

# 一种调频连续波干涉激光光源非线性校正方法

井李强, 郑刚\*, 张雄星, 孙彬, 白浪, 王欢

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对半导体激光光源连续调频时光学频率呈非线性变化的问题, 提出一种电流节点校正方法。建立激光器驱动电流节点与实际拍频信号极小值点位置的关系, 根据实际与理想信号极值点之间的位置偏差, 对电流节点参数进行补偿, 经过多次迭代实现激光器的调频非线性校正。通过搭建光纤调频连续波激光干涉测距系统, 利用电流节点校正法实现 DFB 半导体激光器的调频线性化输出, 并进行测距实验。结果表明, 该校正方法简单有效, 测距结果标准差小于  $11\ \mu\text{m}$ ,  $800\ \text{mm}$  测量范围内线性度达  $0.03\%$ , 可广泛应用于调频连续波干涉。

**关键词** 激光器; 调频连续波; 激光测距; 激光干涉; 非线性校正; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1114001

## Nonlinear Correction of Frequency-Modulated Continuous Wave Interferometric Laser Sources

Jing Liqiang, Zheng Gang\*, Zhang Xiongxing, Sun Bin, Bai Lang, Wang Huan

College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** A current node correction method is proposed herein to solve the nonlinear variation of optical frequency during continuous frequency modulation of semiconductor laser sources. First, the proposed method establishes the relationship between the laser drive current nodes and the position of the minimum points of the actual beat signal; then, the current node parameters are compensated according to the position deviation between these actual minimum points and the ideal points. After several iterations, the laser frequency modulation is nonlinearly corrected. A fiber-optic frequency-modulated continuous wave laser interferometric ranging system is realized, and the linearization output of the distributed feedback semiconductor laser is obtained via the proposed current node correction method to perform a ranging experiment. The results show that the proposed method is a simple and effective calibration method, and a standard deviation below  $11\ \mu\text{m}$  and a linearity of  $0.03\%$  within the measurement range of  $800\ \text{mm}$  are obtained. The proposed method can be widely used for frequency-modulated continuous wave interference.

**Key words** lasers; frequency-modulated continuous wave; laser ranging; laser interference; nonlinearity correction; Fabry-Perot interferometer

**OCIS codes** 140.3518; 280.3400; 120.2230

## 1 引 言

绝对距离测量被广泛应用于科学研究与工业生产。在众多测距方法中, 激光测距方法具有非接触、高精度、可实现大动态范围测量的特点, 被广泛应用于精密加工、三维形貌测量和空间探测等领域<sup>[1]</sup>。传统激光测距方法主要有脉冲法、激光三角法和相位法<sup>[2]</sup>。脉冲法受电子器件带宽限制<sup>[3]</sup>, 精度仅为毫米级; 激光三角法的工作距离小于  $1\ \text{m}$ , 难以满足大动态范围测量的需求; 相位法存在  $2\pi$  的周期性问

题<sup>[4]</sup>。而调频连续波(FMCW)干涉<sup>[5-7]</sup>测距作为一种新型相干探测技术, 在激光相干长度范围内能够实现高精度、高分辨率的绝对距离测量, 具有良好的应用前景。

在 FMCW 干涉测距技术中, 线性调频的优点是产生的拍频信号频率单一, 与距离呈线性关系, 可直接测量拍频信号的频率, 进而实现距离测量<sup>[5,8]</sup>。但在实际应用中, 线性调频产生的光学频率呈非线性变化, 所得拍频信号的频率非恒值, 系统的测量精度受到严重影响。1996 年, Iiyama 等<sup>[9]</sup>在 FMCW

收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-06-04; 录用日期: 2019-07-08

\* E-mail: zhengg@xatu.edu.cn

系统中引入含有参考干涉仪和相位比较器等结构的光电负反馈环路对激光器的频率进行非线性校正,测距系统空间分辨率由 12 mm 提高到 1.3 mm;2001 年, Schneider 等<sup>[10]</sup>利用校准干涉信号对激光器调频非线性进行补偿,测距精度达到 0.5 mm;天津大学的张福民等<sup>[11-14]</sup>在 FMCW 测距系统中加入辅助干涉仪,利用等光频间隔重采样技术对激光器调频非线性进行校正,提高了测距系统的分辨率。上述各种校正方法均能够提高系统的测距分辨率,但所需的辅助器件会引入额外噪声,且系统的复杂性也相应增加。

