

单激光器复用法提高调频连续波激光测距分辨率

时光, 王文*

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:可调谐激光器的调制线性度和调制范围是限制调频连续波激光测距测量分辨率的主要因素. 利用单个调制范围较小的可调谐激光器对单个目标进行调频连续波激光测距时, 对目标进行多次测量, 再将经过等光频间隔采样的信号进行信号融合可以达到提高测量分辨率的目的. 该方法可以有效降低调频连续波激光测距对激光器调制范围的要求, 且容易实现、系统组成简单, 有利于将调频连续波激光测距引入工业大尺寸测量、空间技术、测绘等领域.

关键词:调频连续波激光测距; 干涉测量; 绝对测距; 信号融合

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

Single laser complex method to improve the resolution of FMCW laser ranging

SHI Guang, WANG Wen*

(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Modulation linearity and modulation range of the tunable laser are the major factors limiting the resolution of FMCW laser ranging. When using a tunable laser with a small modulation range to measure the distance of a single target, the measuring resolution can be improved by fusing signals of multiple measurements sampled with equal optical frequency interval. This method can greatly reduce the FMCW laser range's demands on modulation range of the tunable laser. This method is easy to achieve and the structural is simple. This system has a wide application in industrial large scale measurement, space technology, and surveying.

Key words: FMCW laser ranging, interference measurement, absolute distance measurement, signal fusion

PACS: 42. 79. Qx, 42. 62. Eh, 07. 60. Ly

引言

调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave 简称 FMCW)激光测距技术是一种干涉式激光测距技术, 具有测量精度高、绝对测量、无盲区、可对漫反射目标进行直接测量等优点^[1], 上世纪八十年代, 已经被应用于军用激光雷达领域^[2-3]. 其基本原理是对发射激光的光频进行线性调制, 经过干涉系统测量臂到达被测目标后, 反射至光电探测器表

面与参考臂的参考光发生差频干涉得到拍频信号, 对拍频信号的频率进行测量得到测量距离^[4]. 由于受到可调谐激光器的相干长度、调制范围和调制线性度的限制, 在早些年其测量精度和测量范围较低, 其优势没有得以充分体现. 近些年, 随着可调谐激光器技术的发展, 调频连续波激光测距的优势在大尺度精密测量领域(如大型飞机的装配^[5]、重大装备的制造^[6]、航天科技领域^[7]等)逐渐凸显, 有着很大的应用潜力.

收稿日期:2015-07-11, 修回日期:2015-10-23

Received date: 2015-07-11, revised date: 2015-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505113, 51275465), 浙江省自然科学基金资助项目(LQ16E050002, LZ16E050001)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(51505113, 51275465); Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang(LQ16E050002, LZ16E050001)

作者简介(Biography): 时光(1986-), 男, 河南鹤壁人, 讲师, 博士, 主要研究领域: 大尺度几何量测量、激光测量. E-mail: shiguang@hdu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: wangwn@hdu.edu.cn

激光器的调制范围与调制线性度是限制调频连续波激光测距测量分辨率和测量精度的主要因素,如何实现高精度调频连续波激光测距成为了国内外的研究热点.美国蒙大拿州立大学的 Randy R. Reibel 利用光纤自混频干涉系统对可调谐激光器进行反馈控制,提高了激光器的调制线性度,实现了 31 μm 的测量分辨率^[8].加州理工大学的 Arseny Vasilyev,利用算法将三个分立的可调谐半导体激光器的光谱结合,将扫描范围提高了三倍,实现了将测量分辨率提高了三倍^[9].美国国家标准技术研究院(NIST)的 Esther Baumann 利用光学频率梳对激光器的波长进行测量,矫正了激光器的调制非线性,实现了微米级的重复测量精度^[10].在国内,中国科学院上海技术物理研究所^[11]、北京航空航天大学^[12]、西安交通大学^[13]等单位都对调频连续波激光测距技术进行了研究,特别哈尔滨工业大学利用非均匀时钟采样进行调频非线性校正,对距离 1 m 的目标测量量块进行测量,取得了 4 μm 的重复测量精度^[14].上述方法从不同角度出发,有效提高了调频连续波激光测距的测量精度,但是需要反馈控制系统或光学频率梳等结构复杂的系统,且测量分辨率完全依赖激光器的调制范围.

