

# 光频扫描干涉绝对测距漂移误差与补偿方法研究

张雅雅, 郭寅\*, 任永杰, 尚岳, 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** 光频扫描干涉(OFSI)技术是一种具有广阔发展前景的高精度绝对测距技术。在实际应用中,该技术对光程差漂移非常敏感,测量过程中光程差的微小漂移通过放大因子的放大,引入显著的测量误差。详细分析了由于测量臂光程漂移引入的多普勒效应对测量结果的影响,并根据频移误差放大项的符号与光频扫描方向相一致的特点,使用光频三角波扫描方法对漂移误差进行补偿。实验结果显示,对距离为 3.6 m 的目标进行 10 次重复测量的标准差从 21.51  $\mu\text{m}$  减小到 2.85  $\mu\text{m}$ 。另外,与干涉仪的对比实验结果显示,本方法所得残余误差的标准差由补偿前的 18.6  $\mu\text{m}$  减小到 5.6  $\mu\text{m}$ ,提高了测量精度。

**关键词** 测量;干涉法;可调谐激光器;漂移误差;绝对测距

中图分类号 TB921 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1212001

## Study of Drift Error and Its Compensation Method in Absolute Distance Measurement by Optical Frequency Scanning Interferometry

Zhang Yaya, Guo Yin, Ren Yongjie, Shang Yue, Liu Yang, Zhu Jigui

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,

College of Precision Instrument and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Optical frequency scanning interferometry (OFSI) is a high-precision absolute distance measurement technique with broad prospect. However, in practice, it is sensitive to the drift of optical path difference. Due to the influence of the amplification factor, the slight drift of optical path difference in measurement process is enlarged, which introduces obvious measurement error. The influence of Doppler effect introduced by the optical path drift of measuring arm on the measurement result has been detailedly analyzed in this paper. According to that the sign of the frequency drift error is consistent with direction of frequency scanning, the drift error is compensated by optical frequency scanning method with triangular wave. The experimental results show that, for the target at 3.6 m, the standard deviation decreases from 21.51  $\mu\text{m}$  to 2.85  $\mu\text{m}$  with 10 times of measurements. Furthermore, the contrast experiment result with interferometer shows that the standard deviation of residual error of the proposed method decreases from 18.6  $\mu\text{m}$  (before compensation) to 5.6  $\mu\text{m}$ , and the measurement accuracy is enhanced.

**Key words** measurement; interferometry; tunable laser; drift error; absolute distance measurement

**OCIS codes** 120.3180; 120.7280; 140.3600

## 1 引 言

大尺寸、高精度绝对距离测量在卫星编队飞行、大型工件装配与检测以及高能粒子对撞机研制等科学与工程应用领域具有重要的研究价值<sup>[1-4]</sup>。因其具有好的方向性、单色性、相干性和高精度等优点,激光测距技术一直以来都是国内外研究的热点。传统的激光测距技术主要可分为激光干涉测距和飞行时间测距技术;激光干涉测距技术的测量精度高,但由于存在  $2\pi$  模糊距离的限制,只能进行增量式的连续位移测量;飞行时

收稿日期: 2017-07-05; 收到修改稿日期: 2017-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(51705360, 51475329)

作者简介: 张雅雅(1991—),女,硕士研究生,主要从事绝对测距方面的研究。E-mail: zhangyaya\_1102@tju.edu.cn

导师简介: 叶声华(1934—),男,博士,教授,中国工程院院士,主要从事激光及光电测试技术方面的研究。

E-mail: shhuaye@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: yin\_guo@tju.edu.cn

间测距技术的测量范围大,但测距分辨率受限于电学带宽和光源特性,测量精度难以进一步提升。光频扫描干涉(OFSI)技术起源于电磁波频率扫描干涉技术,是一种伴随可调谐激光器发展而兴起的新型绝对测距方法<sup>[5-6]</sup>,通过测量干涉相位变化或者干涉拍频来获取绝对距离。它弥补了传统干涉测距增量式测量和存在 $2\pi$ 模糊距离的不足,测量精度优于飞行时间法,具有大尺寸高精度的优点,且拍频的测量方法在多目标测距方面具有很大优势<sup>[7]</sup>。

