

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

孟祥松 张福民 曲兴华

High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave laser ranging

Meng Xiang-Song Zhang Fu-Min Qu Xing-Hua

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 230601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.230601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.230601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机载多脉冲激光测距特性及其不确定度研究

[Ranging characteristic and uncertainty of airborne multi-pulse laser](#)

物理学报.2015, 64(12): 120601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120601>

基于二次偏振调制的变频测距方法与系统实现

[Variable frequency range finding technology based on double polarization modulation method and system implementation](#)

物理学报.2014, 63(10): 100602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100602>

一种光学频率梳绝对测距的新方法

[A new method of measuring absolute distance by using optical frequency comb](#)

物理学报.2014, 63(10): 100601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100601>

透射光栅谱仪测谱不确定度分析

[Uncertainty analysis of the measured spectrum obtained using transmission grating spectrometer](#)

物理学报.2013, 62(17): 170602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170602>

飞秒光频梳的任意长绝对测距

[Arbitrary and absolute length measurement based on femtosecond optical frequency comb](#)

物理学报.2013, 62(17): 170603 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170603>

# 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\*

孟祥松 张福民<sup>†</sup> 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)

(2015年7月6日收到; 2015年8月11日收到修改稿)

调频连续波激光测距方法可以实现高精度的大尺寸绝对距离测量, 且测量过程无需合作目标, 在大空间坐标精密测量领域有很高的研究价值. 而如何提高测量分辨率和实用化一直是近年来调频连续波激光绝对测距研究的热点. 本文研究了调频连续波激光测距的原理, 基于双光路调频连续波激光测距系统, 提出了通过信号拼接提高测量分辨率的信号处理优化方案, 该方案可以提高测距分辨率, 且可以降低对激光器的性能要求; 提出了可实现高速测量的简易测量方法. 设计加工了双光路光纤调频连续波激光测距系统, 利用该系统进行了测距分辨率及测距误差标定实验, 实验结果表明: 优化方案可以有效地提高测量分辨率和测量效率, 在26 m测量范围内, 测距分辨率达到了50  $\mu\text{m}$ , 测距误差不超过100  $\mu\text{m}$ ; 快速测量方案有较高实用价值.

**关键词:** 连续激光调频, 绝对测距, 干涉测量

**PACS:** 06.20.Dk, 06.30.Bp, 42.25.Hz, 42.30.Lr

**DOI:** 10.7498/aps.64.230601

## 1 引言

自激光器诞生以来, 激光测距技术得到迅速发展, 并广泛应用于科学研究、计量、工业测量、航空航天和测绘等领域, 常见的激光测距方法有激光干涉法、脉冲法、相位法、调频连续波法等. 干涉法有极高的精度和分辨率, 由其衍生的激光跟踪测量系统在空间坐标测量方面占据重要位置, 但其测量尺度和需要合作目标限制了应用范围. 脉冲法和相位法激光测距技术无需合作目标、测量范围大, 可以满足大尺寸测量的需求, 但其测量精度较低, 不能满足精密测量要求. 连续激光调频测距技术是近些年发展起来的一种新型激光测距技术, 可进行无合作目标测量、测量范围大、精度高、速度快, 具有显著的优点, 弥补了上述其他方式的不足, 显示了良好的应用前景. 但该方法自身还有许多科学研究问题和关键技术尚待解决, 如实现对连续激光器稳定

的大带宽、高线性度频率调制等, 同时也有待拓展它的功能、发现更多的应用领域, 如构成大空间坐标测量系统, 获取研究信息和测量数据等<sup>[1-6]</sup>.

目前对于调频连续波激光测距的研究主要还是实验研究阶段, 研究热点集中在反馈光源的设计, 对于大尺寸的测距范围(几米到十几米的范围), 高分辨率测量还未进行深入的研究和详细的实验<sup>[7,8]</sup>. 国内外对于提高调频连续波激光测距分辨率的研究有两个热点方向, 一是提高激光器的性能, 诸如调谐线性度、调制带宽、线宽等; 二是通过光频梳或者重采样技术规避或补偿由于激光光源代入的系统误差. 前者由于受到固体激光器跳模和反馈控制结构本身精度的限制已达到瓶颈, 通过此类方法达到的分辨率精度不高. 2009年Naresh搭建了调频连续波激光测距光路, 设计了半导体激光光源反馈控制系统, 测距分辨率为1.5 mm<sup>[9]</sup>. 2011年, Iiyama利用单模垂直腔面发射激光器搭建了测距系统, 空间测距分辨率达到了250  $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>, 测距