从调频连续波激光测距的基本原理出发,提出一种单激光器复用的方法,利用单个激光器对目标进行多次测量,通过信号融合算法提高激光器的理论调制范围,达到提高测距分辨率的目的,降低了调频连续波激光测距对激光器调制范围的要求.适用于对单目标的高精度测距,且系统结构简单,算法容易实现,在大尺度精密测量领域有着广泛的应用前景.

1 调频连续波激光测距测量分辨率分析

图 1 为调频连续波激光测距基本测距系统结构,可调谐连续激光器发射光频成三角波调制的激光,经过测量臂的激光经由被测目标反射后,与参考臂

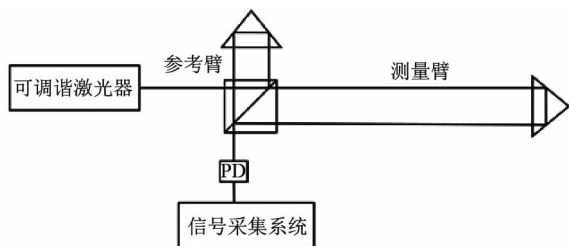


图 1 调频连续波激光测距基本测距系统结构

Fig. 1 Basic structure of FMCW laser ranging system

臂激光汇合,由于两个干涉臂的光程不同,激光经过两个干涉臂后存在时差 τ ,并在光电探测器表面发生差频干涉,干涉信号的频率 f 就正比被测目标的距离.为了方便分析,不考虑激光的空间变化并假设激光为理想的线性频率调制,激光的电场幅度可以表示为:

$$e(t) = A \cdot w_R(t - T'/2) e^{i[\frac{1}{2}\xi t^2 + \omega_0 t + \phi_0]} \quad (1)$$

式中 A 为激光的振幅(假设为固定值), ω_0 是激光的初始角频率, ξ 是激光的调制速率, ϕ_0 为激光的初始相位, T' 为激光的调制周期, w_T 为矩形窗函数表示为:

$$w_T(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq T/2 \\ 0, & |x| > T/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, T 为矩形窗的宽度.为了消除由于时差 τ 导致的拍频频率变化,令 $T < T'$.

激光的瞬时角频率可以表示为:

$$\omega(t) = \xi t + \omega_0 \quad t \in [0, T] \quad (3)$$

激光的调制范围 $B = \xi T/2\pi$.假设两个干涉臂的光程差固定不变,两个反射镜的反射率相同,忽略直流项后,光电探测器 PD 探测到的干涉信号可以表示为:

$$i(t) = |e(t) + e(t + \tau)|^2 \\ = A^2 w_R(t - T/2) \cdot \cos(\xi \tau t + \omega_0 \tau + \frac{1}{2} \xi \tau^2) \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶变换可以得到:

$$I(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) e^{-j2\pi f t} dt \\ = A^2 \pi B e^{-\frac{j\xi \tau^2}{2}} e^{-j(f-\tau)(\omega_0 + \pi B)} \text{sinc}(\pi B(f - \tau)) \quad (5)$$

式(5)中 $\text{sinc}x = \sin x/x$, sinc 函数的第一个零点,为测距的最小分辨率,此时 $f = \tau + 1/B$,通过计算可以得到调频连续波激光测距的分辨率 Δ_D 为:

$$\Delta_D = \frac{c}{2B} \quad (6)$$

其中, c 为真空中的光速,由式(6)可以看出,通过增加激光器的调制范围 B 可提高测距分辨率,但是由于利用可调谐激光器的实现大范围、无跳模以及高线性度的频率调制难度较大,如何利用较小的激光调制范围 B 实现更高的测距分辨率是本文研究的重心.