为实现激光器调频非线性校正,并保证系统的紧凑性,本文提出一种电流节点校正方法。首先,分析 FMCW 激光干涉测距原理;然后,建立拍频信号极小值点位置与激光器驱动电流节点之间的关系,提出驱动电流节点校正方法;最后,搭建 FMCW 激光干涉测距系统,验证该校正技术的有效性,实现待测目标的定点测量与直线测量。

## 2 测距原理

相比于零差干涉和外差干涉测量技术,FMCW 干涉技术可直接通过鉴别干涉拍频信号的频率实现绝对距离测量。图 1 所示为法布里-珀罗(F-P)干涉仪结构的 FMCW 干涉测距系统<sup>[15]</sup>。其中分布反馈式(DFB)半导体激光器为系统光源,利用电流调制出射连续调频激光,单模光纤将调频激光耦合进入光纤环形器 1 端口,并从 2 端口出射至光纤准直器;光纤准直器将传输光波耦合为空间光束并照射 F-P 腔(由部分反射镜与全反镜组成);部分反射镜反射光作为参考光,透射光透射至全反镜后原路返回作为信号光,当信号光与参考光再次相遇时发生干涉,产生拍频信号,并由光纤准直器耦合进入光纤中,从环形器 2 端口入射至 3 端口,再由光电探测器接收。

对激光器进行锯齿波调制,结果如图 2 所示,其中实线表示参考光的角频率,虚线表示信号光的角频率,点划线对应于所生成拍频信号的角频率。

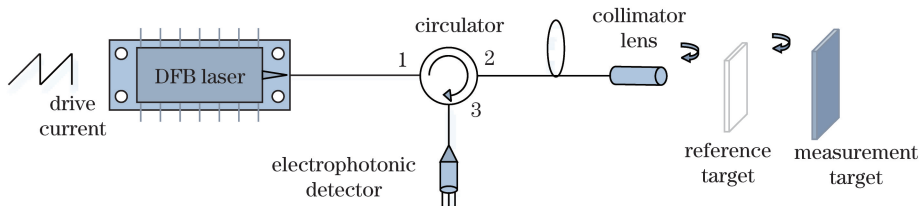


图 1 调频连续波干涉测距系统

Fig. 1 Frequency-modulated continuous wave interference ranging system

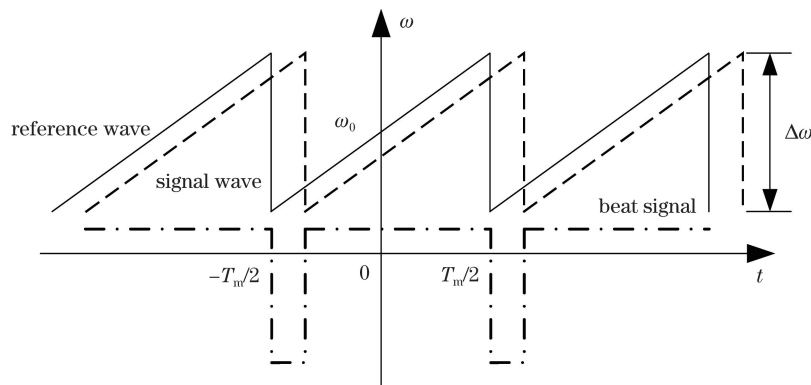


图 2 锯齿波调制时调频连续波干涉信号角频率关系

Fig. 2 Angular frequency relationship of frequency-modulated continuous wave interference signal under saw-tooth wave modulation

由于参考目标与待测目标之间存在距离,参考光和信号光之间会产生光程差  $O_{PD}$ ,即两信号之间存在时间延迟  $\tau$ 。参考光和信号光的波动函数分别为

$$E_1(t) = E_{01} \exp \left[ j \left( \frac{1}{2} \alpha t^2 + \omega_0 t + \phi_0 \right) \right], \quad (1)$$

$$E_2(\tau, t) =$$

$$E_{02} \exp \left\{ j \left[ \frac{1}{2} \alpha (t - \tau)^2 + \omega_0 (t - \tau) + \phi_0 \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $E_{01}$ 、 $E_{02}$ 分别为参考光和信号光的电场振幅; $\omega_0$ 为调制中心位置的角频率; $\alpha = \Delta\omega / T_m$ 为角频率调制率; $T_m$ 为调制信号周期; $\phi_0$ 为光源的初相位。