\* 国家自然科学基金(批准号: 51327006, 51275350)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准编号: 20120032130002)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

范围为 1 m. 通过新技术或者对调谐激光器进行补偿的方法, 如使用光学频率梳对激光光源扫描波长锁定, 或重采样技术规避或补偿由于激光光源代入的系统误差, 已经取得了较大进展, 如 2009 年 Roos 利用光纤自混频技术对光源系统进行了改进, 并且对距离 1.5 m 的目标进行测量, 测距分辨率达到了 31  $\mu\text{m}$  [11]. 2013 年 Baumann 利用学频率梳对激光器的光频进行校正, 将测距分辨率提高到了 130  $\mu\text{m}$ , 重复精度达到了 6 nm [12]. 本课题组于 2012 年开始进行提高调频连续波激光测距系统分辨率的研究, 采用重采样的方法对测量分辨率进行优化, 取得了一定的进展 [13,14], 但是大范围扫频带来的频率调制非线性依然是一个未解决的难题, 本文开展研究, 解决这一问题.

为了提高调频连续波激光测距的分辨率、扩大测距范围, 以满足大尺寸范围精密测量的需求, 本文对重采样方法进行深入研究. 基于双光路调频连续波测距系统, 本文提出了一种对重采样的信号进行拼接处理的方法, 信号拼接可大大提高测距分辨

率以及降低对激光器调谐带宽的要求, 且根据双光路调频连续波测距系统的特性, 提出了简易快速的测量数据处理方案, 集成方便紧凑的测距系统.

## 2 测距原理及提高测距分辨率方案

双光路调频连续波激光测距系统的原理图如图 1 所示. 系统光源为可调谐激光器, 发射激光为线性调制激光, 其光频按照周期性三角波的规律变化, 如图 2 所示, 纵坐标为光频, 横坐标为时间. 该系统的测量干涉光路(下半部分)和辅助干涉光路(上半部分)均为马赫曾德尔干涉光路, 辅助干涉光路可与测量光路同光源同时工作, 且光程差远大于测量光路, 因此可对测量光路获得的干涉信号进行等光频间隔采样, 从而补偿光源频率调制的非线性引入的测量误差. 对多次不同测量的等光频间隔采样的信号进行拼接可实现对激光光源调制带宽的拓展, 从而提高测距分辨率.

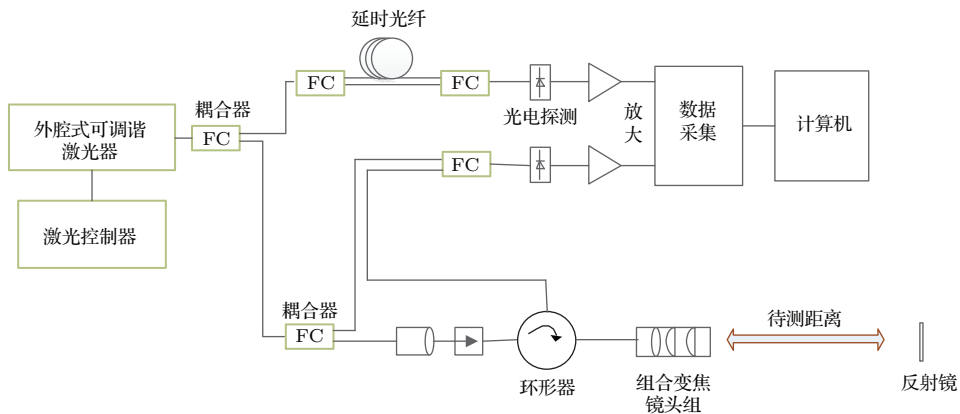


图 1 双光路调频连续波激光测距系统原理图

Fig. 1. Diagram of dual interferometry FMCW laser ranging system.

