

文章编号 1004-924X(2015)01-0040-08

## 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力

曲兴华\*, 职广涛, 张福民, 时光

(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:**提出了一种对等频率间隔的采样信号进行拼接来提高调频连续波激光测距系统的测距分辨力的方法。研究了调频连续波激光测距的原理,设计搭建了基于一种双干涉系统的光纤调频连续波激光测距系统。利用辅助干涉系统产生的时钟信号对测量干涉系统的信号进行等光频间隔的采样,然后对采样信号进行拼接。使用 LabVIEW 设计了信号错误检测处理、采样和拼接的信号处理系统。利用该测距系统进行了实验验证,结果显示,将等光频间隔的采样信号进行拼接的方法可以突破激光器扫描范围的限制,减少光源非线性的影响,从而提高系统的测距分辨力。得到结果表明,在测量距离为 8.7 m 时,该系统的测距分辨力可达  $70\ \mu\text{m}$ ,30 组测量结果的重复性标准差为  $35\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:**激光测距;调频连续波;采样;信号拼接;空间分辨力

中图分类号:TN247;TH744.3 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152301.0040

## Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing

QU Xing-hua\*, ZHI Guang-tao, ZHANG Fu-min, SHI Guang

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

\* Corresponding author, E-mail:quxinghua@tju.edu.cn

**Abstract:** A new method to improve the measuring resolution of a Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) laser ranging system was presented by splicing the sampling signals at an equal frequency interval. The principle of FMCW laser ranging was explored and a fiber FMCW laser ranging system based on dual-interferometric systems was built. In which, the auxiliary interferometric system was used to generate time clock pulses to sample the measured signals at equally spaced optical frequencies and then to splice the sampling signals. By using LabVIEW graphical programming software, a signal processing system was design to detect signal errors, sample and splice signals. The experiments on the ranging system proposed were performed. The results show that the proposed method for sampling and splicing measured signals at equally spaced optical frequencies breaks though the laser scanning limitation and reduces the effect of tuning nonlinearity of the laser source, so it improves the ranging resolution. In the experiments, it offers the range resolution of  $70\ \mu\text{m}$  at 8.7 m and the standard deviation of 30 group results is  $35\ \mu\text{m}$ .

收稿日期:2014-06-25;修订日期:2014-08-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51327006, No. 51105274);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20120032130002)

**Key words:** laser distance measurement; Frequency Modulated Continuous Wave(FMCW); sampling; signal splicing; spatial resolution

### 1 引言

近年来,随着我国工业的不断发展,人们对大尺寸测量的要求越来越高,特别是在航空航天、汽车和船舶制造业等领域,对实时、大范围、高精度现场测量的需求越来越突出<sup>[1-4]</sup>。激光凭借方向性好、亮度高、单色性好、相干性强且频率处于光波频段等特点以及较高的分辨力和抗干扰能力,在测距性能上的优势非常显著<sup>[5-6]</sup>。调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)激光测距系统就是一种另人关注的非接触激光干涉测距系统。相比于传统的脉冲法和相位法等激光测距方法,它具有超高的距离分辨力和较高的测距精度<sup>[7]</sup>,因此在 10~100 m 的大尺寸高精度测量中有着广阔的发展前景。

FMCW 激光测距系统工作时,利用频率与距离的函数关系将距离测量转变为频率测量,这种测距方法已经广泛应用在光学相干断层扫描(OCT)和光频域反射计(OFDR)中<sup>[8]</sup>。该方法采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),通过峰值点确定单频信号频率,因此增加采样点数是提高测距精度的必要条件<sup>[9]</sup>。采样点的增加要求激光光源有较大的调谐范围,但光源的非线性扫描会导致信号经过 FFT 处理后的频谱被展宽,半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)增大,相应的空间分辨力便会降低<sup>[10-11]</sup>。目前,普遍采用调谐范围较大的可调谐激光器结合光源反馈技术来消除光源非线性扫描带来的误差,提高 FMCW 激光测距系统的测距分辨力<sup>[12-13]</sup>。但是激光光源反馈系统非常复杂,而且在较大的调谐范围内进行扫描不可避免地会出现跳模,从而引起信号错误。