OFSI 技术拥有测量范围大、精度高等优点,但其仍受可调谐激光器性能和测量条件的限制。一方面,激光频率的不稳定性和频率调谐的非线性导致测量信号变形,使测量信号频谱展宽,影响测量精度<sup>[8-12]</sup>;另一方面,由光程差漂移引入的测量误差对测距精度影响非常大<sup>[13-21]</sup>。在实际应用中,光程差漂移无法避免,更重要的是,光程差漂移误差在 OFSI 测距系统中由于被理解为光频变化带来的误差,被放大因子(扫频中心频率与扫频范围的比值)放大几百甚至上千倍,在工业现场环境下,该部分误差是测量误差的主要来源。所以,补偿光程差漂移误差对提高 OFSI 测距精度具有重要的意义。

为解决该问题,Swinkels 等<sup>[15]</sup>将被测目标位移公式用泰勒公式展开,采用四点测量,通过公式推导消除位移的二阶导数,降低了该测距方法对被测目标连续移动的敏感程度,在 15 m 测量距离上实现了  $130\ \mu\text{m}$  的重复性,但该方法数据处理复杂,且在扫描起点和终点需要 0.1 s 的时间将光频锁定在法布里-珀罗(F-P)腔上,导致相位测量的不同步;Yang 等<sup>[16-18]</sup>利用两台可调谐激光器同时进行正反扫描测量,利用光程差漂移在两台激光器测量结果上引入的误差符号相反的特点,通过求两台激光器独立测量结果的平均值来消除漂移误差,但该方法增加了成本和系统复杂度,两台激光器的光频扫描速度一致性也难以保证;Martinez 等<sup>[19]</sup>采用四波混频技术产生镜像扫频,通过波分复用技术实现同步正反向扫描,从而消除了目标低频振动对测距精度的影响,在 2 Hz,  $9\ \mu\text{m}$  的振动下,测量重复性由  $339\ \mu\text{m}$  减小到  $21\ \mu\text{m}$ ,该方法控制了系统成本,但四波混频的产生条件苛刻,系统实现难度大;陶龙等<sup>[21]</sup>针对目标镜的低频振动和缓慢漂移,研究了光频正反扫描漂移误差补偿办法,通过求取正反扫描过程中相位平均值达到消除漂移误差的目的。

本文分析了 OFSI 测距原理和光程差漂移对拍频测量的影响,使用光频三角波扫描方法消除由于光程差漂移引入的多普勒效应。经实验验证,该方法提高了测距精度,并且具有实现简单、测量速度快、经济性等优点。

## 2 测距原理

OFSI 测距原理如图 1 所示,可调谐激光器发出的激光经过隔离器、单模光纤(SMF)、准直器入射到空间中,经分光棱镜(BS)分成两束光,一束光被参考反射镜反射,作为参考光,另一束光被目标反射,作为测量光,两束光经 BS 重新会聚之后在光电探测器(PD)处发生干涉。

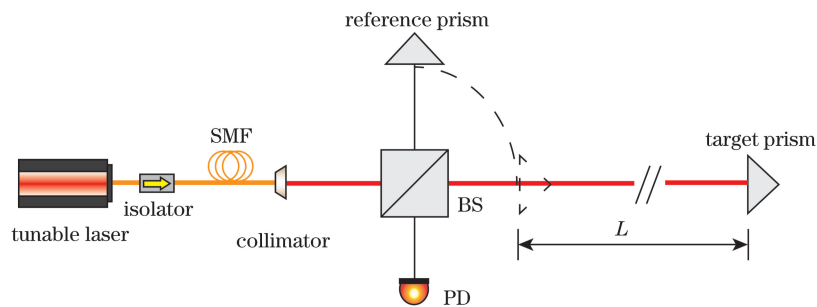


图 1 OFSI 测距原理图

Fig. 1 Schematic of OFSI distance measurement principle

假设测量过程中被测目标位置固定不变,激光频率随时间  $t$  线性调谐可以表示为:

$$\nu(t) = f_0 + \alpha t, \quad (1)$$

式中  $f_0$  表示初始频率, $\alpha$  为光频扫描速度。参考光与测量光的光频变化曲线如图 2 所示,虚线表示参考光路的光频,实线表示测量光路的光频,由于参考光路和测量光路存在光程差,所以测量光到达探测器的时间