在上述分析中,忽略了激光调制非线性的影响,但是在实际测量中,可调谐激光器的调制线性度难以得到保证.利用如图 2 所示的测量系统对干涉信号进行等光频间隔重采样,从而抑制激光器调制非线性对测距分辨率的影响^[15].

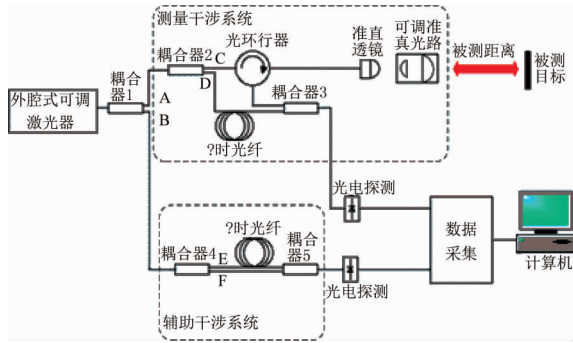


图 2 双干涉调频连续波激光测距系统原理图
Fig.2 Schematic diagram of dual interferometer FMCW laser ranging system

2 基于单激光器复用的 FMCW 激光测距分辨率提高方法

在大尺寸精密测量领域常采用的激光测距设备,大都是对单目标进行测量,如激光干涉仪、激光测距仪、激光跟踪仪、激光扫描仪和全站仪中的测距模块等.利用调频连续波激光测距对单目标测量时,得到的干涉信号为单频的正弦信号,对其进行 FFT 得到被测目标的距离.我们可以利用对单个目标进行多次测量,然后将得到的干涉信号进行融合,从而达到提高理论调制范围 B 的目的,从而提高测量分辨率.

假设利用同一激光器对目标进行了 k 次测量,将 k 次测量得到的干涉信号合并为一列信号,并对所有信号进行截取和相位调整后,令所有信号的长度相等、相位相同,即可等效于增加了激光器的理论调制范围 B ,从而达到提高调频连续波激光测距测量分辨率的目的.融合后的信号可以近似等效于将一系列正弦信号加上了多个等间隔的的矩形窗 $w_r(t)$,窗函数如图 3 所示.图中(A)为窗函数的时域图像,(B)为对应的频域图像,每个窗函数的宽度为 T ,两个矩形窗之间的间隔均为 δ ,令 δ 小于拍频信号的一个周期,则 $\delta < T$.图 3 中第一行为单个窗函数的时域和频域图像.第二行为 k 个等间隔的窗函数的图像,我们可以认为第二行是第三行与第四行相加的结果.比较第一行和第二行右侧的频域图像可以看出,增加信号的长度可以有效提高频域图像中主瓣的半高全宽,且窗函数之间的间隔对主瓣的宽度影响很小.

下面进一步通过数学表达式说明窗函数对干涉信号的影响,第 n 个窗函数 $w_{R,n}$ 可以表示为:

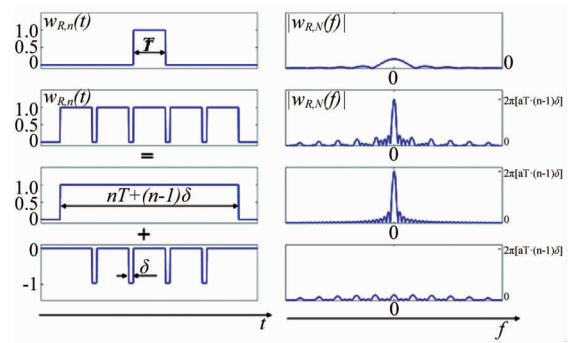


图 3 窗函数的时域和频域图像
Fig.3 Time domain and frequency domain image of window function

$$w_{T,n}(t) = w_T(t - T/2 - nT - n\delta), n = 0, 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

k 个宽度为 T 间隔为 δ 的窗函数的集合 $w_{T,k}$ 可以表示为:

$$w_{T,k}(t) = \sum_{n=0}^k w_R(t - T/2 - nT - n\delta) = w_R\left(\frac{t \cdot T}{nT + (n-1)\delta} - \frac{T}{2}\right) - \sum_{n=1}^{k-1} w_R\left(\frac{t \cdot T}{\delta} + \frac{T}{2} - \frac{T(nT + n\delta)}{\delta}\right) \quad (8)$$

