

# 正弦调频下大带宽激光调频连续波测距技术

史春钊, 张福民\*, 潘浩, 李雅婷, 曲兴华

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** 基于激光调频连续波(FMCW)测距的原理搭建了双光路 FMCW 测距系统,用正弦调频替代了传统的线性调频,提高了扫频速率。研究了正弦调频下的 FMCW 测距原理,推导了正弦扫描的重采样公式,提出了信号拼接的方法来增大扫描带宽,并通过正交调制的方法消除拼接误差。实验结果表明,使用正交调制的方法拼接等光频重采样校正的信号后,频谱分辨率可达  $127\ \mu\text{m}$ ,接近理论分辨率。在  $3.3\sim 4\ \text{m}$  的范围内,所提方法的结果与参考干涉仪的误差不超过  $203\ \mu\text{m}$ ,标准差小于  $194\ \mu\text{m}$ 。

**关键词** 测量; 调频连续波(FMCW); 正弦调频; 正交调制; 信号拼接

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1201002

## Distance Measurement Technique of Large Bandwidth Laser Frequency Modulated Continuous Wave Under Sinusoid Frequency Modulation

Shi Chunzhao, Zhang Fumin\*, Pan Hao, Li Yating, Qu Xinghua

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Based on the principle of distance measurement of laser frequency modulated continuous wave (FMCW), a distance measurement system of dual optical path FMCW is set up, which replaces the traditional linear frequency modulation with sinusoid frequency modulation so as to improve the sweep frequency. The principle of distance measurement of FMCW under sinusoid frequency modulation is also studied, the resampling formulas of sine sweep is derived, and the signal synthesis method to increase the sweep bandwidth and the quadrature modulation method to eliminate the stitching error are put forward. The experimental result shows that after the quadrature modulation method is used to splice the equal-light frequency resampling correction signal, the frequency resolution reaches to  $127\ \mu\text{m}$ , very close to the theoretical resolution. It is no more than  $203\ \mu\text{m}$  of the error and less than  $194\ \mu\text{m}$  of the standard deviation compared with the reference interferometer within the range between 3.3 and 4 meters.

**Key words** measurement; frequency modulated continuous wave (FMCW); sinusoidal frequency modulation; quadrature modulation; signal synthesis

**OCIS codes** 120.3180; 140.3518; 140.3600

## 1 引 言

工业现代化发展对大尺寸、高精度的绝对测量提出了更高的要求。激光测距具有远距离、高精度、抗干扰等优势,被广泛应用于航空、航天以及工业制造等领域<sup>[1-3]</sup>。常用的激光测距方法有脉冲法、相位法、干涉法等<sup>[4]</sup>。调频连续波(FMCW)测距技术属于激光干涉法测距的一种,它可以实现高精度、无合作、多目标的绝对式测距,成为研究热点之一<sup>[5]</sup>。

FMCW 测距技术通常将可调频激光器发出的频率调制的激光与目标点的回波产生拍频,通过对拍频信号进行频谱分析得到目标距离。目前可调频激光器主要通过线性调频来实现测距目的,测距精度主要受激光器调频线性度的影响,然而可调频激光器发出的调频激光存在非线性误差。故调频激光非线性的校正成为提高测距精度的主要研究方法,国内外研究者对此进行了相关研究。Schneider 等<sup>[6]</sup>通过校准干涉信号对激光器的调频非线性进行

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-06-27; 录用日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51675380)、“光电测试技术”北京市重点实验室开放课题(GDKF2015007)