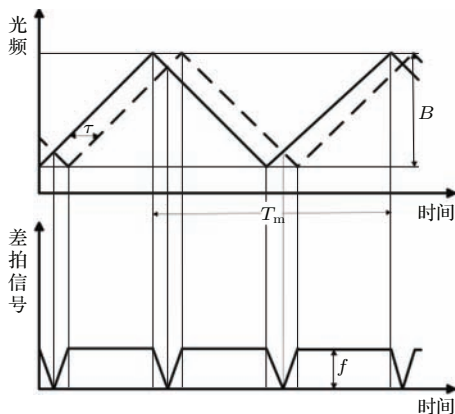


图 2 调频连续波激光测距工作原理图

Fig. 2. Waveform of FMCW laser ranging system.

在测量干涉光路中, 激光器发射的调制激光经过分束器分为两束, 一束通过环形器之后进行准直整形作为发射光源(测量臂), 回波信号再经准直镜头接收, 经环形器后跟另一束激光通过耦合器合为一束, 在光电探测器表面发生干涉. 干涉信号的频率  $f$  可由图 2 简单推导得出.

$$f = 2 \cdot \frac{B \cdot \text{OPD}}{T_m \cdot c} = 4 \cdot \frac{n \cdot B \cdot z}{T_m \cdot c}, \quad (1)$$

其中  $n$  为折射率,  $B$  为激光器调制范围,  $\text{OPD}$  为两束光的光程差,  $z$  为被测目标的距离,  $T_m$  为激光器的调制周期,  $c$  为真空中光速.

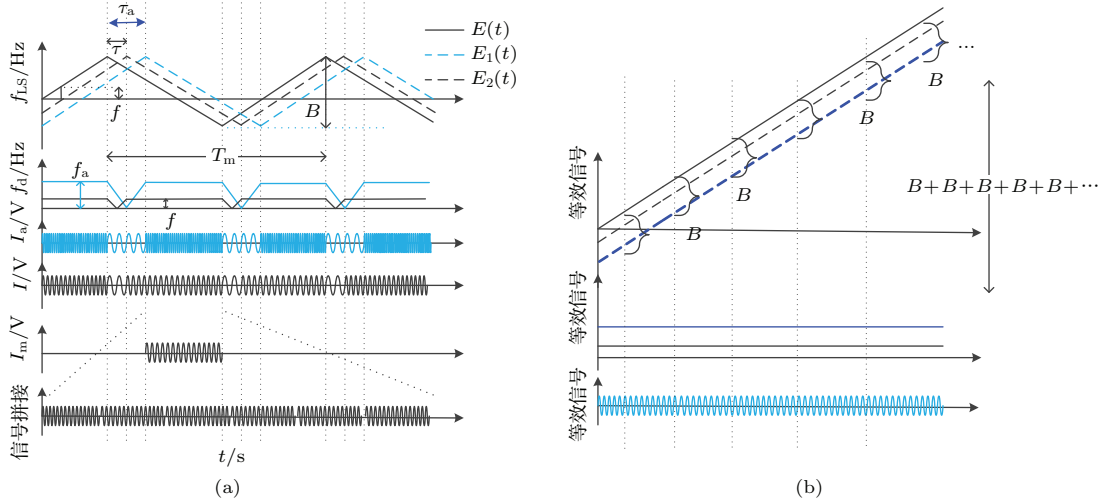


图3 拼接重采样信号原理图

Fig. 3. Resample and splice of the signal process.

由(1)式可以得出被测目标的距离  $z$  为

$$z = \frac{1}{2 \cdot n} \cdot \text{OPD} = \frac{T_m \cdot c}{4 \cdot n \cdot B} \cdot f. \quad (2)$$

在理想情况下, 可以推导得出距离分辨率为

$$\delta_z = \frac{c}{2nB}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出, 在理想情况下测距分辨率仅由激光器的调制范围  $B$  决定, 且理论测距分辨率的值跟  $B$  成反比, 即理论上, 提高激光光源的调制范围  $B$  可以提高理论测距分辨率, 经计算分析可得出, 以中心波长为 1550 nm 的调谐激光器为系统光源, 实现 30  $\mu\text{m}$  的测距分辨率需要激光器的调制带宽约为 40 nm, 并且需要在整个调制过程激光器无跳模且频率随时间严格线性变化, 因为实际测量过程中, 测距分辨率取决于测量干涉信号频谱的半高全宽值, 而实现这些要求在现有的半导体激光器技术上代价非常昂贵. 等光频间隔采样过程可较好的补偿由于调谐的非线性引入的测量误差, 其原理如下.

