

高精度双干涉光路调频连续波激光绝对测距系统

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: 调频连续波激光测距具有无盲区、非接触测量和绝对测距等优点, 但是由于可调谐激光器光频率调制非线性对其测量精度的影响, 限制了调频连续波激光测距在精密测量领域中的应用。针对调频连续波激光测距中测距精度受到激光器光频率调制非线性的影响, 提出了双干涉光路调频连续波激光测距方法, 利用两个干涉系统得到的干涉条纹数量的比值计算得到被测目标的距离, 消除了激光器光频率调制非线性对测距精度的影响, 实现了 $65\ \mu\text{m}$ 的测量分辨率和 $15\ \mu\text{m}$ 的重复测量精度。该方法无需对激光的波长进行测量, 也无需对激光器进行锁频, 系统组成简单, 在工业大尺寸测量、空间技术、测绘等领域有着广阔的应用前景。

关键词: 调频连续波激光测距; 干涉测量; 绝对测距; 工业大尺寸测量

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0806001

Dual interferometry FMCW laser ranging for high precision absolute distance measurement system

Shi Guang, Wang Wen

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

Abstract: Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) laser ranging has many advantages such as no measuring blind area, noncontact measuring and absolute distance measurement. However the measuring precision of FMCW laser ranging is limited by the modulation nonlinearity of tunable laser. Hence, this technology is not widely used in the field of precision measurement. The precision of FMCW laser ranging was affected by the nonlinearity of laser frequency modulation. The method of dual interferometry FMCW laser ranging was proposed. The distance of the target was equal to the ratio of the interference fringe of two interference systems. Using the method, the influence caused by the nonlinearity of laser frequency modulation was eliminated. The resolution and repeatability precision of the system was $65\ \mu\text{m}$ and $15\ \mu\text{m}$ respectively. The system has the following advantages. There is no need to measure the wavelength of the laser or lock the frequency of laser. And the structure is simple. This system has a wide application prospect in industrial large scale measurement, space technology, and surveying.

Key words: FMCW laser ranging; interference measurement; absolute distance measurement; industrial large-scale measurement

收稿日期: 2015-12-10; 修订日期: 2016-01-02

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

作者简介: 时光(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事大尺度几何量测量方面的研究工作。Email: shiguang@hdu.edu.cn

通讯作者: 王文(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密测量、微纳测量与数字控制技术等方面的研究。

Email: wangwn@hdu.edu.cn

0 引言

激光测距技术具有高精度、高分辨率、探测距离远、抗干扰能力强等优点^[1],被广泛应用于现代工业、航空航天、军事、能源、测绘等领域。调频连续波激光测距技术是一种重要的干涉式绝对测距技术。较现在常用的激光测距技术有着许多优点,如:测量精度高于飞行时间法激光测距^[2];不存在相位法激光测距^[3]的相位缠绕问题;可实现绝对测距,比增量式激光干涉测距^[4]应用方便。

虽然调频连续波激光测距具有诸多优势,但是在早些年,由于受到激光器光频率调制范围与调制线性度的限制,导致其测量精度较低,应用价值并未得以充分体现。近些年随着可调谐激光器技术的发展,令高精度的调频连续波激光测距成为可能。在国外,利用反馈系统对激光器光频率调制精度进行实时控制^[5]、利用 FP 干涉仪对激光的波长变化进行测量等方法可以提高调频连续波激光测距的测量精度^[6-7],特别是美国国家标准技术研究院通过光学频率梳对激光器的光频率进行实时测量,在 1 m 的测量范围,系统测量的精度达到了 100 nm^[8]。在国内中国科学院上海技术物理研究所^[9]、北京航空航天大学^[10]、西安交通大学^[11]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 的目标量块进行测量,取得了 4 μm 的重复测量精度^[12]。在以往的研究中,存在测距系统组成结构复杂、对环境干扰十分敏感、只能用于实验室测量等问题,在实际应用在难以实现大范围高精度的测距。

文中从调频连续波激光测距的基本原理出发,提出一种双干涉光路测距系统和直接计数法消除激光器光频率调制非线性导致的测量精度下降问题,实现高分辨率的调频连续波激光绝对测距。系统结构简单,算法容易实现,十分有利于仪器化,应用前景广泛。