\* E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

了补偿,在带宽为 15 GHz 时得到了 0.5 mm 的分辨力;吴映等<sup>[7]</sup>使用自零差探测技术得到了相对于理想线性调频的误差,并将其反馈到激光器的调制电流上,实现了 10 GHz 的高线性度频率扫描。虽然对光源的反馈调节可以在一定范围内校正调频非线性,但是用于光源反馈系统的设计较为复杂、成本较高,并且可以校正的频率范围较小,因此目前校正调频非线性多采用等光频重采样的方式。Moore 等<sup>[8]</sup>采用等光频采样消除了非线性误差,并进一步分析了等光频采样的两个误差来源——干涉测量臂与快速扫描的不匹配以及硬件采集的延时,通过在测量臂前添加匹配长度的延迟线可以使上述两个误差减小为二阶误差。国内学者对 FMCW 的研究也有一些进展,如时光<sup>[5]</sup>采用等光频重采样的方式校正了调频非线性误差,搭建了实验模型;孟祥松等<sup>[9]</sup>采用信号拼接的方式拓展了扫描带宽,提高了测距分辨力;姚艳南等<sup>[10]</sup>提出了基于硬件的等光频原理,得到了更高的测距分辨力与稳定性;潘浩等<sup>[11-13]</sup>分析了色散对等光频重采样测距精度的影响,对色散进行了校正,并将多重信号分类(MUSIC)算法用于估计均方根误差,提出了精度评定方法。许新科等<sup>[14-16]</sup>研究了振动、色散等因素对 FMCW 的影响。

等光频重采样通常用于校正线性调频的非线性误差,或将正弦调频转化为线性调频来测量距离。本文使用信号发生器产生一个频率较高的正弦信号,将其输入到调频激光器的波长精调接口,使得可调频激光器发出频率正弦变化的调频激光,有效提高了调频速度。虽然外部输入信号可以提高调频速度,但是由于可调频激光器接受外部电压信号的范围有限,其调频带宽较小,会降低测量分辨力,影响测距精度。拓展扫描带宽的方式主要是测距信号的拼接<sup>[9,17]</sup>,直接对两个测距信号进行拼接会由于相位跳变产生拼接误差。因此,本文提出了一种正交调制的技术将待拼接的两个测距信号归一化处理以消除相位跳变,减小了拼接误差,提高了拼接精度,有效拓展了扫描带宽。

## 2 基本原理

实验装置如图 1 所示,信号发生器产生正弦电压信号,信号输入到可调频激光器的波长精调接口中,故可调频激光器发出的激光频率呈正弦方式变化;光纤光路分成测量光纤光路和参考光纤光路,分别用于产生测距信号和校正测距信号的非线性,其中测量光纤光路使用一个 90°正交调制器件,产生了相位相差 90°的两路测量信号。

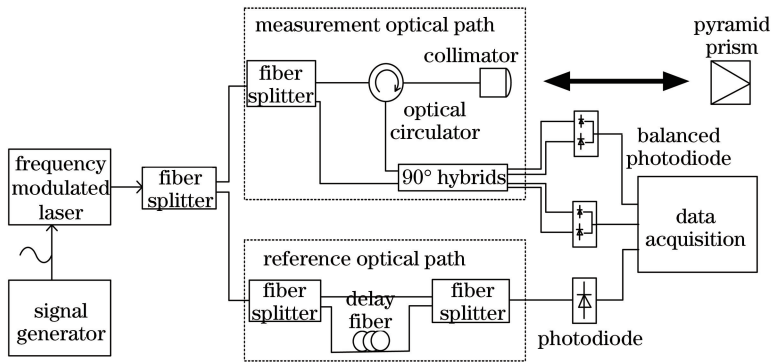


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

图 2 所示为波长精调接口内部调节输出激光波长的原理示意图,外腔式可调谐激光器输出激光的波长主要取决于有效折射率及谐振腔长<sup>[5]</sup>。波长精调接口调节输出激光波长的方式是通过外部输入的电压信号使反射镜背面的压电陶瓷(PZT)发生伸缩变化,故反射镜与光栅之间的间距发生变化,从而使输出波长发生变化。在其他条件不变的情况下,输出激光波长与反射镜及光栅之间的长度成正比,该长度的变化量又与PZT的电压成正比,故输出激光