调谐激光器发射激光的电场方程可定义为

$$E(t) = E_0 \left\{ \exp \left[ j \left( 2\pi \int_0^t \nu(u) du + \varphi_0 \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

其中  $E_0$  为电场强度,  $\varphi_0$  为光源的初始相位 ( $t=0$ ),  $\nu(u)$  为激光在  $u$  时刻的瞬时频率. 则经过简单推导可得测量干涉信号的表达式:

$$I(t) = \eta E_0^2 + \eta E_1^2 + 2\eta E_0 E_1 \cos(2\pi\nu(t)\tau), \quad (5)$$

其中  $\eta$  为环境对光强的影响系数,  $E_1$  为测量臂回波信号的电场强度,  $\tau$  为图2所示在测量光路的两臂信号由于光程差带来的时间差值.

同理可得, 辅助干涉光路的干涉信号表达式:

$$I_a(t) = \eta E_0^2 + \eta E_2^2 + 2\eta E_0 E_2 \cos(2\pi\nu(t)\tau_a), \quad (6)$$

式中  $\tau_a$  为辅助测量光路对应的两臂时间延迟,  $E_2$  为辅助测量光路光纤延迟臂的电场强度, 其余参数与(4)式一样.

系统设计使得  $\tau_a > 2\tau$ , 因此将辅助干涉光路的拍频信号  $I_a(t)$  作为时钟信号, 对测量光路拍频信号进行采样, 则其采样间隔为  $\Delta\nu = (2\tau_a)^{-1}$ , 得到的重采样信号为等光频采样信号, 推导可得其表达式:

$$I_m(\nu) = \eta E_0^2 + \eta E_1^2 + 2\eta E_0 E_1 \sum_{n=k}^N \cos(2\pi\tau_m\nu) \times \delta(\nu - n\Delta\nu), \quad (7)$$

其中  $I_m(\nu)$  为测量光路拍频信号的强度,  $\tau_m$  为测量光路光程差带来的时间差,  $k = 2\nu(t_0)\tau_a$ ,  $t_0$  为开始采样的时间,  $N = 2\nu(t_N)\tau_a$ ,  $t_N$  为结束采样的时间,  $\delta(\nu - n\Delta\nu)$  为单位脉冲函数:

$$\delta(\nu - n\Delta\nu) = \begin{cases} 1, & \nu = n\Delta\nu, \\ 0, & \nu \neq n\Delta\nu. \end{cases} \quad (8)$$

由(7)式可以看出, 重采样之后的信号为理想采样的余弦函数, 可消除由于光源调制的非线性对干涉信号的影响, 干涉信号频谱会被优化, 可以提高测距分辨率, 但绝不会突破有(3)式决定的理想测距分辨率, 相反重采样过程会大幅度减少采样点数, 因此要保证测距分辨率就必须增加采样时间,

这又会进一步需要激光器增大调制范围  $B$ . 对重采样的信号进行拼接处理可以较好的解决这个问题.

拼接原理如图 3 所示, 在实际测量中, 测量所取得信号均在激光器调谐的线性范围内进行测量, 从上面的公式推导我们可以看出, 在这个范围内, 重采样得到的信号时理想的单频信号. 因此, 在理想状态, 激光器的线性调谐范围在时域信号上影响的仅仅是重采样信号的采样点数多少, 对不同测量得到的重采样信号进行拼接可实现如图 3 (b) 所示的测量过程, 即拼接过程在理论上等同于延展激光光源的线性调谐带宽.

信号拼接后, 在一定采样时间范围, 测距分辨率为

$$\delta_z = \frac{c}{2n(B + B + B + B + B + \dots)}. \quad (9)$$

### 3 快速测量方案

从上一章节的测距原理推导过程可以看出, 无论采用什么方案, 测量过程均需要采集大量的数据以保证系统测距分辨率, 而且需要复杂的后续数据处理, 因此会降低测量效率影响其实用性, 因此, 针对本系统, 本文提出了快速测量方案. 快速测量方案的原理如图 4 所示.