为了克服以上缺点,提高 FMCW 激光测距系统的分辨力,本文提出了一种利用信号拼接提高测距分辨力的方法,并设计了一种包含光频可调谐激光器、测量干涉系统、辅助干涉系统、数据采集卡 and 上位机信号处理系统的 FMCW 激光测距系统,实现了绝对距离的测量。其中信号处理系统采用 LabVIEW 图形化编程软件,首先通过对采集卡得

到的信号进行信号错误检测处理,剔除了由于激光器跳模等原因造成的错误突变信号,然后使用辅助干涉系统产生的时钟信号对测量信号进行等频率间隔采样,并对采样信号进行拼接。该方法突破了激光器扫描范围的限制,减少了光源非线性扫描的影响,从而提高了测距分辨力。

### 2 系统测距原理

图 1 为 FMCW 激光测距系统的工作原理。系统主要包括光频可调谐的激光光源、两个干涉系统(测量干涉系统和辅助干涉系统)以及数据采集卡 and 上位机信号处理系统。光频可调谐激光光源发出的激光经过耦合器分成两路:一路进入测量干涉系统;一路进入辅助干涉系统。其中进入测量干涉系统的激光又经过耦合器分成两路,在分别经过被测目标反射和延时光纤后再经过耦合器合并为一路,在光电探测器表面发生干涉得到拍频信号。

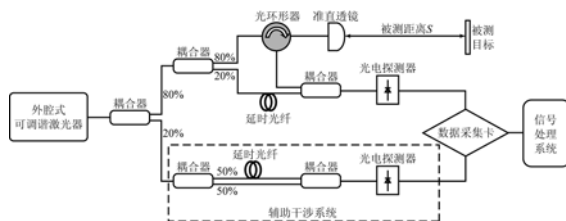


图 1 调频连续波激光测距系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FMCW laser ranging system

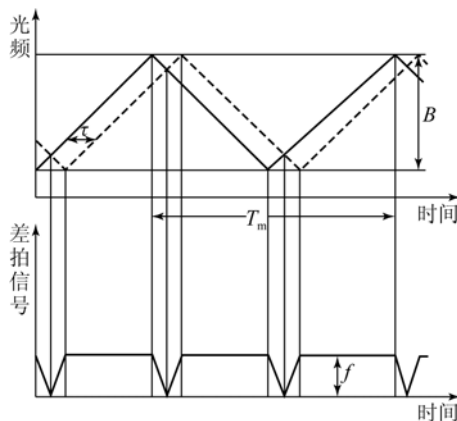


图 2 三角调频连续波波形图

Fig. 2 Diagram of triangle FMCW

如图 2 所示,如果激光光源的频率是线性调制的,那么拍频与经过被测目标反射的光路和参考光路的差成正比。由此可得:

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

其中:OPD,  $\tau$  分别为测量干涉系统中测量光路和参考光路的光程差和时间延迟,  $f$  为拍频信号的频率,  $n$  为传播介质的折射率,  $c$  为真空中的光速,  $T_m$  和  $B$  分别为激光器调制周期和调制带宽,  $S$  是被测目标与系统的空间距离。

从式(1)可以得到被测距离为:

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

于是可知频率分辨力的大小决定了空间分辨力的大小,即:

$$\delta_s = \frac{T_m \cdot c}{4 \cdot n \cdot B} \cdot \delta_f, \quad (3)$$

其中: $\delta_f$  是干涉信号的频率分辨力。在实际测量过程中,通过对采样信号进行 FFT 将时域信号转换到频域<sup>[14]</sup>,再进行频率测量,进而得到目标的距离。经推导得到空间距离分辨力为:

$$\delta_s = \frac{c}{2nB}. \quad (4)$$

从式(4)可知,在理想情况下,测距分辨力和光源频率扫描调制带宽成反比,要达到较高的测距分辨力,需要很宽的频率扫描带宽,这对光源要求很高,比较难实现。因此光源的频率扫描调制带宽限制了空间分辨力的提高。

如图 1 所示,测距系统中的辅助干涉系统用来产生时钟信号,在数据采集后的信号处理步骤中对测量系统得到的拍频信号进行等频率间隔采样,然后对采样得到的多组信号进行拼接从而增加了采样时间,突破了扫描范围的限制。由式(4)可知,理论上通过拼接可以提高测距分辨力。