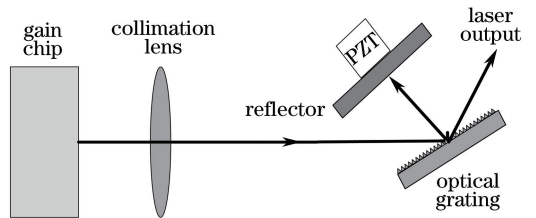


图 2 波长精调接口工作原理示意图

Fig. 2 Schematic of wavelength fine tuning interface  
 波长取决于输入到波长精调接口的电压大小。由于

PZT 耐受电压有限,外部输入电压范围有限,故这一方法输出的激光带宽较小。

## 2.1 基于等光频重采样的正弦频率扫描的测距原理

可调频激光器受到正弦电信号的调制,发出的激光频率以正弦形式变化,故可调频激光器发出的激光频率随时间变化的表达式为

$$f_L(t) = f_0 + \frac{B}{2} \sin(2\pi ft + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: $f_0$  为初始频率; $B$  为调频带宽; $f$  为正弦变化的频率; $t$  为时间; $\varphi_0$  为正弦变化的初相位。由激光频率随时间变化的表达式可以得到激光相位随时间变化的表达式

$$\varphi_L(t) = 2\pi \int_0^t f_L(t) dt = 2\pi f_0 t - \frac{B}{2f} \cos(2\pi ft + \varphi_0). \quad (2)$$

由(2)式可以得到原始激光信号的表达式

$$E_L(t) = a_1(t) \times \cos\left\{2\pi \left[2\pi f_0 t - \frac{B}{2f} \cos(2\pi ft + \varphi_0)\right] + \varphi_{L0}\right\}, \quad (3)$$

式中: $a_1(t)$  为原始激光信号的振幅,由于可调频激光器功率不能保证绝对恒定以及光纤的损耗, $a_1(t)$  是一个随时间变化的变量; $\varphi_{L0}$  为原始激光信号的初相位。可调频激光器发出的原始激光信号进入测量光路,经过光环行器、准直器,由角锥棱镜反射沿原路返回,由此产生的回波信号的表达式为

$$E_s(t) = a_2(t) \times \cos\left\{2\pi \left\{2\pi f_0(t - \tau_m) - \frac{B}{2f} \cos[2\pi f(t - \tau_m) + \varphi_0]\right\} + \varphi_{L0}\right\}, \quad (4)$$

式中: $a_2(t)$  为回波信号的振幅,由于光纤及空间光路的损耗, $a_2(t)$  也是一个随时间变化的变量; $\tau_m$  为激光经过待测距离产生的延时。原始激光信号与回波信号的拍频可表示为

$$E_m(t) = a(t) \times E_1(t) \times E_2(t), \quad (5)$$

$$E_1(t) = \cos\left\{2\pi \tau_m \left[\frac{B \sin(\pi f \tau_m) \times \sin(2\pi ft - \pi f \tau_m + \varphi_0)}{f \tau_m} + 2\pi f_0\right]\right\}, \quad (6)$$

$$E_2(t) = \cos\left\{2\pi \left[2\pi f_0 t - \pi f \tau_m - \frac{B}{2f} \cos(\pi f \tau_m) \times \cos(2\pi ft - \pi f \tau_m + \varphi_0)\right] + \varphi_{L0}\right\}, \quad (7)$$

式中: $a(t)$  为测量光路拍频信号的振幅。 $E_2(t)$  的频率主要取决于  $f_0$ , 然而  $f_0$  是太赫兹级的频率,远大于光电探测器兆赫兹级的探测能力,故  $E_2(t)$  这一项在光探测器中并不能形成正弦形式的波动,只能形成一定强度的能量信号。故光电探测器探测到的拍频信号为

$$I_m(t) = a_m(t) \cos\left\{2\pi \tau_m \left[\frac{B \sin(\pi f \tau_m) \times \sin(2\pi ft - \pi f \tau_m + \varphi_0)}{f \tau_m} + 2\pi f_0\right]\right\}, \quad (8)$$

式中: $a_m(t)$  为光电探测器探测到的测量光路拍频信号的振幅。同理,可调频激光器发出的原始激光信号进入参考光路后分成两路,一路经过固定长度的参考光纤后与另一路产生拍频,拍频进入光电探测器后产生的电信号可表示为

$$I_r(t) = a_r(t) \times \cos\left\{2\pi \tau_r \left[\frac{B \sin(\pi f \tau_r) \times \sin(2\pi ft - \pi f \tau_r + \varphi_0)}{f \tau_r} + 2\pi f_0\right]\right\}, \quad (9)$$