从 (5) 式、(6) 式的推导过程及图 2 所示的原理可以得出

$$\tau = \frac{2z}{c}, \quad (10)$$

$$\tau_a = \frac{l}{c}, \quad (11)$$

式中  $l$  为辅助干涉光路中延迟光纤的长度.

理想状态下 (调制速率为  $\gamma(t) = d\nu(\tau)/dt$  恒定不变) 两路干涉信号的频率为

$$f = \gamma(t) \cdot \tau = \gamma(t) \cdot \frac{2z}{c}, \quad (12)$$

$$f_a = \gamma(t) \cdot \tau_a = \gamma(t) \cdot \frac{l}{c}. \quad (13)$$

(12), (13) 式相比可得出

$$z = \frac{f}{2f_a} \cdot l \approx \frac{N}{2N_a} \cdot l, \quad (14)$$

其中  $N$  为测量干涉光路的采集信号的周期数,  $N_a$  为辅助测量干涉光路的采集信号的周期数.

通过 (14) 式可以得出待测距离与辅助干涉光路延迟光纤的长度的简易比例关系, 而式中  $N$ ,  $N_a$  可以通过频率计数器等集成电路快速获取 (统计信号峰值个数作为得到  $N$ ,  $N_a$  的简易方法, 若  $N/N_a$

的比值结果为无理数, 其有效位数选取系统测距精度小数点后下一位), 从而可快速简易求出待测距离值. 基于此原理, 设计了图 4 所示的快速测量原理方案, 此方案相比通过 FFT 数据处理的方式, 将测量速度提高了数十倍, 且目前通过 FFT 的方式在保证精度的前提下很难实现实时监测测量, 而此方案很容易实现.

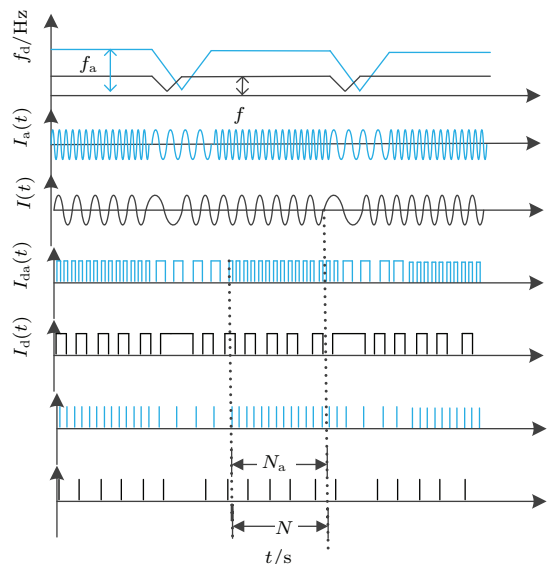
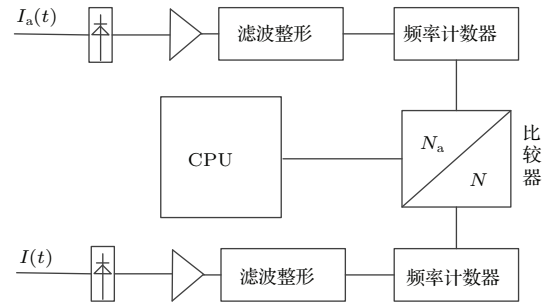


图 4 快速测量方案原理图

Fig. 4. Fast measurement scheme schematic.

### 4 实验

为了验证通过对重采样信号进行拼接的方案可以提高测距分辨率及降低对激光光源的性能要求, 验证快速测量方案的实用价值及其测量误差, 标定设计集成测距系统的测距精度, 设计了通过 80 m 精密长度导轨进行距离测量的精度对比实验. 本文搭建的测距系统主要组成: 外腔式可调谐激光器, 自主设计加工双干涉光纤光路, 示波器 (LeCroy WaveRunner 640zi), 1550 nm 光电探测器 (Thorlabs PDB150C).

