

# 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究\*

时光 张福民† 曲兴华 孟祥松

(天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2014年3月1日收到; 2014年4月17日收到修改稿)

大空间精密测量在重大装备制造、空间科技、国防工业等方面发挥着重要作用, 激光高精度绝对长度测量是大空间精密测量领域的重要研究课题. 调频连续波激光测距是近年来激光绝对测距研究的热点, 它克服了脉冲法测量分辨率低和相位法激光测距存在 $2\pi$ 缠绕模糊度问题的缺点, 有着测量精度高、量程大的优点. 本文研究了调频连续波激光测距的原理, 分析了影响其测距分辨率的主要原因, 证明了利用等光频间隔采样来抑制激光调制非线性对测距结果影响的可行性. 该方法可以提高测距分辨率, 且系统构成简单、实用性强. 搭建了光纤调频连续波激光测距系统, 并加入了辅助干涉光路对测量信号进行等光频间隔采样. 利用该系统进行了测距分辨率实验, 实验结果表明, 本系统测量分辨率可以达到 $50\ \mu\text{m}$ , 测量范围达到了 $10\ \text{m}$ .

**关键词:** 连续激光调频, 绝对测距, 干涉测量**PACS:** 42.79.Qx, 42.60.Fc, 42.62.Eh, 07.60.Ly**DOI:** 10.7498/aps.63.184209

## 1 引言

高精度绝对距离测量在精密探测、现代制造、三维形貌测量和空间探测等领域均有重要应用<sup>[1-5]</sup>. 而激光测距技术具有准直性好、受环境影响小、精度高等优点, 一直以来都是热门研究领域. 脉冲法和相位法<sup>[6]</sup>是激光任意绝对长度测量中常用的方法, 但是脉冲法测距的测量分辨力受限于电子器件的带宽, 分辨率仅为毫米量级, 而相位法测距存在 $2\pi$ 缠绕模糊度问题<sup>[7]</sup>. 调频连续波激光绝对测距可以有效地解决 $2\pi$ 缠绕模糊度问题, 且精度可以达到微米量级. 调频连续波测距也称频率扫描干涉测距, 20世纪80年代已被应用于调频连续波雷达<sup>[8]</sup>, 近年来随着激光技术的发展, 高精度调频连续波激光测距成为了研究热点. 2009年 Satyan 等<sup>[9]</sup>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, 测距分辨率达到了 $1.5\ \text{mm}$ . 2009年, Roos 等<sup>[10]</sup>利用光纤自混频技术对光源系统进行了改进, 并且

对距离 $1.5\ \text{m}$ 的目标进行测量, 测距分辨率达到了 $31\ \mu\text{m}$ . 2011年, Iiyama 等<sup>[11]</sup>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 $250\ \mu\text{m}$ , 测距范围为 $1\ \text{m}$ . 2013年, Baumann 等<sup>[12]</sup>利用光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 $6\ \text{nm}$ . 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.

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, 利用窄线宽<sup>[13]</sup>可调谐激光器, 本文设计了一种光纤双光路调频连续波激光测距系统. 利用参考干涉光路的信号作为时钟对测量光路的干涉信号进行采样, 对可调谐激光器的扫描线性度进行补偿, 大大提高了测距分辨率, 且目前试验测量范围可以达到 $10\ \text{m}$ , 还有进一步提高的空间, 系统构成简单.

\* 国家自然科学基金(批准号: 51327006, 51105274)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120032130002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn

## 2 测距原理

调频连续波激光测距系统的基本组成为迈克尔孙干涉光路, 其光源为可调谐激光器, 参考反射镜和被测目标分别位于双臂干涉光路的两臂. 如图 1 所示, 激光器发射的调制激光经过分光棱镜分为两束, 分别被参考镜和被测目标反射后, 再经过分光棱镜合为一束, 在光电探测器表面发生干涉.