1 影响调频连续波激光测距测量精度的原因分析

调频连续波激光测距系统的基本组成为迈克尔逊干涉系统,如图 1 所示,在进行测距时,可调谐激

光器发射光频成三角波调制的激光,被分光棱镜分为两束分别进入干涉系统的测量臂和参考臂,经过测量臂的激光由被测反射镜反射后,与参考臂激光发生干涉,由光电探测器对干涉信号进行探测得到拍频信号,通过对拍频信号的频率进行测量得到被测目标的距离。基本测距公式为:

$$D = \frac{c \cdot T}{4 \cdot n \cdot B} f + D_{ref} \quad (1)$$

式中: D 为被测目标的距离; c 为光速; T 为激光器线性调制的周期; n 为空气折射率; B 为激光光频调制的范围; f 为干涉信号的频率; D_{ref} 为参考臂的臂长。

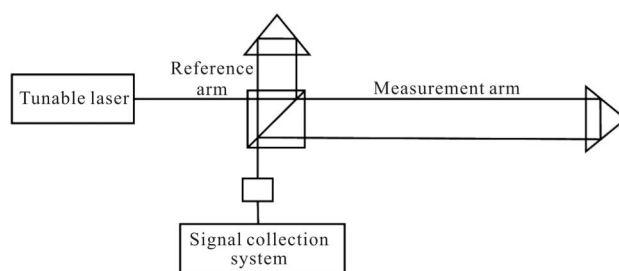


图 1 调频连续波激光测距基本原理

Fig.1 Basic structure of FMCW laser ranging system

由式(1)可以看出,在理想情况下,被测目标的距离正比于干涉信号的频率 f , f 的测量精度直接影响测距的精度。经过推导可以得到调频连续波激光测距的分辨率为:

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

由式(2)可以看出,通过增加激光器的光频调制范围能够提高测距分辨率,但是在激光器的频率调制过程中,由于可调谐激光器的频率调制线性度较差,导致拍频信号频率不稳定,测量精度大幅下降。特别是对于大范围的外腔式激光器,由于是利用电机与压电陶瓷(PZT)结合控制谐振腔长度与光栅的衍射角对激光波长进行调制,调制线性度难以控制^[13]。用迈克尔逊干涉系统直接进行测量得到的信号如图 2

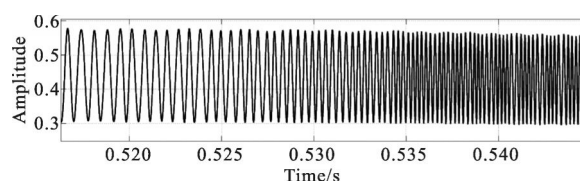


图 2 迈克尔逊干涉系统得到的干涉信号

Fig.2 Interference signal of Michelson interference system

所示,图中可以明显看出信号的频率很不稳定,从中无法准确得出被测目标的实际距离。

2 提高调频连续波激光测距分辨率的方法

双干涉光路调频连续波激光测距系统原理图如图 3 所示,该系统中基准干涉系统为马赫曾德干涉仪,其光纤的长度为测距系统的基准,需要对其进行温度控制和隔振。测量干涉系统为经过调整的光纤马赫曾德干涉系统,发射接收为同轴光。两个干涉系统得到的干涉信号经过光电探测器接收并放大后由计数器计数,经过上位机计算得到测距结果。

为了方便分析,频率线性调制激光的电场幅度(不考虑光的空间变化)可以表示为:

$$E_R(t) = A_R \cdot e^{i[\frac{1}{2}\Omega \cdot t + \omega_0 \cdot t + \varphi_0]} \quad (3)$$

式中: A_R 为参考光振幅(假设为固定值); ω_0 为频率调制开始时候的角频率; Ω 为角频率的变化率; φ_0 为初始相位。

干涉系统得到的干涉信号可以表示为:

$$I(\tau, t) = I_0 [1 + V \cdot \cos(\Omega \cdot \tau \cdot t + \omega_0 \cdot \tau + \frac{1}{2} \cdot \Omega \cdot \tau^2)] \quad (4)$$

式中: I_0 为平均光强; V 是光电探测器探测到信号的幅值; τ 为两干涉臂光程差导致的时间差。

由于 τ 取值很小,因此可以忽略 $1/2 \cdot \Omega \cdot \tau^2$ 这一项,式(4)可以化为:

$$I(OPD, t) = I_0 [1 + V \cdot \cos(2\pi(\frac{2B}{c} \cdot OPD \cdot \frac{t}{T} + \frac{OPD}{\lambda}))] \quad (5)$$