准直系统采用两组镜头组合变焦式, 用微位移

平台调节改变聚焦位置, 实验结果表明, 设计的准直系统可保证在 50 m 的量程内均可实现对回波信号的探测. 基于上述工作, 完成了对本文设计系统的精度比对实验, 将本测距系统置于导轨平台, 调节光路使测量系统, 使得系统发射光路与导轨标准干涉光路平行 (保证无相对距离误差), 系统照片如图 5 所示, 系统中辅助测量光路的延时光纤长度为 40.8 m, 被测目标为角锥棱镜. 测量过程中, 激光器的调制速度为 10 nm/s, 调制范围设置为 40 nm. 每隔 3 m 记录导轨干涉仪位置及测量信号直至 30 m, 在每个位置均取 25 组数据.

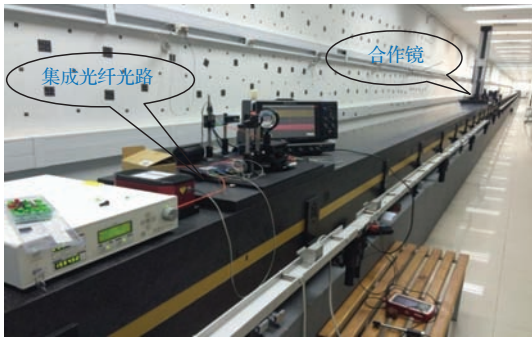


图 5 测量实物图

Fig. 5. Experimental setup.

将每个位置的测量数据按本文提出的方法进行数据处理, 可以得到系统测量的绝对测距值及测量分辨率, 快速测量系统可现场得出快速测距结果, 处理后的测量数据结果如表 1 所示.

表 1 不同位置的测量结果

Table 1. measurement results of different positions

干涉仪位置	绝对测距值	分辨率/ $\mu\text{m}$	快速测量值
0.0001	2204.436	24	2203.12
3000.002	5204.460	26	5203.04
6000.0019	8204.458	29	8202.98
9000.0021	11204.477	34	11202.85
11999.9892	14204.476	38	14202.67
14999.9893	17204.478	44	17202.78
17999.9885	20204.492	50	20202.56
20999.9861	23204.490	65	23202.48
23999.989	26204.513	80	261202.32

导轨干涉仪测距精度很高, 单步控制的重复性优于 0.1  $\mu\text{m}$ , 单步定位精度优于 0.8  $\mu\text{m}$ , 本测量系统测距精度在 10  $\mu\text{m}$  量级, 因此可通过导轨干涉仪

来标定本系统得测距误差. 可以看出, 测量误差随着待测距离的增大而变大, 分辨率也相应减小. 快速测量方法的测距精度比采用拼接处理的方法低一个量级左右.

由于干涉仪的测量结果是相对距离, 而本测距系统为绝对测距系统, 为反应本测距系统的测量误差, 将绝对测距值和快速测量值都做减初始值再减干涉仪位置数据处理, 得到测距误差并将结果绘图, 如图 6 所示.

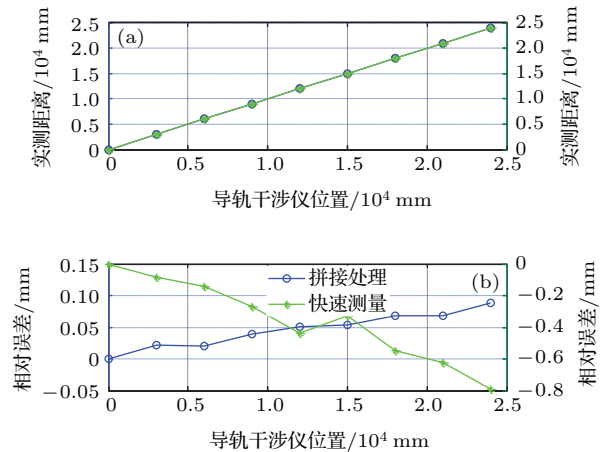


图 6 (网刊彩色) 系统测距误差

Fig. 6. (color online) Ranging error of the measurement system.

