

# 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量

井李强, 郑刚\*, 孙彬, 王欢, 白浪

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 调频连续波干涉技术对运动目标实时测距时,引起的多普勒效应会导致测量结果存在偏差。针对此问题,提出对激光光源的光学频率进行三角波调制的方法。在一个调制周期内产生两个调频方向相反的频率扫描信号,利用多普勒效应在两个调频方向上的频移量互为相反,可消除多普勒影响。实验结果表明:基于频率为 2 Hz、幅度为 15.57  $\mu\text{m}$  的单方向运动,三角波调制能够克服多普勒频移产生的 5 mm 测量偏差,目标距离测量结果标准差达 0.035 mm;实现 800 mm 测量范围内,速度为 1 mm/s 的运动目标距离测量,具有良好的线性度;在 800 mm 处实现的测量速度最大可达 9 mm/s,最小相对误差可达 0.067%。该方法可实现运动目标距离的实时跟踪测量,有利于调频连续波干涉测距技术的广泛应用。

**关键词** 测量; 调频连续波; 激光测距; 多普勒测速; 运动目标; 激光干涉; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1204001

## Measurement of Distance to Moving Target Using Frequency-Modulated Continuous-Wave Interference Technique

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

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

**Abstract** When a frequency-modulated continuous-wave interference technique is used to measure the distance to a moving target in real time, the Doppler effect causes deviations in the measurement results. To solve this problem, we propose a method that employs triangular wave modulation on the optical frequency of the laser light source. By generating two frequency-swept signals with opposite frequency-modulation directions in one modulation period, the Doppler effect can be eliminated using the opposite frequency shifts between the two frequency-modulation directions. Experimental results show that triangular wave modulation at a frequency of 2 Hz and an amplitude of 15.57  $\mu\text{m}$  can overcome a 5-mm measurement deviation caused by the Doppler shift for single-direction motion; the standard deviation of the target distance measurement results is 0.035 mm. Simultaneously, we realize a distance measurement for a target moving with a velocity of 1 mm/s over a measurement range of 800 mm with good linearity. This technique also achieves a speed measurement of up to 9 mm/s at 800 mm, and the minimum relative error can reach 0.067%. The method can be used for real-time tracking measurement of the distance to the moving target, and it is useful for a wide range of applications of frequency-modulated continuous-wave interference-ranging technology.

**Key words** measurement; frequency-modulated continuous wave; laser ranging; Doppler speed measurement; moving target; laser interference; Fabry-Perot interferometer

**OCIS codes** 120.3180; 120.2230; 280.3400; 140.3518

## 1 引言

绝对距离测量在现代工业和科学研究中具有重要的作用<sup>[1]</sup>。因激光具有单色性好、能量高、准直性好等优点,多种激光测距技术应运而生<sup>[2]</sup>。传统的

激光测距技术主要有激光三角法、脉冲法和相位法。调频连续波(FMCW)干涉测距<sup>[3-6]</sup>作为一种新型相干探测技术,结合了光学干涉和无线电雷达技术的优点,通过向待测目标发射频率连续调制的激光,使由目标点反射的信号光与参考光发生干涉,并对干

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-07-11; 录用日期: 2019-07-29

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

涉产生的拍频信号频率进行解调,即可实现高精度、大动态范围的绝对距离测量,因此该技术成为近年来的研究热点。

在实际应用中,当对运动目标进行实时跟踪测量时,拍频信号会产生多普勒频移现象,导致测距结果产生偏差。对此,国内外学者提出了多种消除和补偿多普勒效应的方法。2004年,加拿大学者 Zheng<sup>[3]</sup>理论分析得出利用三角波调制可消除多普勒影响,但该文献缺乏实质性实验报道。2012年, Kakuma 等<sup>[7]</sup>搭建了含有参考干涉仪的 FMCW 干涉系统,分别对两个垂直腔面发射激光器以不同的扫频方向进行光频调制,通过平均两个拍频信号的相移消除了偏移误差,使目标运动 0.37 mm 时,测量误差由 0.69 mm 减小到 0.018 mm。陶龙等<sup>[8]</sup>对可调谐外腔半导体激光器进行三角波调制,根据由振动引起一正一反的相位差变化特点,通过平均两个方向上的测距结果,测量标准差由 51.9  $\mu\text{m}$  减小到 8  $\mu\text{m}$ ,但未对跟踪目标镜进行动态测量。刘国栋等<sup>[9]</sup>对外腔调频激光器进行锯齿波调制,将交叠分时 Chirp Z 变换与卡尔曼滤波方法相结合,对测距值进行状态估计,测量标准差由 185.4  $\mu\text{m}$  降低到 9  $\mu\text{m}$ 。李雅婷等<sup>[10]</sup>提出一种四波混频效应的振动补