当参考光和信号光发生干涉时,干涉拍频信号光强  $I(\tau, t)$  的表达式为

$$I(\tau, t) = [E_1(t) + E_2(\tau, t)][E_1(t) + E_2(\tau, t)]^* = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\alpha\tau t + \omega_0\tau) = I_0 [1 + V \cos(\alpha\tau t + \omega_0\tau)], \quad (3)$$

式中:  $I_1 = E_{01}^2$ 、 $I_2 = E_{02}^2$  分别为参考光和信号光的光强;  $I_0 = I_1 + I_2$  为干涉拍频信号的平均光强;  $V = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$  为拍频信号的对比度; \* 表示光学干涉中的共轭关系。由参考光和信号光之间的光程差可知,拍频信号光强为

$$I(O_{PD}, t) = I_0 \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi\Delta\nu v_m O_{PD}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} O_{PD} \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi\nu_b t + \phi_{b0})], \quad (4)$$

式中:  $\nu_b = \Delta\nu v_m O_{PD} / c$  为干涉拍频信号的频率;  $\Delta\nu$  为光学频率调制范围;  $v_m$  为调制信号的频率;  $c$  为光速;  $\phi_{b0}$  为拍频信号的初相位;  $\lambda_0$  为光波的中心波长。则有

$$O_{PD} = \frac{c\nu_b}{\Delta\nu v_m}. \quad (5)$$

由(5)式可知,测得拍频信号的频率  $\nu_b$  后,即可实现待测目标距离测量。

### 3 调频非线性校正方法

DFB 半导体激光器具有动态单纵模窄线宽输出以及在高速动态调制下谱线展宽小的优点,且可通过简单的电流注入方式实现激光器的连续调频,因此,常将其作为 FMCW 干涉系统的光源。理想情况下,采用线性插值方式产生线性变化的驱动电流,对激光器频率进行连续调制时,可得到理想的光波信号与拍频信号,如图 3 所示。

对激光器的光频进行线性调制时,驱动电流  $i$  随时间  $t$  呈线性变化,如图 3(a)所示。假设驱动电流波形插值节点个数与拍频信号极小值点数  $n$  一一对应,如图 3(a)和图 3(c)中实心圆点所示,则相邻电流节点对应的电流调制周期为

$$t_m = T_m / (n - 1). \quad (6)$$

当电流调制周期内角频率调制率  $\alpha$  不变时,如图 3(b)所示,理想情况下,相邻电流节点对应的光学角频率调制范围满足

$$B = \Delta\omega / (n - 1), \quad (7)$$

式中:  $\Delta\omega$  表示一个调制周期内光学角频率调制范围,对应产生的理想拍频信号周期为  $t_b = 1/\nu_b$ ,如图 3(c)所示。由于半导体激光器调谐机理以及内

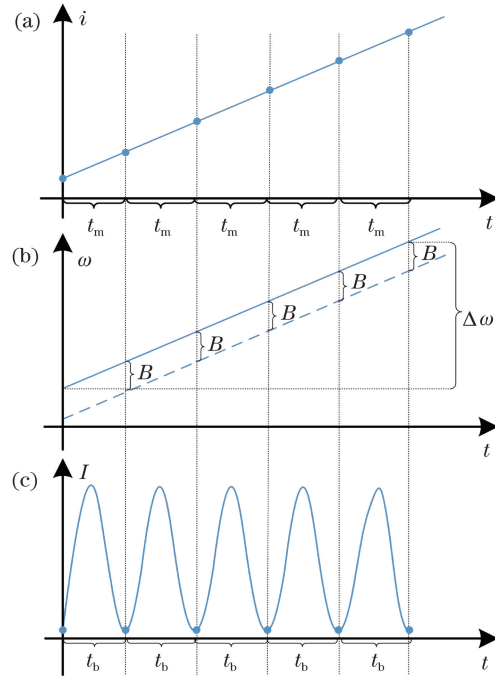


图 3 线性电流调制下的理想信号。(a)线性调制电流波形; (b)理想光波信号角频率; (c)理想干涉拍频信号

Fig. 3 Ideal signals under linear current modulation. (a) Linearly modulated current waveform; (b) angular frequency of ideal optical signal; (c) ideal interference beat signal