式中: $t \in [0, \frac{1}{2}T]$; OPD 为干涉系统两干涉臂的光程差; λ 为激光频率调制的起始波长。

可以证明两干涉臂的光程差为:

$$OPD = \frac{Nc}{nB} \quad (6)$$

式中: N 为探测得到干涉条纹数。

测量干涉系统和基准干涉系统具有相同的光源,可以得到:

$$OPD_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot OPD_1 \quad (7)$$

式中: OPD_1 为基准干涉系统两干涉臂的光程; N_1 为得到的干涉条纹数; OPD_2 为测量干涉系统的两干涉臂的光程差; N_2 为得到的干涉条纹数。

通过对两个干涉系统的干涉条纹数 N_1, N_2 测量

即可得到被测目标的距离,且激光器光频率调制非线性不会对测距精度产生影响。

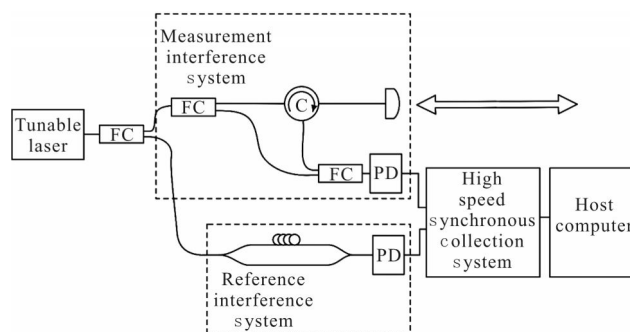


图 3 光路调频连续波激光测距系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of dual interferometer FMCW laser ranging system

3 实验

为了验证双干涉光路调频连续波激光测距系统的测距效果,搭建了如图 3 所示的测量系统,进行了测距分辨率的实验。由于该方法是干涉测量,要求两干涉臂的光程差小于激光器的相干长度,因此选用的激光器线宽为 300 kHz 的外腔式可调谐激光器,中心波长为 550 nm,可调谐范围为 1 530~1 570 nm,调制速度为 8 nm/s。被测目标为角锥棱镜,距离准直透镜约为 2 m,安装于 PI 公司的压电微位移平台上,该平台闭环行程为 100 μ m,分辨率为 0.4 nm。光环行器与准直透镜之间的光纤长度约为 3.5 m,基准干涉系统的两个干涉臂的光程差约为 30 m。实验现场图如图 4 所示,被测角锥棱镜如图 5 所示。

实验时,首先对被测目标进行 10 次测量,记录测量结果,控制微位移平台上移动 65 μ m,再进行 10 次测量。然后控制微位移平台回到初始位置,重复上述过程,经过测量得到的结果如图 6 所示。计算得