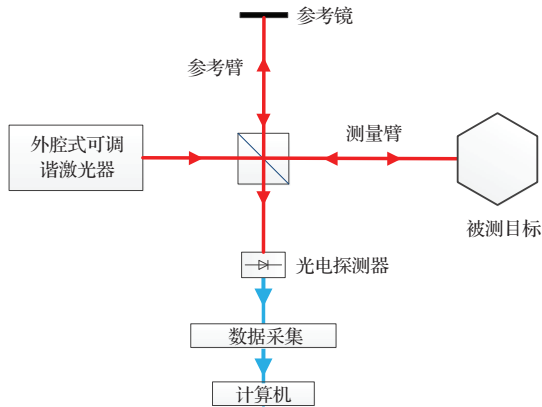


图1 调频连续波激光测距原理图

测量过程中系统参考镜与被测目标都固定不动, 对发射激光进行调制, 令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. 参考臂和测量臂的调制激光变化规律相同, 但是测量臂在时间上滞后  $\tau$ ,  $f$  为两路激光的差拍频率.  $f$  的频率大大低于光频, 可以利用光电探测器对干涉信号  $f$  进行探测. 干涉信号  $f$  可以由 (1) 式计算得到:

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

其中  $n$  为折射率,  $B$  为激光器调制范围,  $OPD$  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.

由 (1) 式可以得出被测目标的距离  $z$  为

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

从 (2) 式可以看出, 当激光器的调制速率恒定时, 测距分辨率  $\delta_z$  由频率分辨率  $\delta f$  决定:

$$\delta_z = \frac{T_m \cdot c}{4 \cdot n \cdot B} \cdot \delta f. \quad (3)$$

在实际测量过程中, 通常对采样信号进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 将时域信号转换到频域, 再进行频率测量, 进而得到

目标的距离. 经过推导可以很容易得到:

$$\delta_z = \frac{c}{2nB}, \quad (4)$$

由 (4) 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. 但在实际应用中, 拍频信号经过 FFT 后, 主瓣的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 代表了测距的分辨率. 许多因素都会令 FWHM 的宽度增加, 如激光调制线性度、振动、温度变化等, 这些因素中激光的调制线性度影响最为严重. 如果激光的调制线性度不理想, 导致得到的拍频信号频率不稳定, 从而令 FWHM 变宽, 降低测距分辨率.

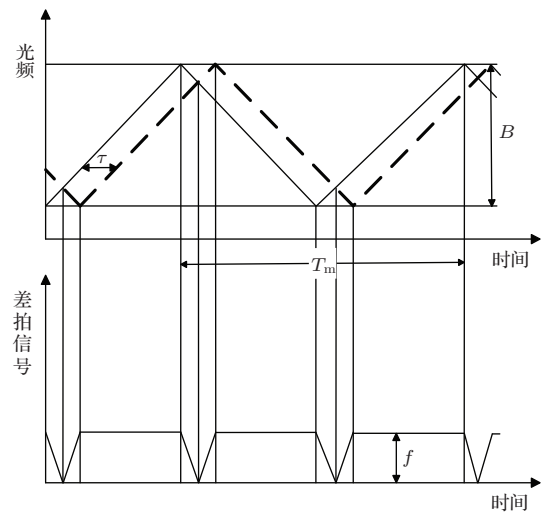


图2 调频连续波激光测距工作原理图

## 3 提高测距分辨率的方法

通常为了对信号的调制线性度进行补偿, 首先需要对调制信号进行实时探测. 但由于激光的频率很高, 而且调制速度很快, 无法对激光的光频进行直接测量. 为了对调制线性度进行补偿, 本文在测量干涉光路中增加了一个辅助干涉系统, 对测量光路获得的干涉信号进行等光频间隔采样, 从而补偿了调制的线性度.

为了方便描述光源的调制非线性, 用电场方程对激光进行描述:

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

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

相位分量可以表示为

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t \nu(u) du + \phi_0, \quad (6)$$

其中  $\phi_0$  为光源的初始相位 ( $t = 0$ ),  $\nu(u)$  为激光在  $u$  时刻的瞬时频率.