相对于参考光存在  $\tau$  的滞后,两束光在 PD 处产生干涉,由图 2 可知拍频  $f$  可以表示为:

$$f = \alpha\tau = \frac{B}{T_m} \times \frac{2nL}{c} = \frac{2n\alpha L}{c}, \quad (2)$$

式中  $\tau$  为测量光相对于参考光的时间延迟,  $n$  为空气折射率,  $c$  为光速,  $B$  表示光频扫描范围,  $T_m$  为扫描周期,  $L$  为被测距离。

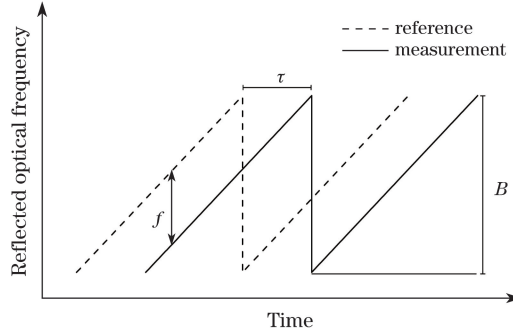


图 2 参考光与测量光的光频随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of optical frequency of reference and measurement beam versus time

根据(2)式可知,在已知激光器扫频速度的情况下,被测距离为:

$$L = \frac{cf}{2n\alpha}. \quad (3)$$

在实际测量中,由于受到激光器内部调谐器件的限制和环境因素的影响,光频并非严格遵循线性变化,这将给干涉信号拍频测量引入测量误差。本研究以辅助干涉光路产生的干涉信号作为时钟信号,对测量光路的干涉信号进行等光频重采样,获得实时监控的光频扫描速率,消除了调频非线性的影响。

### 3 目标漂移对干涉拍频的影响及修正

#### 3.1 目标漂移对干涉拍频的影响

以上原理分析都是基于被测目标固定情况下的,而在实际应用中,由于光程差漂移引入的多普勒效应对测距精度的影响非常大。如(2)式所示,若被测目标固定不动,光程差为定值,干涉信号拍频也是一个定值,大小为  $\alpha\tau$ 。但是在实际测量环境下,由于外界环境变化和测量目标位置漂移的影响,光程差为一个随着时间变化的量,所以拍频信号也不再是一个定值,而是一个随着时间变化的量  $\alpha\tau(t)$ 。

若光频扫描范围为 2 nm,扫描速度为 50 nm/s,则光频扫描周期为 0.04 s。由于光频扫描周期很短,由环境因素引起的光程差缓慢漂移和机械振动的频率一般都很小,所以可以假设在该光频扫描周期内目标以恒定的速度  $v$  运动。在多普勒效应的影响下,PD 接收到返回测量光束的频率发生漂移,大小为:

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda} = \frac{2v\bar{\nu}}{c}, \quad (4)$$

式中  $\Delta f$  为多普勒频移,  $\bar{\lambda}$  为中心波长,  $\bar{\nu}$  为中心频率。由(2)和(4)式可得实际测量拍频  $f'$  为:

$$f' = f \pm \Delta f = \frac{2n\alpha L}{c} \pm \frac{2v\bar{\nu}}{c}. \quad (5)$$

所以实际测量得到被测距离  $L'$  的大小为:

$$L' = \frac{cf'}{2n\alpha} = L \pm \frac{v\bar{\nu}}{n\alpha} = L \pm \frac{T_m v\bar{\nu}}{nB} = L \pm \frac{\bar{\nu}}{nB} \Delta L_{\text{error}}, \quad (6)$$