式中: $a_r(t)$  为光电探测器探测到的参考光路拍频信号的振幅; $\tau_r$  为激光经过待测距离产生的延时。

需要参考光路信号对测量光路信号进行等光频重采样,并且两个光路的信号频率主要取决于  $\tau_m$  和  $\tau_r$ , 故为了满足奈奎斯特采样定律,需要  $2\tau_m < \tau_r$ 。考虑到光纤色散的影响,实验中选用的参考光纤长度不宜超过 100 m, 折射率小于 1.5, 正弦信号的频率最大为 1 kHz, 故可以得到  $\pi f \tau_m < \pi f \tau_r < 1.57 \times 10^{-3}$ , 则  $\sin(\pi f \tau_m) \approx \pi f \tau_m$ ,  $\sin(\pi f \tau_r) \approx \pi f \tau_r$ ,  $\sin(2\pi ft - \pi f \tau_m + \varphi_0) \approx \sin(2\pi ft + \varphi_0)$ ,  $\sin(2\pi ft - \pi f \tau_r + \varphi_0) \approx \sin(2\pi ft + \varphi_0)$ 。令  $\varphi(t) =$

$B\pi \times \sin(2\pi ft + \varphi_0) + 2\pi f_0$ , 则可将(8)式和(9)式分别近似化简为

$$I_m(t) = a_m(t) \times \cos[2\pi \tau_m \varphi(t)], \quad (10)$$

$$I_r(t) = a_r(t) \times \cos[2\pi \tau_r \varphi(t)]. \quad (11)$$

利用参考光路拍频信号的峰谷值对测量光路拍频信号进行等光频重采样, 即当  $2\pi \tau_r \varphi(t) = k\pi (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$  时, 对测量光路拍频信号进行重采样, 得到重采样后的信号表达式为

$$I_1(k) = a(k) \times \cos\left(2\pi \times \frac{\tau_m}{2\tau_r} k\right), \quad (12)$$

式中: $a(k)$  为重采样后信号的振幅; $k$  为重采样点

数。由(12)式可以得到等光频重采样后信号的频率为

$$f_m = \frac{\tau_m}{2\tau_r} \quad (13)$$

根据(13)式可以计算得到待测距离为

$$R_m = f_m R_r n, \quad (14)$$

式中: $R_r$  为参考光纤的长度; $n$  为参考光纤的折射率。

上述理论推导证明了正弦扫描的 FMCW 测距系统可以通过等光频重采样校正扫描的非线性,实现距离测量。但是由于可调频激光器接受外界输入的电压范围有限,其正弦扫描的带宽有限。为了实现高精度的 FMCW 测量,需要对多段测量信号进行拼接来增大扫描带宽。

### 2.2 基于正交调制的拼接原理

信号拼接采用前一个信号的最后一个峰值与后一个信号的第一个峰值进行拼接,这种拼接方法会因信号幅度的不同而产生相位跳变,如图 3 所示。为了解决拼接带来的相位跳变问题,采用正交调制的原理对信号进行归一化处理。

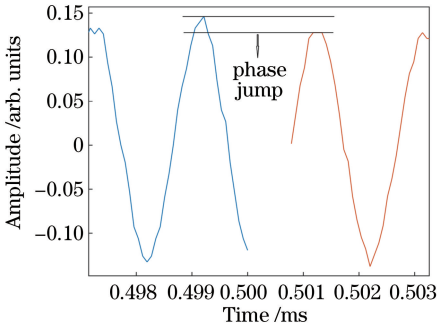


图 3 信号拼接中的相位跳变

Fig. 3 Phase jump in signal synthesis

(12)式为重采样后的信号表达式,对其相位平移  $90^\circ$  得到的信号为

$$I_2(t) = a(t) \times \sin\left(2\pi \times \frac{\tau_m}{2\tau_r} k\right). \quad (15)$$

结合(12)式和(15)式得到归一化后的重采样信号为

$$I(t) = I_1(t) / \sqrt{I_1^2(t) + I_2^2(t)} = \cos\left(2\pi \times \frac{\tau_m}{2\tau_r} k\right). \quad (16)$$