对式(8)进行傅里叶变换可以得到:

$$W_{T,k}(f) = (nT + n\delta) \cdot e^{-j\pi T f} \text{sinc}[\pi(nT + n\delta)f] - \sum_{n=1}^{k-1} \delta \cdot e^{i\pi T f} \cdot e^{-2j\pi T f(nT/\delta - n)} \text{sinc}(\pi\delta f) \quad (9)$$

由于两列信号之间的间隔 δ 远小于矩形窗的宽度 T 即 $nT > n\delta$,从式(9)和图 4 可以看出,由于矩形窗之间间隔对主瓣的半高全宽影响很小可以忽略,即对测距分辨率产生影响很小.在进行测量时,对信号进行融合时需要信号进行截取和相位调整,令两列信号周期相等,相位相同,且信号的间隔 δ 远小于信号的周期 T .这样可以认为在测量同一目标时,利用可调谐范围较小的激光器对多次测量信号进行融合得到的测量分辨率,与利用可调谐范围更大的激光器进行测量得到的测量分辨率近似相等,以上证明了可以利用单个激光器进行多次测量再进行数据融合的方法提高调频连续波激光测距分辨率.

3 实验研究

3.1 单激光器复用测距实验

为了验证单激光器复用提高调频连续波激光测距分辨率的效果,搭建了如图 2 所示测量系统进

行测距实验,实验系统实物如图 4 所示.实验选用的可调谐激光器的中心频率为 1 550 nm,线宽为 300 kHz,调制范围可以达到 1 530 ~ 1 570 nm.辅助干涉系统为马赫增德尔干涉系统,两个干涉臂的光程差约为 20 m,用来对采集信号进行等光频间隔重采样,以消除由于激光器调制非线性导致的测量分辨率下降问题.

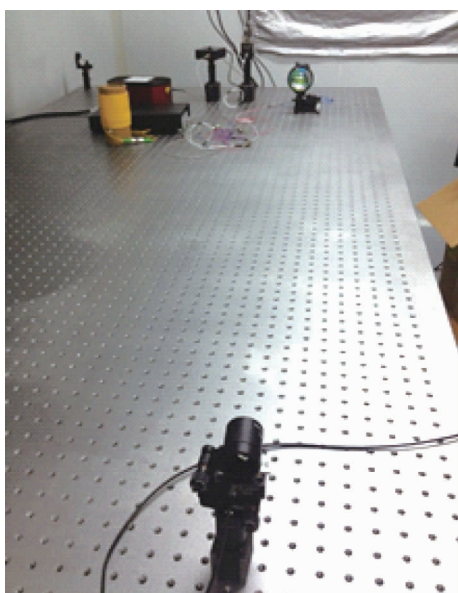


图 4 测距实验现场图

Fig. 4 Scene photos of the distance measurement experiment

在进行测量时,被测目标为距离准直透镜约 2.3 m 的角锥棱镜,调制速度设置为 8 nm/s,设置调制范围为 3 nm,进行十次测量,十次测量的结果分别进行单次、4 次、8 次、10 次数据融合,再进行 FFT 变换,得到的频域如图 5 所示,由于准直透镜与光环行器之间还存在一段光纤,导致两个干涉臂的光程差大于 2.3 m.图中黑色、绿色、红色和蓝色分别为单次、4 次、8 次和十次数据融合得到的测量结果,从图 5 中可以明显看出,频域图像的半高全宽随着数据融合次数的增加而变窄,表明测量分辨率随着测量次数的增加而提高.

将激光器调制范围设置为 30 nm 进行了对比实验,得到的结果如图 6 所示.比较图 5 中的蓝色曲线和图 6 中的曲线,可以看出两条曲线的半高全宽与中心位置近似相等,表明了对单目标进行测量时,单激光器复用法得到的测量结果与大范围调制激光测量得到的结果近似相等.