图 6 较直观的反映了系统测量误差曲线, 图 6 (a) 宏观上反映了测量结果曲线与导轨位置呈良好线性关系. 图 6 (b) 可以直观看出: 通过拼接处理的方法, 在绝对距离 2 m 至 26 m 内测距误差不超过 0.1 mm, 且测量误差随距离增大线性增大; 快速测量方法同样测量误差绝对值随测量距离增大而线性增大, 最大测量误差为 0.8 mm. 两条误差曲线的变化趋势完全相反. 这是由于两种方法引入的主导误差源不同, 实验过程中, 测量光路不可能与导轨完全平行, 存在系统误差, 因此随着测量距离的增加待测距离比实际导轨行程要大, 蓝色曲线反映了此项误差. 快速测量方法数据处理受激光光源的影响较大, 其一, 随着距离增加探测信号变弱, 因此探测过程中会减小 (14) 式中  $N$  的值, 其二, 激光器调模、调谐非线性影响也均会导致  $N$  值减小, 随着测量距离增大进而干涉频率增大, 处理过程中  $N$  值也会减小, 由于  $N$  值减小的影响远超过测量光路与导轨不绝对平行的影响, 所以绿色测量误差曲线反应的变化趋势与蓝色测量误差曲线完全相反.

为了验证系统所采取信号拼接的方法可提高测量分辨率, 取在 20 m 位置的测量数据进行对比处理. 图 7 为单次测量数据处理结果, 图 8 为选取 10 次不同测量数据进行拼接数据处理的结果(在同一测量位置, 激光器扫描频段不同的十次测量). 对比可以看出, 通过多次测量拼接处理得到的结果明显优于单次测量的结果, 在测量距离 20 m 处, 通过信号拼接测距分辨率为  $50 \mu\text{m}$ .

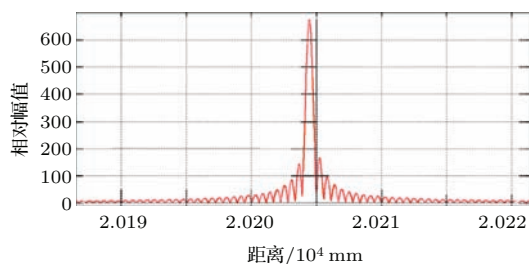


图 7 单次测量数据处理结果

Fig. 7. Result of single measurement.

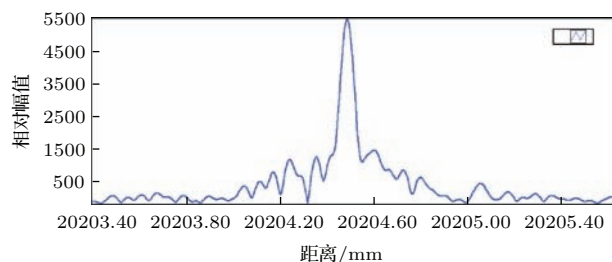


图 8 数据拼接处理

Fig. 8. Results by splice different measurements.

## 5 结 论

本文提出了一种基于调频连续波的绝对测距方法, 搭建了双干涉光路测距系统, 通过采样后的数据拼接, 大大减小了调频非线性对测距精度的影响, 是的小的扫描频率范围可以达到较高的测距分辨率. 为满足系统实用性要求, 本文提出一种可实现实时测量的快速测量法案, 为精确测量提供参考.

实验结果表明: 拼接不同次测量所得的重采样信号进行数据处理可以实现高分辨率的测量, 在

同等条件下, 获取同样的测量分辨率, 通过信号拼接的方法可大大降低对激光器性能的要求(调谐带宽). 多次不同距离的实验表明, 本文设计的系统有较高的稳定性, 可实现在 26 m 内测量误差优于  $100 \mu\text{m}$  的尺寸测量. 快速测量系统可实现在量程内优于 1 mm 精度的实时测量, 其响应速度快, 测量原理简单, 且有较高的实用价值和意义.