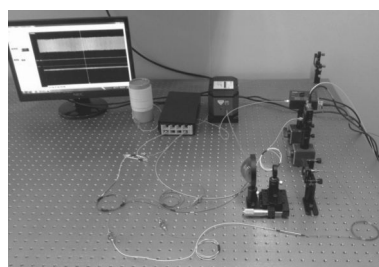


图 4 测距实验现场图

Fig.4 Scene photos of the distance measurement experiment

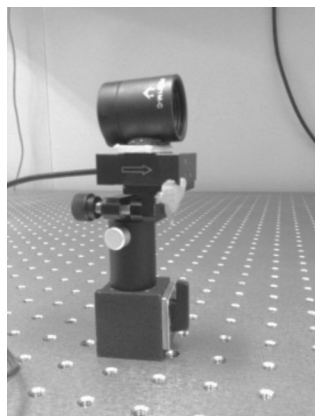


图 5 被测角锥棱镜

Fig.5 Measured cone prism

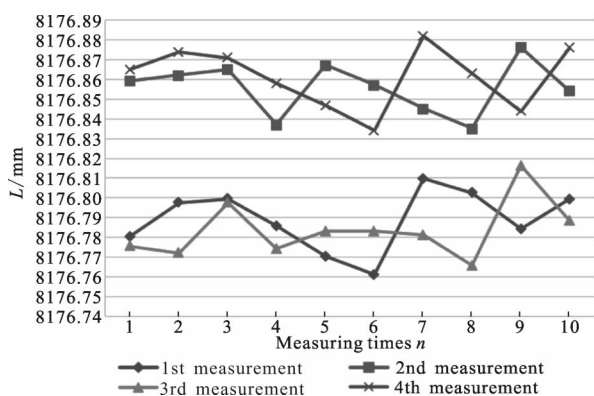


图 6 测距实验结果

Fig.6 Distance measurement experiment result

到两次往返测量的平均值分别为:8176.789,8176.856,8176.784,8176.861 mm。标准差分别为 15,13,14,15 μm 。

通过实验可以看出,利用该方法可以达到消除激光器光频率调制非线性对测距精度的影响,实现了 65 μm 的测距分辨率,测量标准差超过了 15 μm ,证明了该方法具有很高的分辨率和测量重复性。但是由于系统未经过准确的标定,测距结果还存在系统误差。由于测距实验在隔振光学平台实现,外界振动和温度变化对实验结果影响较小。但是该系统对振动和温度较为敏感,在实际测量中必须考虑振动和温度的影响,特别是基准干涉系统,光纤长度较长且为测距基准,须要进行隔振设计和温度控制。

4 结束语

文中从调频连续波激光的原理出发,提出了利用双干涉光路测距系统消除激光器光频率调制非

线性对测距精度影响的方法,搭建了实验测距系统,对安装在微位移平台上的角锥棱镜进行了绝对距离测量,测量分辨率可以达到 65 μm ,重复性精度达到了 15 μm 。双干涉光路调频连续波激光测距法在进行测量时无需对干涉信号的频率进行测量,并且消除了激光器的调制非线性对测距精度的影响。

参考文献:

- [1] Wu Tengfei, Liang Zhiguo, Yan Jiahua, et al. The progress on distance measuring technique with a femtosecond optical frequency comb [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011, 31(5): 41-44. (in Chinese)
武腾飞, 梁志国, 严家骅, 等. 飞秒光学频率梳测距技术的研究进展[J]. 计测技术, 2011, 31(5): 41-44.
- [2] Wu Gang, Li Chunlai, Liu Yinnian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2007, 26(3): 213-216. (in Chinese)
吴刚, 李春来, 刘银年, 等. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 213-216.
- [3] Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng. Phase-shift laser range finder receiver system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2377-2384. (in Chinese)
贾方秀, 丁振良, 袁锋. 相位法激光测距接收系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2377-2384.
- [4] Ji Lin, Hou Maosheng, Qiu Lirong, et al. Research of high-speed precision positioning system based on double-frequency laser interference[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(2): 156-161. (in Chinese)
季林, 侯茂盛, 邱丽荣, 等. 基于双频激光干涉反馈的快速精密定位系统[J]. 光学技术, 2015, 41(2): 156-161.
- [5] Roos P A, Reibel R R, Berg T. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3692-3694.
- [6] Cabral R, Abreu M, Rebordao J M. Dual-frequency sweeping interferometry for absolute metrology of long distances [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(8): 085601.
- [7] Cabral R, Abreu M, Rebordao J M. Absolute distance metrology for long distances with dual frequency sweeping interferometry [C]//XIX Imeko World Congress Fundamental & Applied Metrology Proceedings, 2009, 76(12): 1942-1947.

- [8] Baumann E, Giorgetta R F, Coddington I, et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave ladar for absolute distance measurements [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2026.
- [9] Zhang Kunfeng, Hong Guanglie, Xu Xianwen, et al. Realization method of range resolution of sub-millimeter in widely tunable laser radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2674–2679. (in Chinese)
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 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2674–2679.
- [10] Wang Linchun, Jiang Yuesong, Xin Yao, et al. Analysis of nonlinear error in reference interferometer of frequency-sweeping Interferometry [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(9): 1355–1358. (in Chinese)
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[J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1355–1358.
- [11] Lv Tao, Liu Zhigang. A range amplified absolute distance measurement system with laser frequency sweeping interferometry by optical fiber pairs [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 77–82. (in Chinese)
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.
- [12] Zhao Hao. Signal process and research on FMCW laser rader [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
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.
- [13] Wang Sijie, Liu Jianhui, Li Shichen. Research development of tunable laser of communication system [J]. *Optical Communication Technology*, 2003(4): 38–43. (in Chinese)
王思劼, 刘俭辉, 李世忱. 国内外通信用可调谐激光器研究进展[J]. 光通信技术, 2003(4): 38–43.