两束经过不同的光路光程差为  $OPD$  的激光, 到达光电探测器的时间差  $\tau$  为

$$\tau = \frac{OPD}{c}. \quad (7)$$

两路激光  $E_1(t)$  和  $E_2(t + \tau)$  如果偏振方向相同, 则在光电探测器表面发生干涉,  $E_1$  和  $E_2$  分别表示两束激光的强度, 干涉信号可以表示为

$$I(t) = \eta|E_1(t) + E_2(t + \tau)|^2, \quad (8)$$

$$I(t) = \eta[|E_1(t)|^2 + |E_2(t + \tau)|^2 + |E_1(t) \cdot E_2(t + \tau)^*| + |E_1(t)^* \cdot E_2(t + \tau)|], \quad (9)$$

$$I(t) = \eta E_1^2 + \eta E_2^2 + 2\eta E_1 E_2 \cos[\phi(t + \tau) - \phi(t)], \quad (10)$$

其中  $\eta$  为环境对光强的影响系数.

对  $\phi(t + \tau)$  进行关于  $t$  的傅里叶展开, 可以得到

$$\begin{aligned} & \phi(t + \tau) - \phi(t) \\ &= 2\pi\nu(t)\tau + 2\pi \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\tau^n}{n!} \nu^{(n-1)}(t), \end{aligned} \quad (11)$$

如果满足

$$\tau^2 \cdot \frac{d\nu(t)}{dt} \ll 1, \quad (12)$$

忽略 (11) 式中的二次项和高次项, 并将 (11) 式代入 (8) 式可以得到

$$I(t) = \eta E_1^2 + \eta E_2^2 + 2\eta E_1 E_2 \cos(2\pi\nu(t)\tau). \quad (13)$$

从 (13) 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. 用理想的线性信号对光频进行调制 (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, 导致了干涉信号在频域的谱线变宽, 降低测距分辨率. 加入反馈控制系统, 控制激光器的调制速率是提高测距分辨率最直接的方式. 但是激光器的反馈控制系统较为复杂, 高分辨率的实现难度大. 另外一种方法是在测量干涉光路中增加一个辅助干涉光路, 其光程差至少是测量干涉光路光程差的 2 倍以上, 对应的时间延迟为  $\tau_a$ . 将辅助干涉光路的拍频信号作为时钟信号, 对测量光路拍频信号进行采

样, 则其采样间隔为  $\Delta\nu = (2\tau_a)^{-1}$ . 等光频采样信号为

$$I_m(\nu) = \eta E_1^2 + \eta E_2^2 + 2\eta E_1 E_2 \times \sum_{n=k}^N \cos(2\pi\tau_m\nu) \delta(\nu - n\Delta\nu), \quad (14)$$

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:

$$\delta(\nu - n\Delta\nu) = \begin{cases} 1 & \nu = n\Delta\nu \\ 0 & \nu \neq n\Delta\nu \end{cases}. \quad (15)$$

由 (14) 式可以看出, 等光频采样信号为理想采样的余弦函数, 从而消除了调制的非线性对干涉信号的影响, 并提高了测量分辨率.

双光路调频连续波激光测距系统的原理如图 3 所示. 该系统由两个马赫-曾德尔干涉光路 [13,14] 组成, 上半部分为测量干涉光路, 下半部分为辅助干涉光路, 其光程差比被测目标距离准直透镜的距离长 2 倍以上. 为了简化系统组成, 减少光学器件带来的影响, 使用光纤搭建测量系统. 由于光纤的长度为测量基准, 因此在测量过程中, 必须令所有光纤的长度保持不变, 否则会对测量结果产生很大影响. 辅助光路和测量光路得到的干涉信号由两个型号相同的光电探测器接收, 经放大后被数据采集卡进行采样, 其中辅助光路的干涉信号作为时钟信号, 对测量光路的干涉信号进行采样, 得到的便是等光频间隔的采样信号, 从而补偿了激光器调制的线性度误差.