3.2 测量分辨率验证实验

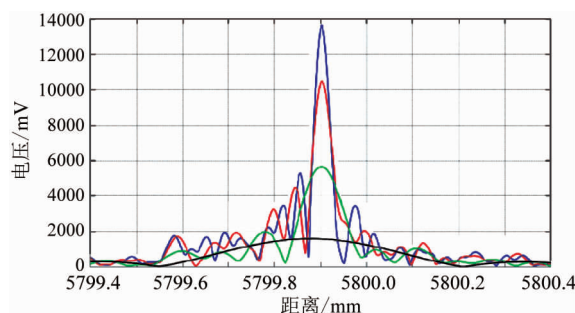


图 5 测距实验结果

Fig. 5 Distance measurement experiment results

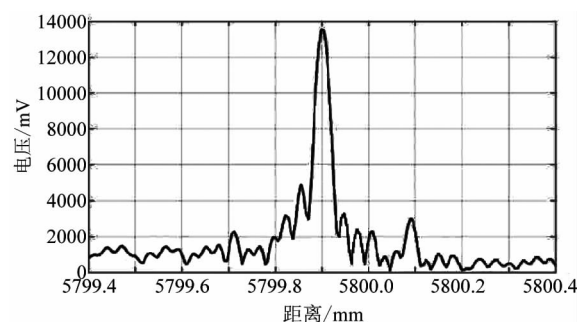


图 6 对比实验测距结果

Fig. 6 The result of contrast distance measurement experiment

为了验证单激光器复用法调频连续波激光测距的实际测距分辨率,进行了测距分辨率验证实验,测量系统结构仍然如图 2 所示,而将被测角锥棱镜固定在 PI 公司的压电纳米位移平台(型号 P-621.1,闭环行程 100 μm ,分辨率 0.4 nm)上,距离测距系统约 2.3 m.测量时激光器调制范围为 1 550 ~ 1 553 nm,每次测量将 10 次的测量数据进行融合得到最终的测距结果.在测量时首先对被测目标进行第一次测量,然后控制压电位移平台移动 50 μm ,进行第二次测量,两次测量的结果如图 7 所示.从图中可以很容易分辨出两次测量结果的波峰,证明了该系统可以分辨出被测目标 50 μm 的距离变化,大大超过激光器 3 nm 调制范围所对应的 400 μm 理论测距分辨率.通过多次重复实验均得到了相同的结果,进一步证明了该系统可以实现 50 μm 的测量分辨率.通过以上实验验证了单激光器复用法提高调频连续波激光测距测量分辨率的可行性.

4 结语

从调频连续波激光测距的原理出发,提出利用单激光器复用法来提高调频连续波激光测距测量分

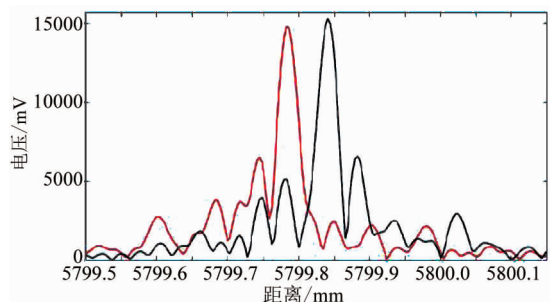


图7 测量分辨率验证实验结果

Fig. 7 The results of measuring resolution experiment

分辨率的方法,对该方法的进行了理论分析,并搭建了实验测距系统进行了实际测距实验.通过实验证明了利用调制范围较小的可调谐激光器对目标进行多次测量,对测得信号进行等光频间隔采样后再进行数据融合,每两列信号之间的间隔小于信号的周期,即可达到提高调频连续波激光测对单目标测量的测量分辨率.该方法克服了激光器调制范围对调频连续波激光测距测量分辨率的限制,实现了 $50\ \mu\text{m}$ 的测量分辨率,并且系统组成结构简单,容易实现,在激光测距、工业大尺寸测量、测绘、空间技术等领域具有广阔的应用前景.