为了证明采样信号拼接法的可行性,用电场方程描述激光:

$$E(t) = E_0 \exp[j\varphi(t)], \quad (5)$$

其中: $E_0$  为电场强度,  $\varphi(t)$  为随时间变化的相位。

如果两路激光  $E(t)$  和  $E(t+\tau)$  的偏振方向相同,则会在光电探测器表面发生干涉,经过推导<sup>[5,9]</sup>得到干涉信号为:

$$I(t) = 2\eta E_0^2 [1 + \cos(2\pi\nu(t)\tau)], \quad (6)$$

其中: $\eta$  为环境对光强的影响系数,  $\nu(t)$  为瞬时光频。从上式中可以看出,如果时间差  $\tau$  恒定,干涉信号  $I(t)$  便为光频  $\nu(t)$  的函数。如果用理想的线性信号调制光频(调制速率为  $\gamma(t) = d\nu(t)/dt$  恒定不变),则干涉信号为理想的余弦函数。但实际情况中,激光器的调制速率  $\gamma(t)$  并不是恒定值,这样产生的干涉信号不是理想的余弦信号,直接对多次测量的拍频信号进行拼接会产生很大的相位误差,从而影响测距精度和测距分辨力。

为了补偿激光器扫描的非线性,得到理想的余弦信号,本文将辅助干涉系统产生的拍频信号作为时钟信号,对测量干涉系统的拍频信号进行了等频率间隔采样。其中辅助干涉系统的光程差至少是测量干涉系统光程差的 2 倍以上,对应的时间延迟为  $\tau_a$ ,则其采样间隔为  $\Delta\nu = (2\tau_a)^{-1}$ 。推导<sup>[15]</sup>得到等光频间隔的采样信号为:

$$I_m(\nu) = 2\eta E_0^2 + 2\eta E_0^2 \sum \cos(2\pi\tau_m\Delta\nu) \delta(\nu - n\Delta\nu), \quad (7)$$

其中: $I_m(\nu)$  为测量系统拍频信号的强度,  $\tau_m$  为测量系统光程差带来的时间差,  $\delta(\nu - n\Delta\nu)$  为单位脉冲函数。由于我们的测距系统是对一个固定目标进行测量,忽略每次测量时环境变化的影响,则多次测量时得到的拍频相位信息不变。由式(7)可以看出,等光频采样信号为理想采样的余弦函数,即多次测量得到的等光频采样信号理论上是一个频率固定的单频信号,所以本文提出的拼接等光频采样信号的方法理论上是可行的,可以突破频率扫描范围的限制,使用较小的扫描带宽便可得到很高的测距分辨力。

### 3 拼接采样信号的算法实现

作为虚拟仪器开发平台,LabVIEW 在数据采集、存储、显示、信号处理、数据传输等方面具有强大功能,尤其是在数据采集和信号处理方面,该平台缩短了软件开发的周期,简化了程序设计<sup>[16]</sup>。本文利用 LabVIEW 完成了系统的数据采集、信号处理和显示的全部工作。数据采集和

信号处理的实现算法框图如图 3 所示。

首先初始化系统,在 LabVIEW 前面板上设置采样频率、拼接采样信号段数、每段采样点数等参数;然后进行数据采集;接着对数据采集卡采集到的时钟信号数据进行错误检测处理。如果发现时钟信号有错误突变,则删除该段时钟信号及对应的测量信号数据;如果没有错误,则利用该时钟信号对相应的测量信号进行等频率间隔采样,当段数  $N$  达到设定段数  $N_0$  时停止数据采集。然后进行等频率间隔采样信号的拼接,最后对拼接的采样信号进行 FFT 变换得到波形和目标距离。

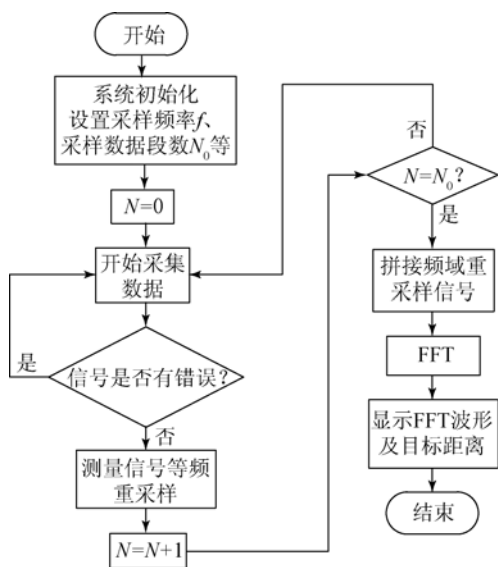


图 3 激光测距系统的算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm for laser ranging system