部结构等因素,激光器的光频输出会出现非线性现象,导致拍频信号的周期(频率)不一致,如图 4(a)所示,拍频信号的频率存在多个值,因此降低了测量系统的分辨率。

基于上述问题,本文提出一种电流节点法。首先,分析实际拍频信号,将难以观测到的动态光频非线性问题转化到拍频信号;然后,调整激光器的驱动电流节点,通过电流预校正,使实际拍频信号频率趋于一致,即实现激光器的调频非线性校正。详细步骤如下:

1) 调整待测目标位置,使产生的拍频信号极小值点个数与驱动电流波形插值节点个数一致,设置一个调制周期内的电流插值点数与信号采样点数相同。

2) 判断实际拍频信号极小值点位置(可采用离散采样点序号表示,如  $m_1, m_2, \dots, m_5$ ),根据理想信号极值点均匀分布的特点,计算此刻理想极小值点位置  $m_{s1}, m_{s2}, \dots, m_{s5}$ ,若光频出现非线性变化,则实际拍频信号各极值点与理想极值点之间存在偏差  $\Delta m_i$ ,即有

$$\begin{cases} \Delta m_1 = m_1 - m_{s1} \\ \Delta m_2 = m_2 - m_{s2} \\ \vdots \\ \Delta m_5 = m_5 - m_{s5} \end{cases} \quad (8)$$

3) 保证各注入节点处电流大小保持不变,相邻节点光频调制范围  $B$  固定不变,  $\Delta v$  也保持不变,即当实际拍频信号频率小于理想频率时,极值点位置偏差  $\Delta m_i$  为正,增大调制信号频率  $\nu_m$ ,可以减小对应电流节点间的调制周期  $t_m$ ;相反地,当拍频信号频率偏大时,增大调制周期  $t_m$ 。

4) 调整激光器驱动电流节点,改变各离散点对应的调制周期  $t_m$ ,利用信号采样点与驱动电流在时间轴上的对应性,将  $\Delta m_i$  作为补偿量对驱动电流节点  $\Delta t_i$  进行补偿,然后对电流节点进行线性插值,可得到校正后的驱动电流波形,如图 4(c)所示。

由于激光器调频的复杂性,每个电流节点对应的补偿系数有所不同,因此需要实时监测拍频信号,多次迭代,并将校正后的电流波形反馈到调频连续波干涉系统,逐渐逼近线性化调频。电流节点越多,即对应拍频信号极值点越多时,该方法校正后的电流波形更加平滑,激光器的调频非线性校正也更彻底。

### 4 实验验证与分析

为验证电流节点校正法对调频非线性校正的有效性,搭建如图 5 所示的 FMCW 干涉测距系统。该系统主要包括光学干涉系统、调制信号发生系统、信号采集与处理系统。光学系统采用 F-P 干涉仪结构,选用中心波长为 1550 nm 的 DFB 半导体激光器作为光源;调制信号发生系统由 STM32F407 芯片的数模转换(DAC)模块与压控电流源电路构成,采用线性插值方式产生调制频率为 100 Hz 的锯齿

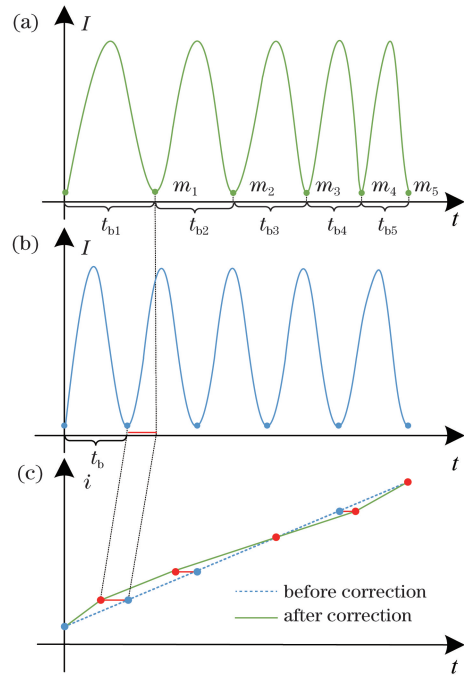


图 4 利用电流节点校正方法获得的信号。(a)实际测量的拍频信号;(b)理想拍频信号;(c)非线性校正前后的电流波形

Fig. 4 Signals obtained by current node correction method. (a) Actual measured beat signal; (b) ideal beat signal; (c) current waveform before and after nonlinear correction