偿方法,该方法产生与原频率扫描信号方向相反的信号,通过仿真研究表明,测量标准差由 1.062 mm 减小到 29  $\mu\text{m}$ 。

本文对 FMCW 干涉测距原理进行研究,分析了多普勒频移对测距的影响。对分布反馈(DFB)半导体激光器的光频进行三角波调制<sup>[3]</sup>,分析了多普勒效应消除原理;进一步理论分析了运动目标的距离-速度解耦原理,同时利用数字鉴频方法实现信号解调。此外,利用电流节点校正法实现激光器的调频非线性校正,通过搭建光纤 FMCW 干涉测距系统,实现了运动目标的距离-速度测量。

## 2 基本原理

### 2.1 测距原理

图 1 为法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪结构的 FMCW 干涉测距系统<sup>[11]</sup>。对 DFB 半导体激光器的频率进行连续调制,使其产生连续调频激光,并由光纤环形器耦合进光纤准直器后,将传输光耦合为空间光束,进而平行出射,照射 F-P 腔(F-P 腔由部分反射镜与全反射镜组成),经过不同光路的参考光与信号光相遇发生干涉,产生的干涉拍频信号再次耦合进入光纤环路,并由光电探测器接收。

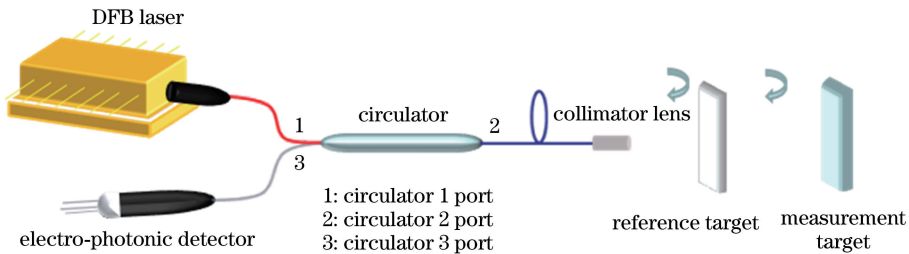


图 1 FMCW 干涉测距系统示意图

Fig. 1 Schematic of FMCW interference-ranging system

对半导体激光器的光频进行线性调制的优势在于:当待测目标固定不变时,能产生频率单一、与待测距离呈线性关系的余弦信号<sup>[3]</sup>。通过对该余弦信号频率解调,可实现距离测量。但由于激光器调谐机理及内部结构等因素,利用改变注入电流的方式对激光器进行线性调频时,无法产生完全线性变化的光频,这就导致拍频信号频谱展宽,直接降低了系统的测量分辨率<sup>[12]</sup>。因此,为避免调频非线性对测量结果产生影响,利用电流节点校正法进行调频非线性校正。先通过对拍频信号的特征点进行分析,然后对激光器注入电流波形的对应插值节点参数进行补偿,以达到改变注入电流的目的。通过电流预校正的方式,能实现激光器调频线性化输出。

若对激光器进行锯齿波调制,干涉光波与拍频信号角频率如图 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,点划线表示所生成拍频信号的角频率。

图 2 中, $t$  表示时间, $\omega$  表示角频率。由于参考光与信号光存在光程差  $O_{PD}$ ,二者之间存在时间延迟  $\tau$ 。当参考光和信号光发生干涉时,干涉拍频信号光强表达式  $I(\tau, t)$  为

$$I(\tau, t) = I_0 [1 + V \cos(\alpha t + \omega_0 \tau)], \quad (1)$$

式中: $I_0 = I_1 + I_2$  为干涉拍频信号的平均光强; $I_1$ 、 $I_2$  分别为参考光和信号光的光强; $V = 2 \sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$  为拍频信号的对比值; $\alpha = \Delta\omega / T_m$  为角频率调制率, $\Delta\omega$  为光学角频率调制范围, $T_m$  为调制