## 4 实 验

为了验证辅助光路对调制非线性的补偿效果, 并验证双光路调频连续波激光测距系统的测量分辨率, 搭建了如图 3 所示的测量系统, 并进行了测距分辨率的实验. 激光器的相干长度决定了最大测量范围, 为了满足大量程的要求, 选用线宽为 200 kHz 的可调谐激光器作为光源. 系统中辅助测量光路的参考延时长度为 40 m, 被测目标为角锥棱镜. 测量过程中, 激光器的调制速度为  $8 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 调制范围设置为 28 nm. 等时间间隔采样的测量光路的干涉信号和等光频间隔的干涉信号如图 4 所

示. 从图中可以明显看出, 由于激光器调制非线性的存在, 等时间间隔采样信号频率不稳定, 而等光频间隔采样信号的频率稳定很多. 为了更明显地看出两组信号的频域特性, 分别对两组信号进行FFT变换, 如图5和图6所示. 可以看出, 在频域中等光频间隔的采样信号的主瓣宽度要远远小于等时间间隔采样信号, 其测距分辨率达到了微米量级. 证明了利用辅助干涉光路对信号进行等光频间隔采样, 可以大大提高测距分辨率.

为了验证该系统的测距分辨率, 进行了进一步的测距分辨率实验. 首先将角锥棱镜固定在微位移平台上, 距离系统约10 m, 进行第一次测量. 然后控制微位移平台移动50  $\mu\text{m}$ , 进行第二次测量, 并对两次测量分别进行FFT变换. 图7为两次测量

结果的频域图像, 从图中可以很容易分辨出两次测量结果的主瓣, 证明了该系统对距离10 m的目标的测距分辨率可以达到50  $\mu\text{m}$ .

按照(4)式, 如果再增加调制范围 $B$ 可以达到更高的测距精度, 但是进一步实验表明, 继续增加调制范围并未提高分辨率. 这是由于环境的影响, 外界的震动和温度的变化导致光纤的长度发生变化. 辅助光路光纤长度最长, 受到外界影响更大, 导致延时时间 $\tau$ 在测量过程中发生变化, 从而导致对测量光路采样时并非等光频间隔, 令频域的主瓣信号变宽, 降低了频率分辨率. 为了进一步提高测量分辨率, 需要对光路进行进一步设计, 对系统进行隔震, 并对温度进行控制, 以保证系统光纤长度稳定不变.