### 3.1 信号错误检测处理

由于激光器跳模等光源不可控的因素会造成采集卡得到的数据并不是理想的余弦信号,从而使得 FFT 之后的频谱扩宽很多,大大降低了测距分辨力和测距精度。图 4 为由于激光器跳模造成的频率突变信号。

为了消除这种突变造成的影响,需要对时钟信号进行错误检测处理,一旦发现时钟信号中有突变信号即删除该段时钟信号及对应的测量信号。根据实验观察,本文提出了一种简单、快速有效的错误检测处理方法。

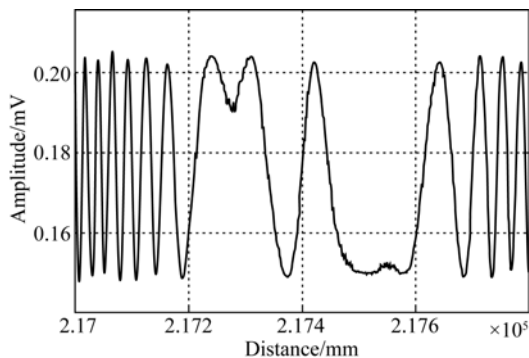


图 4 激光器跳模造成的突变信号

Fig. 4 Signals caused by laser mode hopping

理想时钟信号的波峰和波谷必定是一个波峰一个波谷的顺序交叉出现,由于波峰和波谷的检测采用极值检测法,这样一旦出现突变错误信号点,必然导致出现连续两个或者多个波峰或波谷。根据这个特点,首先分别检测波峰和波谷并且把波峰和波谷的位置坐标分别存入两个数组,然后将两个数组交叉成为一个数组。循环比较相邻的两个数据,判断该数组是否严格按照从小到大的顺序排列,如果不是则说明该段信号出现突变,可删除该段时钟信号及对应的测量信号。

### 3.2 信号等光频间隔采样

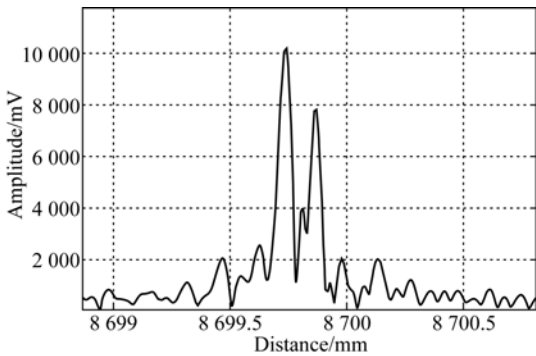
实际使用时,拍频信号经过 FFT 后,主瓣的半高全宽代表了测距的分辨力,而 FFT 算法要满足数据在独立变量(在本文中是光频)被等间隔采样<sup>[13]</sup>。调谐激光器工作在线性的光学频率扫描模式下,但在实验测量中它会不可避免地偏离线性扫描。因此,光频扫描的非线性会导致得到的拍频信号的频率不稳定,无法进行信号的拼接,并且拍频信号经过 FFT 后会有一个频谱的扩展,这个附加的频谱扩展降低了测距系统的空间分辨力。这里对测量干涉系统获得的干涉信号进行了等光频间隔采样,从而补偿了调制的线性度。

首先,为了确定与等间距光频对应的时间点,运用波峰波谷检测法找到辅助干涉系统产生的时钟信号的所有波峰和波谷对应的时间点。然后,在这些时间点对测量干涉系统产生的拍频信号进行采样,从而消除了光源频率的非线性扫描所导致的误差,产生了可以拼接的等频率间隔采样信号。

### 3.3 拼接采样信号

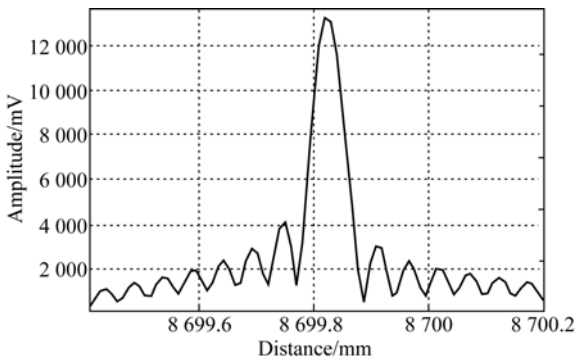
拼接等频率间隔的采样信号时必须满足相位

匹配的原则,如果不满足该原则,拼接的两段信号之间会产生一个延时  $t_0$ ,根据傅里叶变换的时移特性——时域中信号延时  $t_0$ ,则傅里叶变换后的频域中所有频率分量相应移动  $\omega t_0$ ,可知,拼接的采样信号经过 FFT 后的频谱会因为频率分量的相移而造成主瓣和旁瓣混在一起,无法区分频谱中心,即产生数据简单叠加的 FFT 频谱现象,如图 5(a)所示。