式中  $\Delta L_{\text{error}}$  是单次扫描时间内被测目标的位移。不考虑空气折射率  $n$  的影响,在测量过程中,测量值包括两部分,第一部分为被测真值,第二部分是漂移误差,目标的位移被放大了  $\bar{\nu}/(nB)$  倍(例如中心频率为 1550 nm,扫频范围为 2 nm,则放大倍数约为 775,即被测目标 1  $\mu\text{m}$  的漂移将带来 775  $\mu\text{m}$  的测量误差),被测光程差漂移对最终测距结果的影响非常显著,不可忽略。为了减小光程差漂移误差的影响,可以增加光频

扫描范围以减小放大系数。然而,目前可调谐激光器技术不能显著地提高激光器的光频扫描范围;同时,提高扫描范围也意味着测量时间的增加,从而引入更大的漂移。

### 3.2 漂移误差的修正

由(6)式可知漂移误差正负方向与扫描速度  $\alpha$  的方向相一致,为了消除漂移误差,需要两个扫描方向相反的调频激光。最普遍的方法是用两台激光器分别进行正反向调频,或者通过四波混频产生对扫激光,还可以通过单激光器产生连续正反扫描的激光。但综合考虑系统成本以及光源产生方式的难易程度,本研究使用光频连续三角波扫描方法来消除光程差漂移引入的多普勒频移误差。

如图3所示,黑色虚线表示参考光,黑色实线表示测量光,若被测目标固定不动,在频率上升和下降过程中拍频的大小相等。若被测目标以恒定速度移动,由于多普勒效应的影响,测量光的光频变化曲线向下移动了  $\Delta f$ ,如图中红线所示,致使干涉信号的拍频在频率上升过程中增加了  $\Delta f$ ,用  $f_{\text{up}}$  表示;而在频率下降过程中下降了  $\Delta f$ ,用  $f_{\text{down}}$  表示,分别可以表示为:

$$f_{\text{up}} = f + \Delta f, \quad (7)$$

$$f_{\text{down}} = f - \Delta f. \quad (8)$$

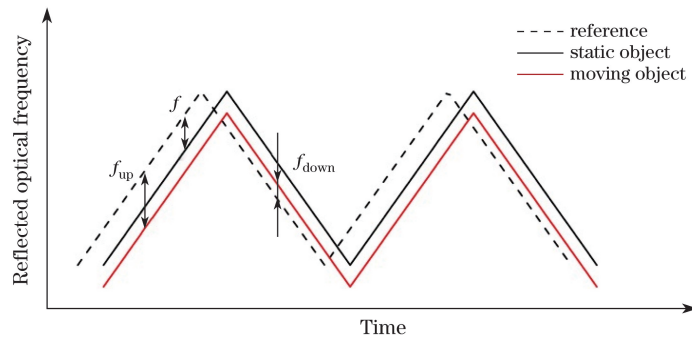


图3 光频三角波扫描曲线

Fig. 3 Scanning curve of optical frequency triangular wave

将  $f_{\text{up}}$  与  $f_{\text{down}}$  相加能够消除多普勒效应的影响,即:

$$f = \frac{f_{\text{up}} + f_{\text{down}}}{2}. \quad (9)$$

将  $f_{\text{up}}$  与  $f_{\text{down}}$  相减能够得到目标的多普勒频移,即:

$$\Delta f = \frac{f_{\text{up}} - f_{\text{down}}}{2} = \frac{2\nu}{\lambda}, \quad (10)$$

从而计算得到被测目标的移动速度,即:

$$\nu = \frac{\lambda(f_{\text{up}} - f_{\text{down}})}{4}. \quad (11)$$

### 3.3 仿真结果

为了说明这个问题,做了如下的仿真:光频扫描范围为 2 nm(1549~1551 nm),扫描速度为 20 nm/s( $\alpha$  约为 2.5 THz/s),则测量周期为 0.1 s,设被测距离  $L$  为 1 m,则干涉信号频谱如图4中蓝线所示,测得峰值频率为 16649.342 Hz,通过(3)式计算得到测量的距离为 1.000001 m。若假设被测目标以 1  $\mu\text{m/s}$  的速度匀速移动,则在测量周期内被测目标移动了 0.1  $\mu\text{m}$ ,其测量频谱图如图4中红线所示,测得峰值频率为 16650.582 Hz,由(3)式计算得到的被测距离为 1.000075 m,测量偏差为 75  $\mu\text{m}$ ,然而目标实际移动的位移是 0.1  $\mu\text{m}$ (放大倍数约为 775)。