References

- [1] TAN Shuo, GUO Wei. Research of microwave short-distance target range detection system [J]. *Ship Electronic Engineering* (谭朔, 郭伟. 调频连续波近程测距系统研究. *舰船电子工程*), 2007, **27**(4): 95 - 99.
- [2] LAU K, HOCKEN R J, HAYNENS L. Robot performance measurements using automatic laser tracking techniques [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 1985, **2**(3): 227 - 236.
- [3] DU Yu-Ming, ZHANG Rong-Quan, YANG Jian-Yu. Detection in millimeter lfmw radar target echo and acceleration-velocity estimation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜雨铭, 张容权, 杨建宇. 毫米波 LFMW 雷达加速运动目标回波检测与加速度-速度估计. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5): 348 - 351356.
- [4] WU Jun, HONG Guang-Lie, HE Zhi-Pin, et al. A coherent range and range-rate detection ladar with large ranging dynamic range and high-repetition-rate (I): Mechanism and performance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴军, 洪光烈, 何志平等. 一种大测距动态范围高重频相干测距测速激光雷达 (I): 体制及性能. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(6): 680 - 690.
- [5] JI Qing-Song, CHEN Jun, FAN Bin, et al. Application and Development of Automatic Assembly Technology for Large Aircraft [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology* (季青松, 陈军, 范斌等. 大型飞机自动化装配技术的应用与发展. *航空制造技术*), 2014; **75** - 78.
- [6] GAO Feng, GUO Wei-Zhong, SONG Qing-Yu, et al. Current Development of Heavy-duty Manufacturing Equipments [J]. *Journal Of Mechanical Engineering* (高峰, 郭为忠, 宋清玉等. 重型制造装备国内外研究与发展. *机械工程学报*), 2010, **46**(19): 92 - 106.
- [7] WANG Heng, SUN Ming. Application of laser tracker in composites parts measurement [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology* (王衡, 孙明. 激光跟踪仪在复合材料零件检测中的应用. *航空制造技术*), 2014, (23): 93 - 94.
- [8] ROOS P A, REIBEL R R, BERG T. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications [J]. *Optics Letters*. 2009, **34**(23): 3692 - 3694.
- [9] VASILYEV A, SATYAN N, XU S, et al. Multiple source frequency-modulated continuous-wave optical reflectometry: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(10): 1932 - 7.
- [10] BAUMANN E., GIORGETTA R. F., CODDINGTON I., et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave ladar for absolute distance measurements, *Optics Letters*, 2013, **38**(12): 2026.
- [11] ZHANG Kun-Feng, HONG Guang-Lie, XU Xian-Wen, et al. Realization method of range resolution of sub-millimeter in widely tunable laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张琨锋, 洪光烈, 徐显文等. 宽调谐激光雷达亚毫米级距离分辨的实现方法. *红外与激光工程*), 2012, **41**(10): 2674 - 2679.
- [12] WANG Lin-Chun, JIANG Yue-Song, XIN Yao et al. Analysis of nonlinear error in reference interferometer of frequency-sweeping Interferometry, Analysis of nonlinear error in reference interferometer of frequency-sweeping Interferometry [J]. *Journal of Optoelectronics. Laser* (王林春, 江月松, 辛遥等. 频率扫描干涉中参考干涉仪的非线性误差分析. *光电子·激光*), 2010, **21**(9): 1355 - 1358.
- [13] LV Tao, LIU Zhi-Gang. A range amplified absolute distance measurement system with laser frequency sweeping interferometry by optical fiber pairs [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (吕涛, 刘志刚. 一种光纤组量程扩增的激光频率扫描干涉绝对测距系统 [J]. *西安交通大学学报*), 2013, **47**(9): 77 - 82.
- [14] ZHAO Hao. Signal process and research on FMCW laser rader [D]. Har bin: Harbin Institute of Technology (赵昊. FMCW 激光雷达信号处理与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学), 2014.
- [15] SHI Gang, ZHANG Fu-Min, QU Xing-ua, et al. High-resolution frequency-modulated continuous-wave laser ranging for precision distance metrology applications [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(12): 122402 - 122402.