(a) 数据简单叠加的 FFT 频谱图

(a) FFT spectrum of simply superimposed data



(b) 满足相位匹配的频谱图

(b) FFT spectrum meeting phase-matching

图 5 拼接信号的频谱图

Fig. 5 Spectra of splicing signals

图 5(b)显示的是满足相位匹配进行采样信号拼接后 FFT 得到的频谱,主瓣和旁瓣可以很容易区分出来,从而得到测量的目标距离。

拼接的主要思想是满足相位匹配原则的同时不影响信号的完整性和连续性。因此,采用如图 6 所示的数据处理步骤完成拼接过程。首先在要拼接的连续两段信号前一段段尾和后一段段首中找到相位尽量接近的两个点,然后将段尾点之后

和段首点之前的信号段删除,最后在这两个点的位置进行拼接。根据实验观察,选取两段信号段首段尾各 10 个采样点即可找到相位较接近的点,如果采样点个数过少会导致难以找到相位较匹配的点,拼接效果不理想,测量精度较低;而采样点过多会造成运算量过大,程序运行缓慢,同时精度提高非常有限。

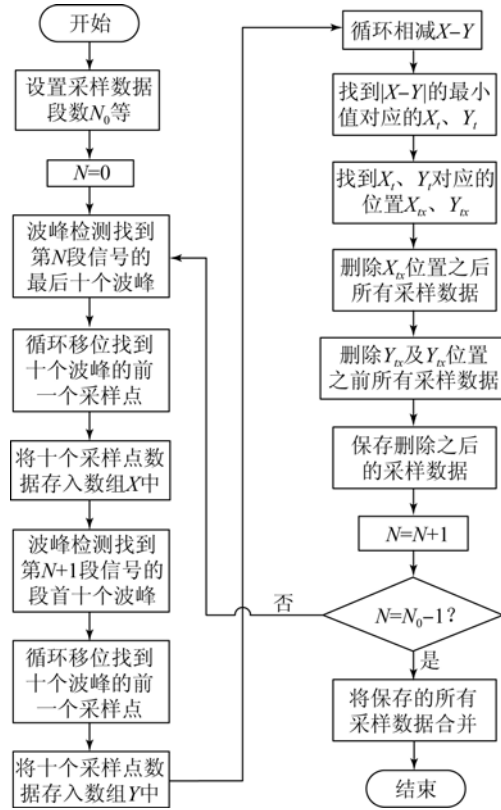


图 6 拼接采样信号流程图

Fig. 6 Flow chart of sampled signal splicing

### 4 实验及结果

为了验证该拼接方法的有效性,本文搭建了如图 1 所示的调频连续波测距系统。其中光源为线宽为 200 kHz 的可调谐激光器,辅助干涉系统的光程差为 30 m,测量目标为角锥棱角,距离测距系统约为 8.7 m。激光器的调制速率和调制范围分别为 8 nm/s 和 24 nm。对于一个给定的测量,通过数据采集卡的两个模拟输入通道同时获得辅助干涉系统和测量干涉系统的输出,然后通过如图 3 所示的计算机信号处理步骤得到目标距离和频谱信息。其中测量干涉系统的拍频信号的

频域图像如图 5(b)所示,FWHM 约为  $70 \mu\text{m}$ 。由此表明,采用拼接采样信号法后测距系统的实际测距分辨力约为  $70 \mu\text{m}$ ,这个结果比较接近于理论空间分辨力  $43 \mu\text{m}$ 。考虑到环境的影响(如外界振动和温度变化)会导致光纤的长度发生变化,这个结果足以说明该方案可行性。