让频率反向扫描(1551~1549 nm),其他条件不变,干涉信号的频谱图如图4中黄线所示,测得峰值频率为 16648.006 Hz,用(3)式计算得到被测距离为 0.9999204 m,与实际距离相差 80.6  $\mu\text{m}$ ,根据(9)式求得被测距离为 0.999998 m,与静止目标测量结果相差约为 2  $\mu\text{m}$ ,很大程度上消除了多普勒效应的影响。

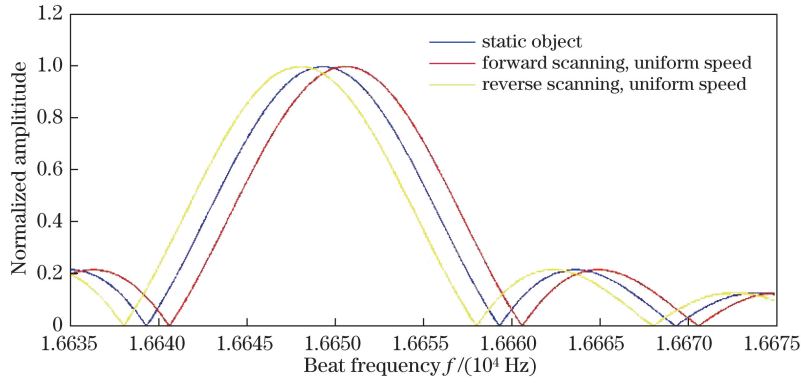


图 4 干涉信号的频谱图

Fig. 4 Spectrogram of interference signal

#### 4 漂移误差补偿实验

为了验证该方法的有效性,搭建了如图 5 所示的实验验证系统。实验所用光源为 Luna 公司的 PHOENIX™ 1400 可调谐激光器,最大调谐范围为 1515~1565 nm,光频变化速度可达 100 nm/s。通过上面的分析可知,为了减小在光频扫描周期内被测目标的漂移,应尽可能减小扫描周期。另外,系统的测距分辨率与光频扫描范围成反比,要想获得较高的测距分辨率就必须增大激光器的扫频范围。同时,提高扫描范围也意味着测量时间的增加,从而引入更大的漂移。