波电流信号,并对激光器频率进行线性调制;信号采集与处理系统由放大滤波电路和芯片的模数转换(ADC)模块构成,每个周期拍频信号采样点数为 10000,利用运算处理单元对拍频信号进行分析与解调。为减小调制电流突变引起严重的激光调频非线性,锯齿波下降沿具有一定坡度。另外,采用温控电路对激光器的工作温度进行控制,以减小环境温度及激光器自身温度变化对激光器中心波长的影响。

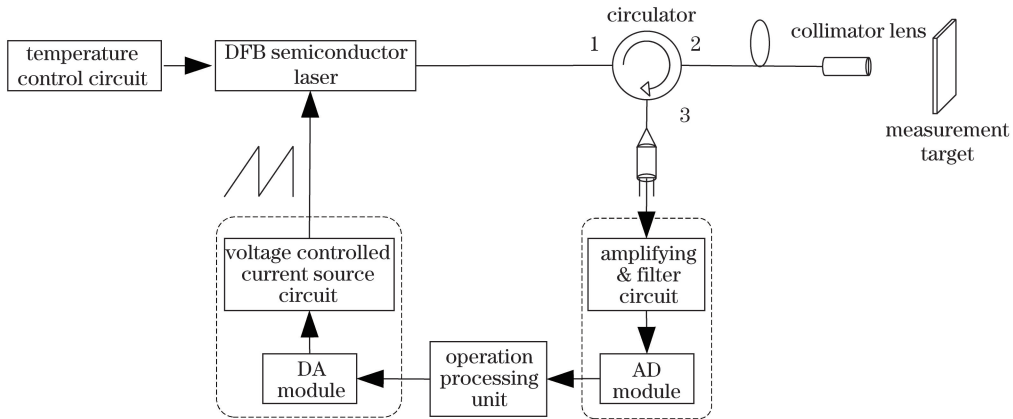


图 5 调频连续波干涉测距系统

Fig. 5 Frequency-modulated continuous wave interference ranging system

如图 6 所示,当电流调制率不变时,受激光器光频调制非线性影响,所得拍频信号的周期不一致。利用电流节点法对激光器的调频非线性进行校正,校正后的调制电流波形和拍频信号如图 7 所示,待激光器稳定之后,拍频信号周期基本一致,可对信号进行“掐头去尾”处理。

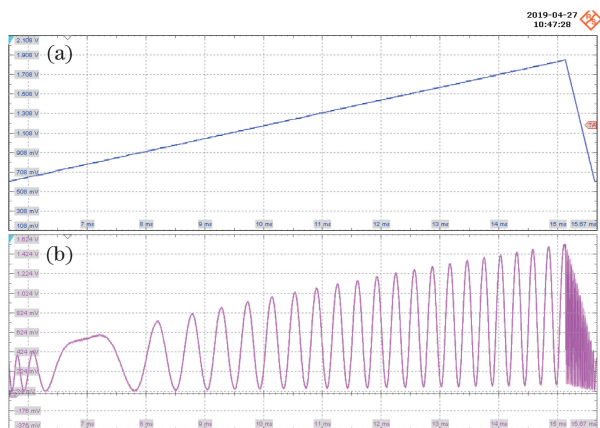


图 6 线性锯齿波电流调制波形与对应拍频信号波形。  
(a) 调制波形; (b) 拍频信号波形  
Fig. 6 Linear saw-tooth current modulation waveform and beat signal. (a) Modulation waveform; (b) beat signal

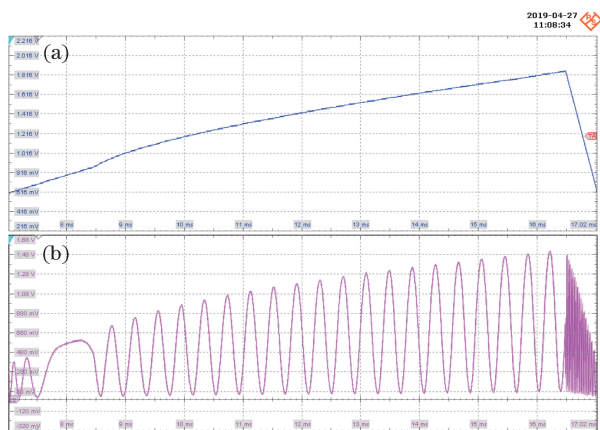


图 7 非线性校正后的电流调制波形与对应拍频信号波形。  
(a) 调制波形; (b) 拍频信号波形  
Fig. 7 Nonlinearly corrected current modulation waveform and beat signal. (a) Modulation waveform; (b) beat signal