图 7 所示的蓝色、红色、绿色曲线分别是将 4 段、8 段、10 段等频率间隔的采样信号按照之前所说的信号处理方法拼接起来的 FFT 频谱图,其中激光器的调制速率为  $2.4 \text{ nm}$ (彩图见期刊电子版);黑色曲线是激光器的调制速率为  $24 \text{ nm}$  时信号的 FFT 频谱图。从图中可以清晰地看到,随着拼接信号段数的增加,峰值的高度也随之提高并逐渐接近单段信号的曲线,这表明通过拼接采样信号提高了频率扫描的带宽,而且拼接信号的长度越长,效果越好。再仔细观察会发现这些曲线有同样的中心峰值,但是有不同的主瓣带宽,拼接信号段数越多主瓣带宽越窄。这说明拼接采样信号法可以提高信号的分辨力,并且分辨力与拼接信号的长度成正比。

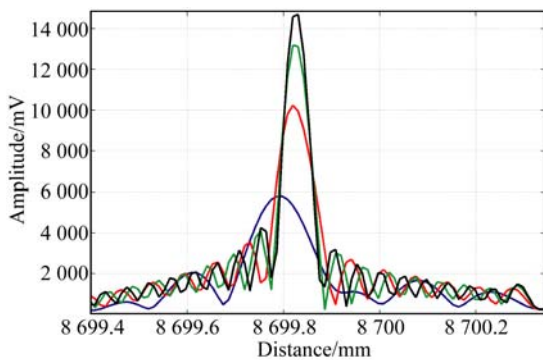


图 7 不同段数拼接信号的频谱对比

Fig. 7 Spectral comparison of splicing signals in different sections

为了验证系统的测距分辨力,进行了一组对比实验。首先将被测目标放置在距离系统约  $8.7 \text{ m}$  远的精密微位移平台上进行测量并保存结果。然后将目标利用位移平台移动  $70 \mu\text{m}$ ,再进行测量。将两次的测量结果按照之前的算法处理,得到拼接信号经过 FFT 变换的频谱如图 8 所示,可以清晰地看到频谱随着距离的改变而移动。这个结果表明系统的测距分辨力可以达到  $70 \mu\text{m}$ 。

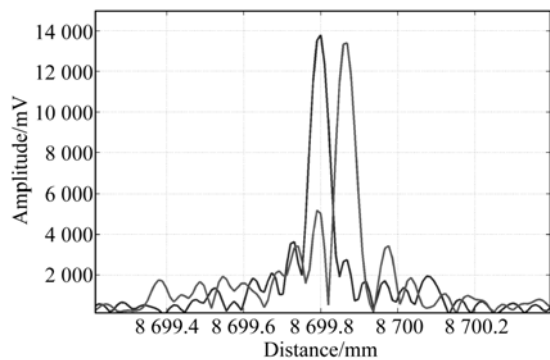


图 8 测距分辨力实验结果

Fig. 8 Results of ranging resolution

为了衡量测距系统的稳定性,记录了对单个目标的 30 组有效测量结果。如图 9 所示,30 组有效测量结果的标准差是  $35 \mu\text{m}$ 。由于每次测量时不可避免地会因为环境变化而产生一定的误差,该测量结果表明测距系统在测量固定目标时具有很高的精度和稳定性。

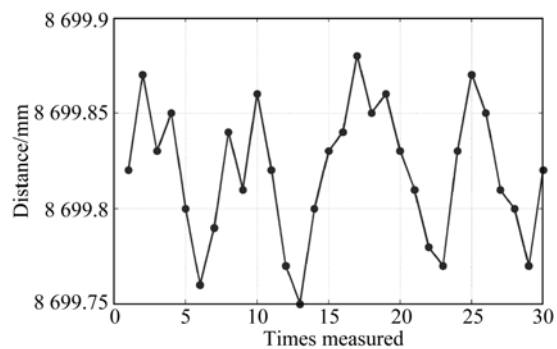


图 9 30 组测量结果

Fig. 9 Results of thirty groups of measurements

## 5 结 论

本文提出了一种通过对等频率间隔采样的信号进行拼接来提高 FMCW 激光测距系统的测距分辨力的方法。首先研究了 FMCW 激光测距的原理,证明了利用拼接等光频间隔采样信号的方法提高测距分辨力的可行性。设计搭建了一种双干涉系统的光纤 FMCW 激光测距系统,利用辅助干涉系统的干涉信号对测量干涉系统的信号进行等光频间隔采样,然后对采样信号进行拼接处理。通过 LabVIEW 设计实现了信号错误处理及信号采样和拼接系统。利用该测距系统进行了实