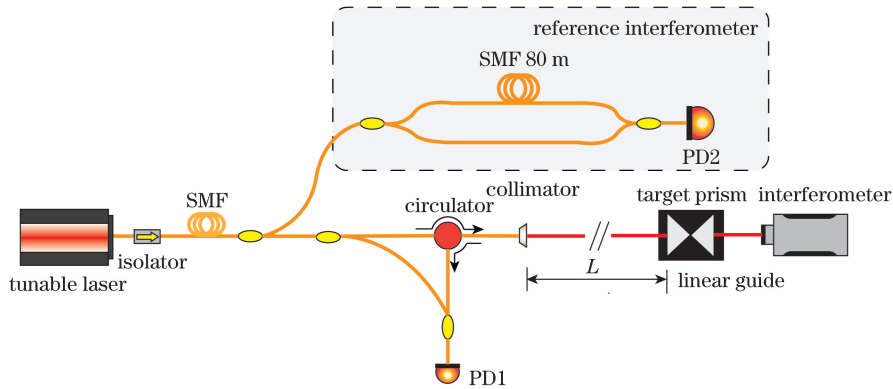


图 5 OFSI 绝对测距实验原理图

Fig. 5 Schematic of OFSI absolute distance measurement experiment principle

综合考虑,实验选择的光频扫描范围为 1 nm(1549~1550 nm),按三角波规律正反扫描,扫频速度为 50 nm/s,即扫描周期为 0.04 s。如图 5 所示,可调谐激光器发出的激光经过光纤隔离器、耦合器之后分成两路,分别进入该系统的两个部分。上面部分是辅助干涉部分,马赫-曾德尔式干涉仪由 80 m 单模光纤组成,干涉信号由光电探测器 PD2 接收,该部分的作用是产生辅助干涉信号作为时钟信号,对测量干涉信号进行等光频采样,消除可调谐激光器调频非线性的影响。下面是测量干涉部分,激光经过耦合器后分成两路,一路经过环行器、准直器入射到空间,照射到被测目标后返回并与另一路光在光电探测器 PD1 上形成干涉。

在进行绝对距离测量之前需要对参考距离进行校准,校准的方法与正常测距过程正好相反,即用被测距离解算参考距离。具体操作过程如下:将被测目标置于直线导轨的初始位置,设初始位置距离为  $l_m = l_0$ ,进行第一次测量,然后移动导轨,使被测距离变为  $l_m = l_0 + \Delta l$ ,进行第二次测量,其中  $\Delta l$  的值由干涉仪给出。设参考距离为  $l_r$ , 根据(3)式,对于  $l_m$  和  $l_r$  有:

$$l_m = \frac{cf_m}{2n_1\alpha}, \quad (12)$$

$$l_r = \frac{cf_r}{n_2\alpha}, \quad (13)$$

式中  $f_m$  和  $f_r$  分别表示测量和参考干涉光路的拍频,  $n_1$  和  $n_2$  分别表示测量光路部分与参考光路部分的折射



率,由(12)、(13)式可以得到:

$$\frac{n_1 l_0}{n_2 l_r} = \left( \frac{f_m}{2f_r} \right)_0, \tag{14}$$

$$\frac{n_1 (l_0 + \Delta l)}{n_2 l_r} = \left( \frac{f_m}{2f_r} \right)_1. \tag{15}$$

根据推导可以计算得到参考干涉光路的光程差为:

$$n_2 l_r = \frac{n_1 \Delta l}{\left( \frac{f_m}{2f_r} \right)_1 - \left( \frac{f_m}{2f_r} \right)_0}. \tag{16}$$

将被测目标安装在准直的直线导轨上,从初始位置起,每隔 50 mm 取一个点进行绝对距离测量,共取了 11 个测量位置点,每个位置进行 10 次重复测量。同时采用 Renishaw 公司的 XL-80 型激光干涉仪作为长度基准与测量结果进行比对。

### 5 实验结果分析与讨论

经过校准得到参考干涉光路的光程差为 117.838 m。在初始位置处,10 次重复测量结果如图 6 所示。

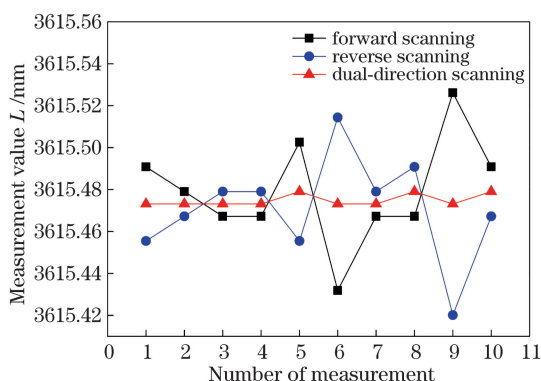


图 6 被测目标位于 3615.47 mm 处的 10 次重复测量结果

Fig. 6 10 times measurement result of the measured target at the distance of 3615.47 mm

图 6 中黑色曲线是通过正向扫描测量得到的距离,蓝色曲线是通过反向扫描测量得到的距离,红色曲线是采用上述正反扫描拍频平均方法得到的被测距离。经计算,单纯的正向扫描和反向扫描,单次测量的标准差为 21.51 μm,而经过正反扫描补偿之后减小为 2.85 μm。可以明显看出,在同一次实验中,正向扫描和反向扫描所得的测量距离值与真值的偏离方向正好相反。