## 参考文献

- [1] Liu Z X, Zhu J G, Yang L H, Liu H Q, Wu J, Xue B 2013 *Meas. Sci. Technol.* **24** 105004
- [2] Wu H, Zhang F, Cao S, Xing S, Qu X 2014 *Opt. Express* **22** 10380
- [3] Liao S S, Yang T, Dong J J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 073201
- [4] Wu H, Zhang F, Li J, Cao S, Meng X, Qu X 2015 *Appl. Opt.* **54** 5581
- [5] Roos P A, Reibel R R, Berg T, Kaylor B, Barber Z W, Babbitt W R 2009 *Opt. Lett.* **34** 3692
- [6] Wang G C, Yan S H, Yang J, Lin C B, Yang D X, Zou P F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 070601 (in Chinese) [王国超, 颜树华, 杨俊, 林存宝, 杨东兴, 邹鹏飞 2013 物理学报 **62** 070601]
- [7] Cabral A, Rebordão J 2007 *Opt. Engineering*. **46** 073602
- [8] Li Z D, Jiang Y S, Snag F, Wnag L C, Deng S G, Xin Y, Guo J P 2011 *Acta Optica Sinica* **31** 0314001 (in Chinese) [李志栋, 江月松, 桑峰, 王林春, 邓士光, 辛遥, 郭泾平 2011 光学学报 **31** 0314001]
- [9] Roos P A, Reibel R R, Berg T, Kaylor B, Barber Z W, Babbitt W R 2010 *Opt. Lett.* **34** 3692
- [10] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, Leyva V, Yariv A 2009 *Opt. Express* **17** 15991
- [11] Iiyama K, Matsui S, Kobayashi T, Maruyama T 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 703
- [12] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, Sinclair L C, Knabe K, Swann W C, Newbury N R 2013 *Opt. Lett.* **38** 2026
- [13] Shi G, Zhang F M, Qu X H, Meng X S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 184209 (in Chinese) [时光, 张福民, 曲兴华, 孟祥松 2014 物理学报 **63** 184209]
- [14] Shi G, Zhang F, Qu X, Meng X 2014 *Opt. Engineering* **53** 122402

# High precision and fast method for absolute distance measurement based on resampling technique used in FM continuous wave laser ranging\*

Meng Xiang-Song Zhang Fu-Min<sup>†</sup> Qu Xing-Hua

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

( Received 6 July 2015; revised manuscript received 11 August 2015 )

## Abstract

Frequency modulated continuous wave (FMCW) laser ranging is one of the most interesting techniques for precision distance metrology. It is a promising candidate for absolute distance measurement at large standoff distances (10 to 100 m) with high precision and accuracy, and no cooperation target is needed during the measuring process. How to improve the measurement resolution in practice has been the research focus of the FMCW laser ranging in recent years.

FMCW laser ranging system uses the method which may convert the measurement of flight time to the frequency measurement, while the ranging resolution can be determined by the tuning range of the optical frequency sweep in theory. The main impact-factor that reduces the resolution is the tuning nonlinearity of the laser source, which may cause an amount of error points within the sampling signal. So a dual-interferometric FMCW laser ranging system is adopted in this paper. Compared to the traditional Michelson scheme, an assistant interferometer is added. The assistant interferometer has an all-fiber optical Mach-Zehnder configuration, and the delay distance is at least 2 times longer than OPD (optical path difference) of the main interferometer. Because it provides the reference length, the length of the fiber must remain unchanged. The interference signal is obtained on the photodetector. At the time points of every peak and bottom of the auxiliary interferometer signal, the beating signal from the main interferometer is re-sampled. The original signal is not the equal time intervals, while the re-sampled signal is the equal optical frequency intervals. Based on the property of the re-sampled signal, a method by splicing the re-sampled signal to optimize the signal processing is proposed, by which the tuning range of the laser source limitation can be broken and high precision can be easily obtained. Also, a simple high-speed measuring method is proposed.

Based on all the above principles, the two-fiber optical frequency-modulated continuous wave laser ranging system is designed. The delay fiber in the FMCW laser ranging system is 40.8 m long, and the tuning speed and tuning range of the laser source are set to 10 nm/s and 40 nm respectively. Experiments show that the optimization method can effectively improve the measurement resolution and measuring efficiency; in the 26 measuring ranges, 50  $\mu\text{m}$  resolution can be easily obtained and the error is less than 100  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** FMCW, the absolute distance measurement, interferometry

**PACS:** 06.20.Dk, 06.30.Bp, 42.25.Hz, 42.30.Lr

**DOI:** 10.7498/aps.64.230601

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51327006, 51275350) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120032130002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhangfumin@tju.edu.cn](mailto:zhangfumin@tju.edu.cn)