(10): 1153-1155.
- [12] Wei D, Takahashi S, Takamasu K, *et al.* Analysis of the temporal coherence function of a femtosecond optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7011-7018.
- [13] Lee J, Kim Y J, Lee K, *et al.* Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 716-720.
- [14] Wei D, Takahashi S, Takamasu K, *et al.* Time-of-flight method using multiple pulse train interference as a time recorder[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4881-4889.
- [15] Wang G C, Yan S H, Yang J, *et al.* Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0412002.  
王国超, 颜树华, 杨俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0412002.
- [16] Zhang Y Y, Guo Y, Ren Y J, *et al.* Study of drift error and its compensation method in absolute distance measurement by optical frequency scanning interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1212001.  
张雅雅, 郭寅, 任永杰, 等. 光频扫描干涉绝对测距漂移误差与补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1212001.
- [17] Wang G C, Tan L L, Yan S H, *et al.* Synchronous phase demodulation for real-time absolute distance measurement based on optical comb multi-wavelength interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112003.  
王国超, 谭立龙, 颜树华, 等. 基于光梳多波长干涉实时绝对测距的同步相位解调[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112003.
- [18] Wu T F, Liang Z G, Yan J H. Theoretical study on air dispersion compensation in the distance measurement of femtosecond pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1208004.  
武腾飞, 梁志国, 严家骅. 飞秒激光测距中空气色散补偿理论研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1208004.
- [19] An W N, Zhang F M, Wu H Z, *et al.* Absolute distance measurement method based on frequency-domain interference using a femtosecond optical frequency comb [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2458-2465.  
安慰宁, 张福民, 吴翰钟, 等. 一种基于飞秒光频梳频域干涉的绝对测距方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2458-2465.
- [20] Wu H Z, Cao S Y, Zhang F M, *et al.* A new method of measuring absolute distance by using optical frequency comb[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 100601.  
吴翰钟, 曹士英, 张福民, 等. 一种光学频率梳绝对测距的新方法 [J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 100601.
- [21] Zhuge J C, Xing S J, Gao J S. Theoretical analysis of arbitrary and absolute length measurement by using femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0112004.  
诸葛晶昌, 邢书剑, 高建树. 飞秒光频梳的任意长绝对测距理论分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0112004.
- [22] Hua Q, Zhou W H, Xu Y. Review of absolute distance measurement with femtosecond optical frequency comb [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2012, 32(1): 1-5, 14.  
华卿, 周维虎, 许艳. 飞秒激光频率梳绝对测距技术综述[J]. *计测技术*, 2012, 32(1): 1-5, 14.
- [23] Liu Y, Yang L H, Guo Y, *et al.* Optimization



methods of pulse-to-pulse alignment using femtosecond pulse laser based on temporal coherence function for practical distance measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101: 35-43.

[24] Xu Y. Theoretical study on cross-correlation signal of a femtosecond pulse laser in air[J]. Acta Photonica

Sinica, 2017, 46(4): 0414002.

许艳. 空气中飞秒脉冲激光器互相关信号的理论研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0414002.

[25] Ciddor P E. Refractive index of air: New equations for the visible and near infrared[J]. Applied Optics, 1996, 35(9): 1566-1573.