将一个调制周期内采集的 2001~9000 点之间的拍频信号作为有效信号,对比校正前与校正后拍频信号的极小值点的位置分布,结果如图 8 所示。可明显看出,校正前拍频信号受激光器调频非线性影响严重,极值点分布呈非线性,校正后的信号极值点呈线性分布。对拍频信号进行傅里叶变换,结果如图 9 所示。其中图 9(b)所示为校正后的拍频信

号频谱,其频谱展宽明显小于校正前的拍频信号频谱宽度[图 9(a)],该结果验证了采用电流节点校正法可实现 DFB 半导体激光器的调频非线性校正。

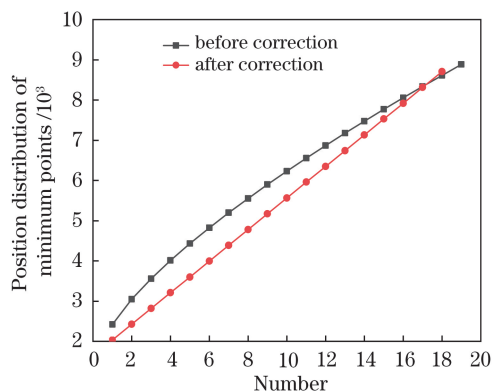


图 8 校正前后拍频信号极小值点位置分布  
Fig. 8 Position distribution of minimum points of beat signals before and after correction

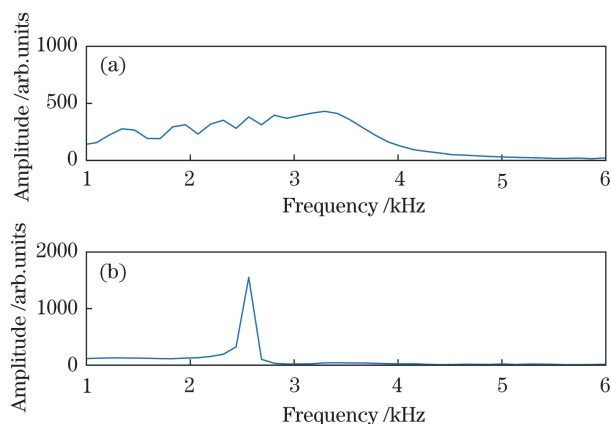


图 9 校正前后拍频信号的频谱图。  
(a) 校正前; (b) 校正后

Fig. 9 Spectrograms of beat signals before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

利用调频非线性校正后的 FMCW 干涉系统进行测距实验。将系统安装于气浮光学平台,利用防风罩保护被测光路,避免环境振动及空气扰动对测量结果造成影响。测量定点目标的距离,每秒记录一次测量结果,测量时间共计 1000 s,测量结果如图 10 所示。同一条件下对同一目标进行多次测量,测量结果的标准差为 11  $\mu\text{m}$ ,表明该测距系统具有较高的稳定性。

利用 Thorlabs 公司生产的直驱线性平移台(行程为 600 mm,轴向精度为  $\pm 12 \mu\text{m}$ ,双向可重复性为  $\pm 0.25 \mu\text{m}$ )进行线性度与重复性实验。为保证系统结构紧凑,将参考目标和光纤准直器粘接在一起,并固定于平移台一侧,将待测目标(全反镜)安装在