由(16)式可知,重采样信号已不存在振幅调制。

## 3 实验结果及分析

按照图 1 所示的实验装置搭建光路,信号发生器产生频率和幅度固定的正弦波,正弦波输入到可调频激光器的控制面板上,可调频激光器按照正弦

信号的调制发出频率正弦变化的连续波激光,该激光分成两束,一束进入测量光路分成两路,其中一路通过光环行器、准直器,并由角锥棱镜反射沿原路返回,经过光环行器进入  $90^\circ$  正交调制器件;另一路直接进入  $90^\circ$  正交调制器件,两路光形成测量拍频信号,测量拍频信号由  $90^\circ$  正交调制器件分成相位相差  $90^\circ$  的两路测量信号,分别由光电探测器探测。可调频激光器发出的另一束激光进入参考光路后分成两路,其中一路经过参考光纤进入光纤耦合器,另一路直接进入光纤耦合器,两路光形成参考拍频信号,参考拍频信号由光电探测器探测。两路测量信号和一路参考信号被示波器同时采集,参考信号分别对两路测量信号进行等光频重采样,采用正交调制的方法将测量信号归一化,并进行拼接等后续处理。实验中可调频激光器选用美国 Newfocus 公司生产的型号为 TLB-6728 的外腔式可调频激光器,其最大的线性调频速度为  $20 \text{ nm/s}$ ,无法满足快速测量的需求。因此,可以利用信号发生器输入一个电压信号到可调频激光器的波长精调接口,此时调频速度取决于信号发生器产生的电压信号的频率。信号发生器的幅度峰值设置为  $1.2 \text{ V}$ ,对应于可调频激光器的带宽为  $12 \text{ GHz}$ ,信号发生器的频率为  $1 \text{ kHz}$ ,相当于平均扫描速度为  $192 \text{ nm/s}$ ,约为可调频激光器线性扫描最高扫描速度的  $10$  倍。参考光纤的长度为  $55.05 \text{ m}$ ,折射率为  $1.467$ , $90^\circ$  正交调制器件选用法国 Klyia 公司生产的型号为 COH28-00176 的器件。

实验中取激光频率正弦变化的半个周期作为一组测距信号,为了得到实际带宽,取参考拍频信号进行希尔伯特变换,然后求变换后信号的相位,解卷积后得到激光频率随时间的变化关系如图 4 所示,其实际扫描带宽也为  $12 \text{ GHz}$ 。

实验中一组测量信号的带宽为  $12 \text{ GHz}$ ,根据公式  $\Delta R = c/2n'B$  可以得到理论分辨力  $\Delta R =$

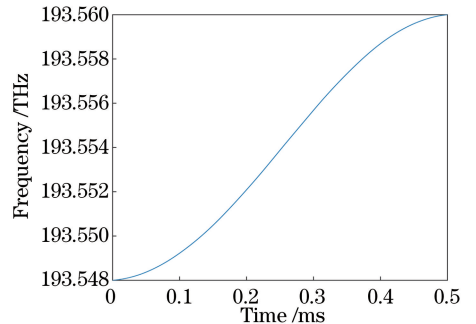


图 4 激光频率随时间的变化关系

Fig. 4 Laser frequency changed with time

12.5 mm, 其中  $c$  为光速,  $n'$  为空气折射率, 这里取 1,  $B$  为信号带宽。对等光频重采样后的一组测距信号进行快速傅里叶变换, 得到其频谱图如图 5 所示, 其频谱分辨率  $\Delta R = 12.6$  mm, 接近理论分辨率。

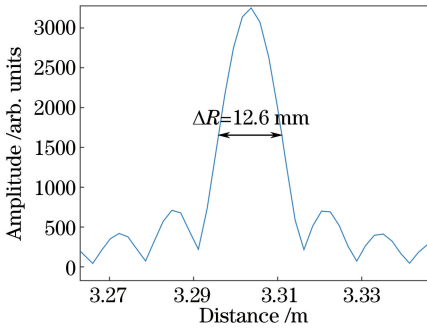


图 5 重采样后测距信号的频谱图  
Fig. 5 Frequency spectrogram of measurement signal after resample