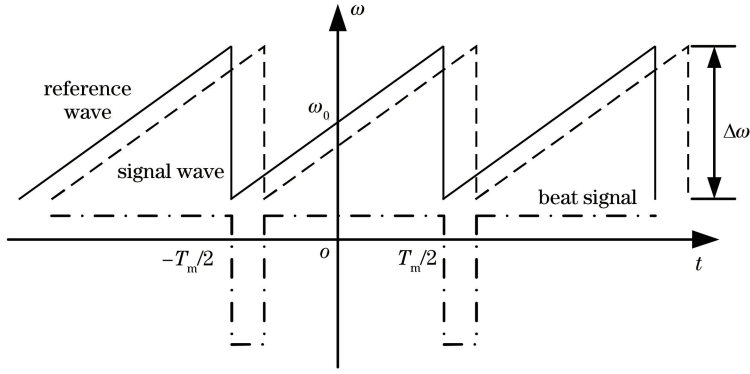


图 2 锯齿波调制下 FMCW 干涉信号角频率关系

Fig. 2 Angular frequency relationship of FMCW interference signals under saw-tooth wave modulation

信号周期;  $\omega_0$  为调制中心位置的角频率。由参考光和信号光之间的光程差, 拍频信号光强可表示为

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

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

$$R = \frac{O_{PD}}{2} = \frac{c v_b}{2 \Delta v v_m}, \quad (3)$$

式中:  $R$  为待测目标距离。因此, 由(3)式可知, 通过测量拍频信号频率  $v_b$  可实现待测目标距离  $R$  的测量。

## 2.2 多普勒效应影响分析

在实际中, 待测目标会受外界环境影响, 无法完全处于隔振状态, 尤其在工业精密制造和智能装配领域<sup>[13]</sup>中, 更需要对运动部件进行实时跟踪监测。而目标的运动会产生多普勒现象, 在拍频信号的频率中引入一个多普勒频移项, 此时拍频信号的频率  $v'_b$  为

$$v'_b = v_b \pm v_D = v_b \pm \frac{2n}{\lambda_0} s, \quad (4)$$

式中:  $v_b$  为实际距离产生的频率项,  $v_D = 2ns / \lambda_0$  为目标振动或运动引起的多普勒频移项;  $n$  为空气折射率;  $s$  为待测目标的运动速度。(4)式中正负号取决于测距系统激光光源的调频方向和待测目标相对于系统的运动方向。此时, 显然有

$$R' = \frac{c v'_b}{2 \Delta v v_m} = \frac{c(v_b \pm v_D)}{2 \Delta v v_m} = R \pm \frac{nc}{\lambda_0 \Delta v v_m} s, \quad (5)$$

式中:  $R'$  为引入多普勒频移项后的距离。由(5)式可知, 运动目标距离测量引入了与运动速度  $s$  有关

的误差, 且运动速度越大, 测量偏差越大。中心波长为 1550 nm、光学频率调制范围为 10 GHz 的激光光源, 在 100 Hz 电流调制速率下, 能直接引入约 194 倍的运动速度大小的距离测量偏差, 从而限制 FMCW 测距技术的应用。

## 3 实现运动目标测距的方法

### 3.1 多普勒效应消除原理

为实现运动目标距离测量, 本文提出对激光器的光频进行三角波调制的方法。在一个调制周期内产生两个调制方向相反的频率扫描信号, 由目标运动产生的多普勒频移在两个调频方向上的贡献量互为相反, 通过对两个调频方向上的频率取平均, 即可消除运动引起的多普勒影响。对激光光频进行三角波调制, 如图 3 所示。

当目标静止时, 参考波与信号波之间的延迟时间  $\tau$  为常量, 三角波上坡区和下坡区可看作是调制方向相反的两个锯齿波, 其对应的拍频信号角频率绝对值相等。当目标发生振动或运动时, 延迟时间  $\tau(t)$  会随时间  $t$  变化, 由此产生多普勒效应, 则两个光波与拍频信号的角频率关系如图 3 所示。那么在调制上坡区和下坡区探测到的信号  $I'(\tau, t)$  为

$$I'_r(\tau, t) = I_0 \{1 + V \cos[\alpha \tau(t)t + \omega_0 \tau(t)]\}, \quad (6)$$

$$I'_l(\tau, t) = I_0 \{1 + V \cos[-\alpha \tau(t)t + \omega_0 \tau(t)]\}, \quad (7)$$