验,结果表明对等频率间隔采样信号进行拼接的方法可以增加扫描范围,减小光源非线性扫描的影响,从而提高了测距的分辨力。测距系统通过简单的光路结构和信号处理步骤,降低了对激光器光源的要求,利用调制范围较小的激光器就能达到很高的测量分辨力。系统的测量范围可以达到 20 m

左右,主要取决于辅助干涉系统的光程差。在测量距离为 8.7 m 时,该系统的测距分辨力可达  $70 \mu\text{m}$ , 30 组测量结果的重复性标准差为  $35 \mu\text{m}$ 。该 FMCW 激光系统及其拼接采样信号的方法具有测距精度和分辨力高、测距范围大等特点,在精密制造、空间技术等领域具有重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 马骊群,王立鼎,靳书元,等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势 [J]. 计测技术, 2007, 26(6): 1-5.  
MA L Q, WANG L D, JIN SH Y, *et al.*. Large-size industrial trace ability status quo and development trend of measuring instruments [J]. *Measurement Technology*, 2007, 26(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] 周森,郭永彩,高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2472-2478.  
ZHOU S, GUO Y C, GAO CH. Dynamic length measuring system for large scale work pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2472-2478. (in Chinese)
- [3] 张福民,曲兴华,叶声华. 大尺寸测量中多传感器的融合 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(70): 1236-1240.  
ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Multiple sensor fusion in large scale measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(70): 1236-1240. (in Chinese)
- [4] 时光,张福民,曲兴华. 经济型大尺寸激光自动坐标测量系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1957-1965.  
SHI G, ZHANG F M, QU X H. Economical type large-scale laser automatic coordinate measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 1957-1965. (in Chinese)
- [5] 陈千颂,赵大龙,杨成伟,等. 自触发脉冲飞行时间激光测距技术研究 [J]. 中国激光, 2004, 31(6): 745-748.  
CHEN Q S, ZHAO D L, YANG CH W, *et al.*. Study on self-triggering pulsed time-of-flight laser range finding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(6): 745-748. (in Chinese)
- [6] 尤政,杨冉,张高飞,等. 激光测距系统整形模块和低通滤波模块优化设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2528-2534.  
YOU ZH, YANG R, ZHANG G F, *et al.*. Optimization of shaping circuit and low-pass filter in laser ranging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2528-2534. (in Chinese)
- [7] 谭朔,郭伟. 调频连续波近程测距系统研究 [J]. 舰船电子工程, 2007, 27(4): 95-99.  
TAN SH, GUO W. Research of microwave short-distance target range detection system [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2007, 27(4): 95-99. (in Chinese)
- [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] 刘宝,刘军民. FMCW 雷达快速高精度测距算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2001, 15(3): 41-45.  
LIU B, LIU J M. A method of the realization of high accuracy in FMCW ranging system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2001, 15(3): 41-45. (in Chinese)
- [10] YUKSEL K, WUILPART M, MÚGRET P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [11] LIYAMA K, MATSUI S I, KOBAYASHI T, *et al.*. High-resolution FMCW reflectometry using a single-mode vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 703-705.
- [12] SATYAN N, VASILYEV A, RAKULJIC G, *et al.*. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback [J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [13] ROOS P A, REIBEL R R, BERG T, *et al.*. Ultrabroad and optical chirp linearization for precision metrology applications [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3692-3694.
- [14] 叶蕾. 基于窄带光纤激光器的光频域反射计研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2013, 5: 38-41.  
YE L. Optical frequency domain reflectometer

- based on narrow band fiber laser [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2013, 5: 38-41. (in Chinese)
- [15] SHI G, ZHANG F M, QU X H, *et al.*. High-resolution frequency-modulated continuous-wave laser ranging for precision distance metrology applications [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (12): 122402.
- [16] 陈树学. LabVIEW 宝典 [M]. 北京:电子工业出版社, 2011.
- CHEN SH X. *LabVIEW Revered Book* [M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



曲兴华(1956—),男,山东莱州人,博士,教授,博士生导师,1982年,1988年,2003年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密测试技术及仪器的研究工作。E-mail: quxinghua@tju.edu.cn



职广涛(1989—),男,宁夏石嘴山人,硕士研究生,2012年于天津大学获得学士学位,主要从事测试计量技术及仪器的研究。E-mail: zhiguangtao518@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)