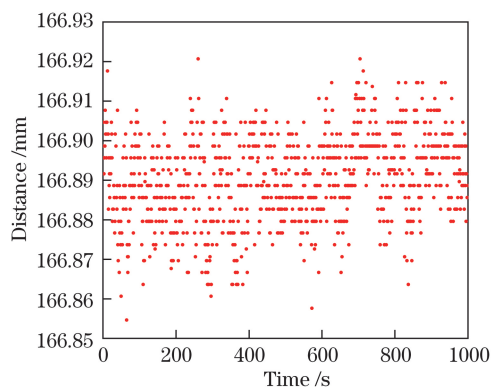


图 10 定点目标测量结果

Fig. 10 Measurement results of fixed target

平移台滑块上,待测目标初始位置距离参考目标 200.525 mm。利用平移台控制软件改变目标位置,在位台上 0~600 mm 范围内每移动 50 mm 记录一次测量结果,再反向移动并测量,进行两次重复实验,测量结果如图 11 所示。以平移台性能参数作为标准值,4 组测量结果的线性度分别为 0.03%、0.02%、0.03%和 0.02%,表明该测距系统具有较好的线性度;4 组测量结果的曲线基本重合,表明系统具有良好的重复性。

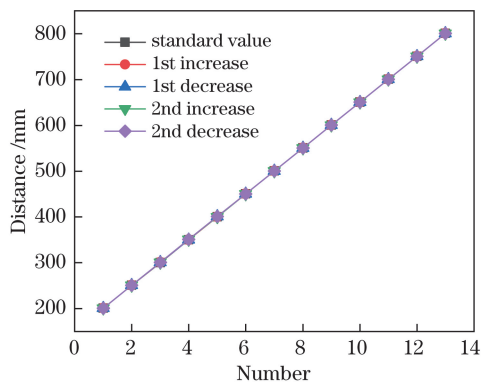


图 11 测距系统的线性度与重复性测量

Fig. 11 Linearity and repeatability measurement of ranging system

## 5 结 论

针对调频连续波干涉技术中激光器调频非线性问题,提出一种电流节点校正法。通过分析拍频信号,建立拍频信号极小值点位置与电流节点之间的关系,直接调整激光器驱动电流波形,以校正激光器调频非线性。搭建了 F-P 干涉仪结构的光纤式调频连续波干涉测距系统,利用所提方法实现了激光器的线性调频,并利用所设计系统进行了测距实验,测量结果的标准差小于 11  $\mu\text{m}$ ,800 mm 范围内线性度达 0.03%。实验结果表明,所提方法能够实现

调频激光的非线性校正,为解决调频连续波技术中调频非线性问题提供了新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Ma L Q, Wang L D, Jin S Y, *et al.* Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2006, 26(6): 1-5.  
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*, 2006, 26(6): 1-5.
- [2] Berkovic G, Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(4): 441-471.
- [3] Wen X, Deng J H, Li Y Q. Data-processing of high accuracy pulse laser range measurement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(s2): 150-153.  
文暄, 邓甲昊, 李月琴. 脉冲激光高精度测距的数据处理方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(s2): 150-153.
- [4] Xiao B. Methods for laser distance measurement[J]. *Geospatial Information*, 2010, 8(4): 162-164.  
肖彬. 激光测距方法探讨[J]. *地理空间信息*, 2010, 8(4): 162-164.
- [5] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [6] Zheng J. Coherence analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3681-3687.
- [7] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(12): 2723-2730.
- [8] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(12): 124404.
- [9] Iiyama K, Wang L T, Hayashi K I. Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(2): 173-178.
- [10] Schneider R, Thurmel P, Stockmann M. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 33-37.
- [11] Shi G, Zhang F M, Qu X H, *et al.* Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184209.  
时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184209.

- [12] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, *et al.* Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (11): 1104002.  
吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104002.
- [13] Shi C Z, Zhang F M, Pan H, *et al.* Distance measurement technique of large bandwidth laser frequency modulated continuous wave under sinusoid frequency modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201002.  
史春钊, 张福民, 潘浩, 等. 正弦调频下大带宽激光调频连续波测距技术[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201002.
- [14] Zhang T, Qu X H, Zhang F M. Laser frequency modulated ranging method based on triggering resample from outside clock signal[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0428003.  
张桐, 曲兴华, 张福民. 基于外部时钟信号触发重采样的激光频率调制测距方法[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0428003.
- [15] Zheng G, Gao M, Liu W G, *et al.* Frequency modulated continuous wave laser interference fiber displacement sensor and its displacement detection method: 201711418334.0[P]. 2018-05-18.  
郑刚, 高明, 刘卫国, 等. 一种调频连续波激光干涉光纤位移传感器及其位移检测方法: 201711418334.0 [P]. 2018-05-18.