虽然等光频重采样校正了频率非线性, 并且得到了效果较好的频谱图, 但是受限于可调频激光器输入电压的范围, 即激光频率带宽有限, 得到的测距分辨率过大, 无法应用于 FMCW 测距。可以采用信号拼接方法来增大带宽, 采用 2.2 节所述的方法对测量信号进行归一化处理, 结果如图 6 所示。对比于图 3 中未进行归一化的测量信号, 图 6 所示的测量信号已经基本不存在相位跳变, 可以进行无相位跳变的信号拼接。为了说明归一化对信号拼接的作用, 将未归一化的信号直接拼接与归一化后的信号拼接的频谱图进行对比, 如图 7 所示。可以看出, 未归一化的信号直接拼接得到的频谱图无法分辨测距值。

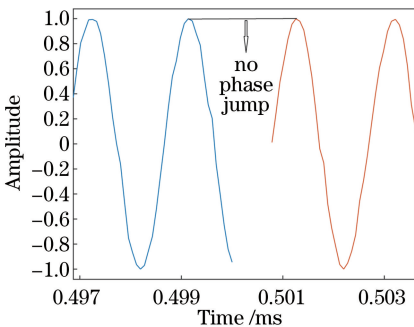


图 6 归一化后的测量信号  
Fig. 6 Normalized measurement signal

实验中对 100 组归一化后的测量信号进行拼接, 拼接后信号的带宽为 1200 GHz, 理论分辨率为  $125 \mu\text{m}$ 。对拼接后的信号进行快速傅里叶变换得到其频谱图如图 8 所示, 得到其频谱分辨率为  $127 \mu\text{m}$ , 接近理论分辨率, 说明这种拼接方法几乎没有引入相

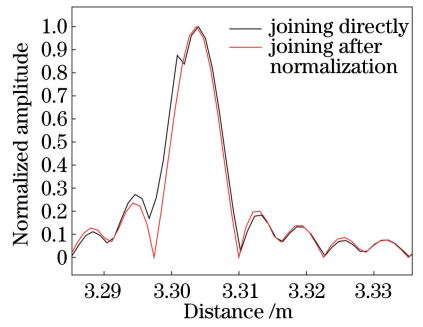


图 7 直接拼接与归一化后拼接的频谱图  
Fig. 7 Frequency spectrograms of joining directly and joining after normalization

位跳变的误差, 验证了本文方法的可行性。

目标角锥棱镜放置在 3.3~4 m 之间, 每隔约 100 mm 进行一个位置的测量, 一个测量位置进行若干次测量, 并将 100 组信号归一化处理后进行拼接作为一组测量信号。同一位置的多组测量信号求平均值作为这一位置的测距值, 并与英国 Renishaw 公司生产的型号为 XL-80 的干涉仪进行对比得到测距误差; 计算同一位置的多组测量信号表征其精密度。实验结果如图 9 所示, 在 3.4027 m 处参考干涉仪的最大误差为  $203 \mu\text{m}$ , 在 3.3037 m 处最大标准差为  $194 \mu\text{m}$ 。

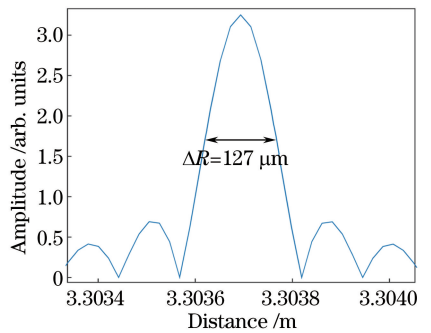


图 8 拼接信号的频谱图  
Fig. 8 Frequency spectrogram of signal synthesis

## 4 结 论

基于等光频重采样的原理搭建了双光路 FMCW 测距装置, 使用正弦调频波作为输入信号。正弦信号扫描无法直接应用于 FMCW 测距, 采用了等光频重采样的方式将其转化为线性调频。由于正弦调频的带宽有限, 采用了基于正交调制的拼接方法, 增大了实际带宽, 提高了测距分辨率。在正弦调频速度为 1 kHz、带宽为 12 GHz 时, 对 3.3~4 m 处的目标角锥棱镜进行了测量, 使用等光频重采样方式处理测量信号, 并基于正交调制的 100 倍信号