从零点位置起,每隔 50 mm 取一个点,每个位置进行 10 次重复测量,测量结果如图 7 所示。黑色曲线表示各位置处单向扫描测量的标准差,红色曲线表示各位置处双向扫描补偿测量的标准差,经过补偿,最大

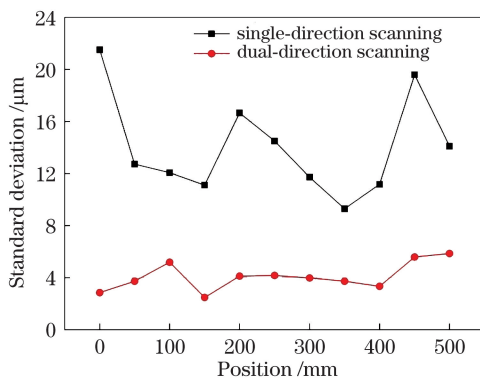


图 7 间隔 50 mm 各测量点处的测量标准差

Fig. 7 Standard deviation of measurement at different measurement positions with distance of 50 mm

的测量标准差不超过  $6 \mu\text{m}$ 。

以干涉仪的值作为基准评价该方法的测量精度,干涉仪  $0\sim 500 \text{ mm}$  处共有 11 个测量位置点,以初始位置为零点,用其他位置的测量值减去初始位置的测量值,得到相对位移值,用该位移值与干涉仪的测量值相减得到残余误差值,测量结果如图 8 所示。图 8(a)和(b)分别表示补偿前和补偿后的残余误差值,其中横坐标表示 10 个测量点,竖线表示残余误差的标准差,圆点表示 10 次测量平均值与干涉仪给出的参考值的差。由图 8 可以看出,补偿前残余误差的最大标准差为  $18.6 \mu\text{m}$ ,补偿后减小到  $5.6 \mu\text{m}$ ,相对于补偿前,在单次测量中也能够实现较高的测量精度。

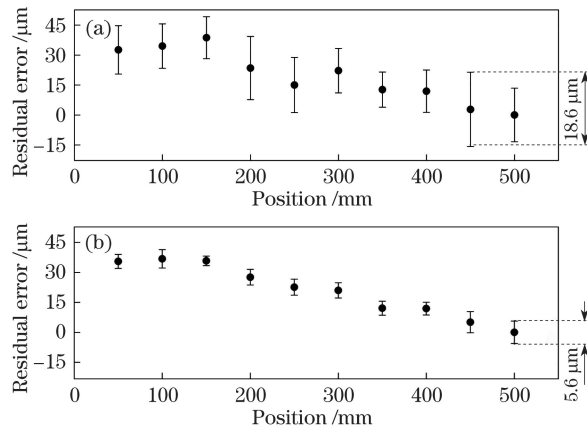


图 8 (a)补偿前与(b)补偿后系统的残余误差

Fig. 8 Residual error of the system (a) before and (b) after compensation

## 6 结 论

分析了 OFSI 测距基本原理,在此基础上重点讨论了光程差漂移对测距结果的影响,提出了基于单激光器三角波扫描漂移误差补偿方法。为了验证该方法的有效性,搭建了双干涉光路 OFSI 测距系统,通过等光频采样对干涉信号进行预处理,消除激光器扫频非线性对干涉信号频谱的影响;根据漂移误差放大系数与光频扫描方向一致的特性,利用求正反扫描拍频平均的方法,消除了漂移误差的影响。实验结果显示,在  $3.6 \text{ m}$  处,测量标准差由  $21.51 \mu\text{m}$  减小到  $2.85 \mu\text{m}$ 。以初始位置为起点,  $50 \text{ mm}$  为步进,在  $500 \text{ mm}$  移动距离内设置 11 个测量点,最大测量标准差不超过  $6 \mu\text{m}$ 。另外,以干涉仪测量值作为基准,残余误差的最大标准差由补偿前的  $18.6 \mu\text{m}$  减小到  $5.6 \mu\text{m}$ ,提高了测量精度。该方法不仅消除了光程差漂移误差,数据处理简便,而且有效地控制了系统成本。针对本研究内容,后期将对目标高频振动对干涉信号频谱的影响作进一步分析与讨论,进一步提高测距精度。