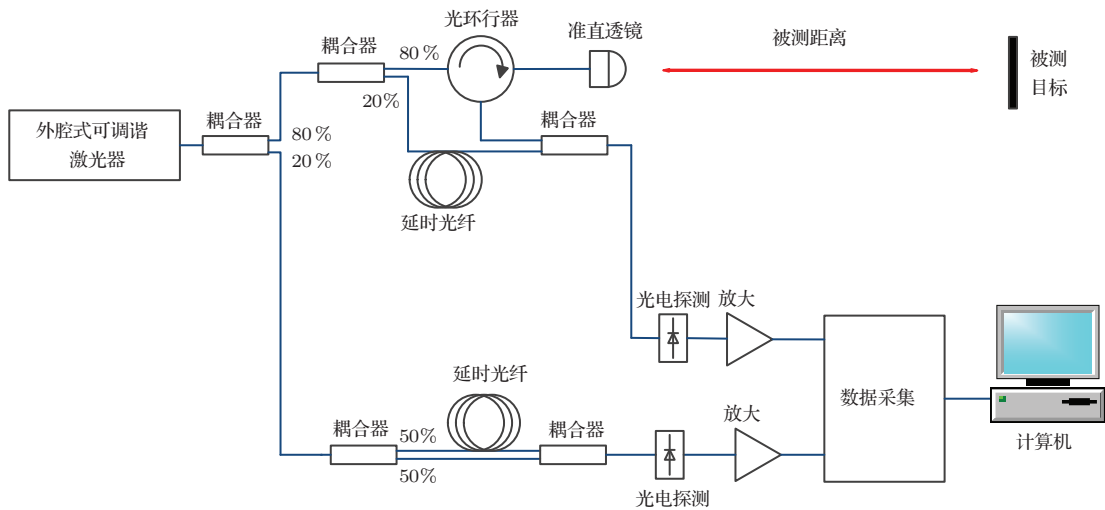


图3 双光路调频连续波激光测距系统原理图

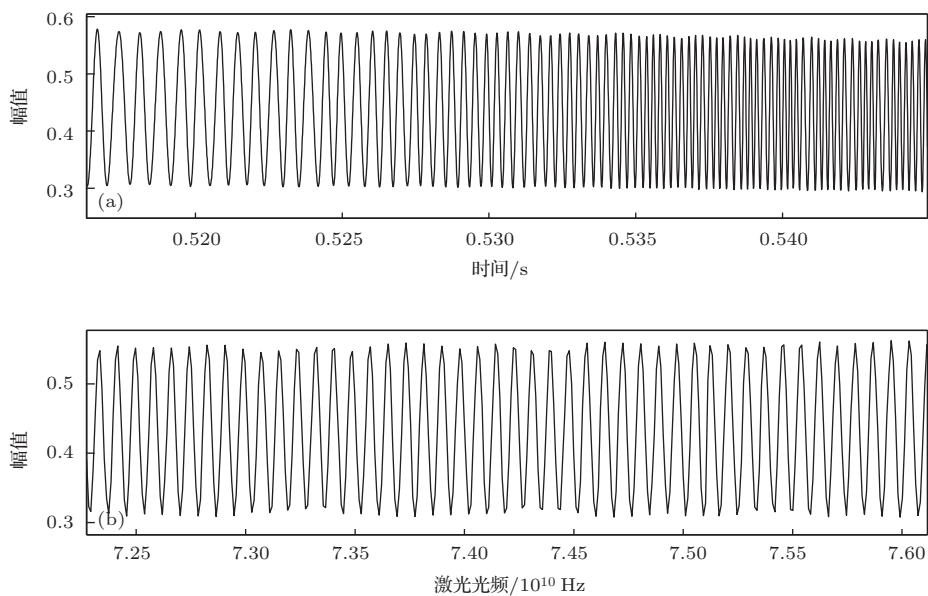


图4 系统时域采样信号 (a) 等时间间隔采样信号; (b) 等光频间隔采样信号

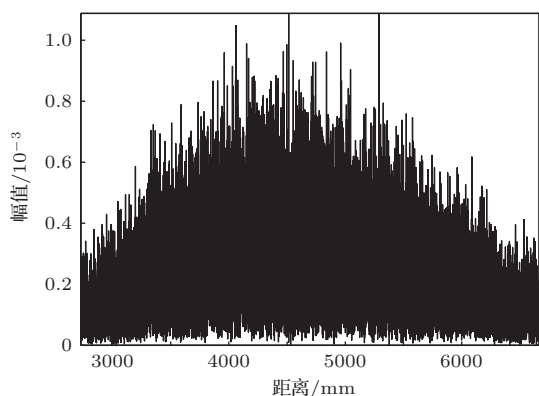


图5 等时间间隔采样信号频域图像

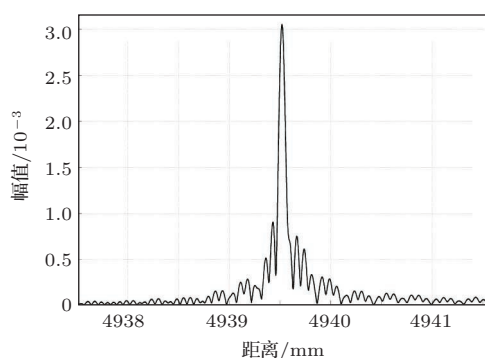


图6 等光频间隔采样频域图像

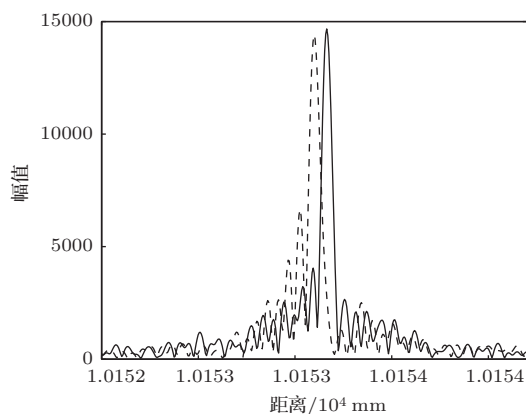


图7 系统测距分辨率

## 5 结 论

本文研究了调频连续波激光测距的原理, 分析了利用辅助干涉光路提高测距分辨率的原理, 并证明了该方法的可行性. 设计搭建了一种双光路光纤

调频连续波激光测距系统, 利用辅助干涉光路的干涉信号对测量光路的信号进行等光频间隔采样, 得到了理想的测距结果. 利用该系统进行了测距分辨率实验, 结果表明, 本系统的测距分辨率可以达到  $50 \mu\text{m}$ , 测量范围可以达到  $10 \text{ m}$ . 该方法利用可调谐激光器实现了任意长度的绝对测距, 且精度高、测距范围大, 在大尺度精密测量方面具有广泛应用前景, 如在重大装备制造、国防工业、空间探测等方面的应用.

## 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] Swinkels B L, Bhattacharya N, Braat J J M 2005 *Opt. Lett.* **30** 2242
- [3] Cabral A, Rebordão J 2007 *Opt. Eng.* **46** 073602
- [4] Xing S J, Zhang F M, Cao S Y, Wang G W, Qu X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 170603 (in Chinese) [邢书剑, 张福民, 曹士英, 王高文, 曲兴华 2013 物理学报 **62** 170603]
- [5] Qin P, Chen W, Song Y J, Hu M L, Chai L, Wang Q Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240601 (in Chinese) [秦鹏, 陈伟, 宋有建, 胡明列, 柴路, 王清月 2012 物理学报 **61** 240601]
- [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] Li Z D, Jiang Y S, Sang F, Wang L C, Deng S G, Xin Y, Guo J P 2011 *Acta Opt. Sin.* **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]
- [8] Zheng J 2004 *Appl. Opt.* **43** 4189
- [9] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, Leyva V, Yariv A 2009 *Opt. Express* **17** 15991
- [10] Roos P A, Reibel R R, Berg T, Kaylor B, Barber Z W, Babbitt W R 2010 *Opt. Lett.* **34** 3692
- [11] Iiyama K, Matsui S, Kobayashi T, Maruyama T 2011 *IEEE Photon. 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] Lin B, Liang S, Zhang C X, Lin W T, Li Q, Zhong X, Li L J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 124217