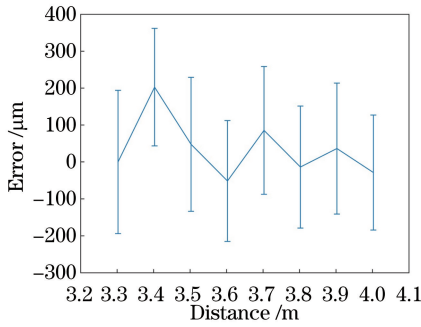


图 9 不同测量位置处的误差与标准差

Fig. 9 Error and standard deviation at different distance

拼接方式,实现了 127 μm 的频谱分辨率,接近于理论分辨率,测量结果与参考干涉仪的最大误差为 203 μm,最大标准差为 194 μm。实验结果验证了所提理论的可行性,为正弦 FMCW 快速、大带宽测距提供了参考。

### 参 考 文 献

[1] Ye S H, Wang Z, Qu X H. Prospect of precision measurement technology [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(3): 262-263.  
叶声华, 王仲, 曲兴华. 精密测试技术展望[J]. 中国机械工程, 2000, 11(3): 262-263.

[2] Gao F, Guo W Z, Song Q Y, *et al.* Current development of heavy-duty manufacturing equipments [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 92-107.  
高峰, 郭为忠, 宋清玉, 等. 重型制造装备国内外研究与发展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 92-107.

[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 and Lasers in Engineering, 2005, 43(7): 815-831.

[4] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, *et al.* High-accuracy long-distance measurements in air with a frequency comb laser [J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 1982-1984.

[5] Shi G. Improvement spatial resolution of FMCW laser ranging system and application in spherical coordinate measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.  
时光. 提高 FMCW 激光测距分辨率方法及在球坐标测量中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2014.

[6] Schneider R, Thuermel P, Stockmann M. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar [J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 33-37.

[7] Wu Y, Chen D J, Sun Y G, *et al.* Research on

optical chirp linearization technique of semiconductor lasers by an optoelectronic feedback loop [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0902001.  
吴映, 陈迪俊, 孙延光, 等. 半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902001.

[8] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13139-13149.

[9] Meng X S, Zhang F M, Qu X H. High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave laser ranging [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 230601.  
孟祥松, 张福民, 曲兴华. 基于重采样技术的调频连续波激光绝对测距高精度及快速测量方法研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(23): 230601.

[10] Yao Y N, Zhang F M, Qu X H. Hardware-based equispaced-phase resampling nonlinearity correction algorithm and spectral analysis method [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212003.  
姚艳南, 张福民, 曲兴华. 基于硬件的等光频间隔采样及频谱分析方法 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212003.

[11] Pan H, Qu X H, Shi C Z, *et al.* Precision evaluation method of measuring frequency modulated continuous wave laser distance [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 090201.  
潘浩, 曲兴华, 史春钊, 等. 激光调频连续波测距的精度评定方法研究 [J]. 物理学报, 2018, 67(9): 090201.

[12] Pan H, Zhang F M, Shi C Z, *et al.* High-precision frequency estimation for frequency modulated continuous wave laser ranging using the multiple signal classification method [J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6956-6961.

[13] Pan H, Qu X H, Shi C Z, *et al.* Resolution-enhancement and sampling error correction based on molecular absorption line in frequency scanning interferometry [J]. Optics Communications, 2018, 416: 214-220.

[14] Xu X K. Research on key technologies of laser frequency scanning interference absolute distance measurement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.  
许新科. 激光扫频干涉绝对距离测量关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[15] Xu X K, Liu G D, Liu B G, *et al.* Research on the fiber dispersion and compensation in large-scale high-resolution broadband frequency-modulated continuous

- wave laser measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 074102.
- [16] Liu G D, Xu X K, Liu B G, *et al.* Dispersion compensation method based on focus definition evaluation functions for high-resolution laser frequency scanning interference measurement [J]. *Optics Communications*, 2017, 386: 57-64.
- [17] Shi G, Wang W. Single laser complex method to improve the resolution of FMCW laserranging [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(3): 363-367.
- 时光, 王文. 单激光器复用法提高调频连续波激光测距分辨率 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(3): 363-367.