## 参 考 文 献

- [1] Fox-Murphy A F, Howell D F, Nickerson R B, *et al.* Frequency scanned interferometry (FSI): the basis of a survey system for ATLAS using fast automated remote interferometry[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 1996, 383(1): 229-237.
- [2] Coe P A, Howell D F, Nickerson R B. Frequency scanning interferometry in ATLAS: remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment[J]. Measurement Science & Technology, 2004, 15(11): 2175-2187.
- [3] Gibson S M, Coe P A, Mitra A, *et al.* Coordinate measurement in 2-D and 3-D geometries using frequency scanning interferometry[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2005, 43(7): 815-831.
- [4] Gibson S M, Dehchar S M, Horton K, *et al.* A novel method for ATLAS FSI alignment based on rapid, direct phase monitoring[C]. Hamburg: 11th International Workshop on Accelerator Alignment, 2012: 13-17.
- [5] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light[J]. Applied Optics, 1986, 25(17): 2976-2980.
- [6] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Absolute distance measurement by wavelength shift interferometry with a laser diode: some systematic error sources[J]. Applied Optics, 1987, 26(9): 1654-1660.

- [7] Suematsu M, Takeda M. Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(28): 4046-4055.
- [8] Ahn T J, Kim D Y. Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(13): 2394-2400.
- [9] Deng Zhongwen, Liu Zhigang, Tao Long, *et al.* Novel frequency scanned interferometry absolute distance measurement by tunable external-cavity diode laser[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(5): 104-109.  
邓忠文, 刘志刚, 陶龙, 等. 新型可调谐外腔半导体激光器光频扫描干涉测距方法[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(5): 104-109.
- [10] Deng Z, Liu Z, Li B, *et al.* Precision improvement in frequency-scanning interferometry based on suppressing nonlinear optical frequency sweeping[J]. *Optical Review*, 2015, 22(5): 724-730.
- [11] Liu Zhe, Liu Zhigang, Zheng Zhongwen, *et al.* Suppression of nonlinear frequency sweep in frequency sweeping interferometer based on order tracking technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0112003.  
刘哲, 刘志刚, 邓忠文, 等. 扫频干涉测距光频率非线性阶次跟踪抑制方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0112003.
- [12] Shi Guang, Zhang Fumin, Qu Xinghua, *et al.* Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184209.  
时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184209.
- [13] Bechstein K H, Fuchs W. Absolute interferometric distance measurements applying a variable synthetic wavelength[J]. *Journal of Optics*, 1998, 29(3): 179-182.
- [14] Schneider R, Thuermel P, Stockmann M. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 33-37.
- [15] Swinkels B L, Bhattacharya N, Braat J J M. Correcting movement errors in frequency-sweeping interferometry[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17): 2242-2244.
- [16] Yang H J, Nyberg S, Riles K. High-precision absolute distance measurement using dual-laser frequency scanned interferometry under realistic conditions[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2006, 575(3): 395-401.
- [17] Kakuma S, Katase Y. Frequency scanning interferometry immune to length drift using a pair of vertical-cavity surface-emitting laser diodes[J]. *Optical Review*, 2012, 19(6): 376-380.
- [18] Kakuma S. Frequency-modulated continuous-wave laser radar using dual vertical-cavity surface-emitting laser diodes for real-time measurements of distance and radial velocity[J]. *Optical Review*, 2017, 24(1): 39-46.
- [19] Martinez J J, Campbell M A, Warden M S, *et al.* Dual-sweep frequency scanning interferometry using four wave mixing[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2015, 27(7): 733-736.
- [20] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3681-3687.
- [21] Tao Long, Liu Zhigang, Lü Tao, *et al.* Drift error compensation method of frequency sweeping interferometer by consecutive forward and reverse optical frequency scanning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212002.  
陶龙, 刘志刚, 吕涛, 等. 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212002.