- [14] Hu Y M, Yang W L, Xiao X, Feng M, Li C H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 034205

# Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser\*

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

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

( Received 1 March 2014; revised manuscript received 17 April 2014 )

## Abstract

Large-scale high-accuracy measurement plays an important role in many applications, such as large-scale equipment manufacturing, space technology and national defense industry. High-accuracy absolute distance measurement by laser is an important research topic in the field of large-scale high-accuracy measurement. And frequency modulated continuous wave (FMCW) laser ranging is a hot point of research nowadays. Because this method is better than pulsed time-of-flight method in measurement resolution, and the problem of ambiguity in measurement, which is the main disadvantage of phase-related method, does not exist. In this paper, the principle of FMCW laser ranging and the main factors reducing the measurement resolution are analyzed. In order to improve the ranging resolution, the method using an auxiliary interferometer to sample the signal in equal intervals of optical frequency is employed. A dual interferometer FMCW laser ranging system is designed and the experiments are carried out. The experimental results show that the measurement resolution is 50  $\mu\text{m}$  at a distance of 10 m.

**Keywords:** lasers frequency modulated, absolute distance measurement, interferometry

**PACS:** 42.79.Qx, 42.60.Fc, 42.62.Eh, 07.60.Ly

**DOI:** [10.7498/aps.63.184209](https://doi.org/10.7498/aps.63.184209)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51327006, 51105274), 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)