式中:  $I'_r$ 、 $I'_l$  分别为目标发生运动时上坡区和下坡区对应的拍频信号。上坡区探测信号的角频率  $\omega'_{br}$  为

$$\omega'_{br} = \frac{d}{dt} [\alpha \tau(t)t + \omega_0 \tau(t)] =$$

$$\alpha \tau(t) + (\omega_0 + \alpha t) \frac{d\tau(t)}{dt} = \omega_b + \omega_D, \quad (8)$$

式中:  $\omega_b$  为上坡区距离引起的拍频信号角频率;  $\omega_D$  为多普勒角频率偏移。因此, 由(8)式表明拍频信号

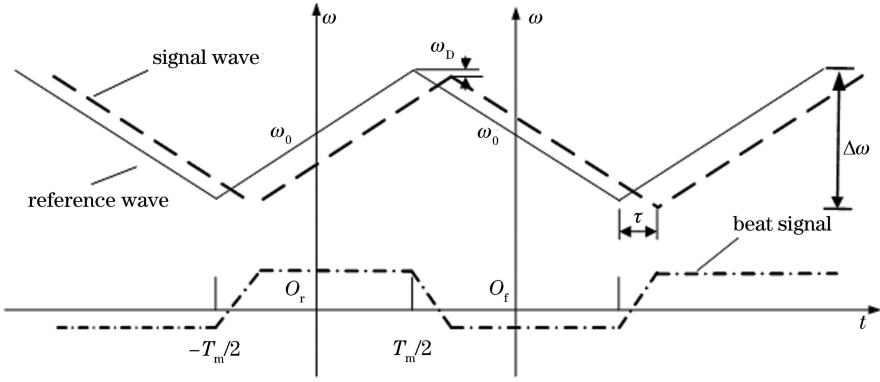


图3 目标运动时,三角波调制时 FMCW 干涉信号角频率关系

Fig. 3 Angular frequency relationship of FMCW interference signals under triangular wave modulation for moving target

的角频率包含两部分:一是 FMCW 激光干涉光程差的结果,与延迟时间  $\tau$  有关;另一部分是多普勒效应的贡献,与延迟时间的导数有关。而多普勒角频率偏移是关于时间的函数,其平均值  $\bar{\omega}_D$  为

$$\bar{\omega}_D = \omega_0 \frac{d\tau(t)}{t}. \quad (9)$$

由(9)式可以得到上坡区探测信号的平均角频率  $\bar{\omega}'_{br}$  为

$$\bar{\omega}'_{br} = \omega_b + \bar{\omega}_D. \quad (10)$$

同理,得到下坡区探测信号的角频率  $\bar{\omega}'_{bf}$  为

$$\bar{\omega}'_{bf} = \bar{\omega}_D - \omega_b. \quad (11)$$

由于  $\bar{\omega}'_{bf}$  为负,而探测器只能得到角频率的绝对值,因此(11)式可另写为

$$|\bar{\omega}'_{bf}| = \omega_b - \bar{\omega}_D. \quad (12)$$

因此,可利用多普勒频移在对称调频方向上贡献量为相反量,可得到拍频信号中与距离量有关的角频率  $\bar{\omega}_b$  为

$$\bar{\omega}_b = \frac{1}{2}(\bar{\omega}'_{br} + |\bar{\omega}'_{bf}|). \quad (13)$$

同时,也可获得平均多普勒角频率偏移,即

$$\bar{\omega}_D = \frac{1}{2}(\bar{\omega}'_{br} - |\bar{\omega}'_{bf}|). \quad (14)$$

因此,当获取到一个运动目标的拍频信号时,在实际信号解调中,可分别探测到三角波调制上坡区和下坡区的信号平均角频率,并根据(13)式和(14)式计算出拍频信号角频率  $\omega_b$  和实际的平均多普勒角频率偏移  $\bar{\omega}_D$ ,从而消除多普勒频移影响。

### 3.2 运动目标距离-速度解耦

由 3.1 中可知,利用三角波调制方法可从探测的信号角频率中分离出角频率  $\omega_b$  和  $\bar{\omega}_D$ 。相应地,根据角频率与频率的关系,可得到与运动目标距离  $R$  线性相关的频率  $\nu_b$  和与运动目标速度  $s$  线性相

关的平均多普勒频率  $\bar{\nu}_D$ , 分别为

$$\nu_b = \frac{\omega_b}{2\pi} = \frac{2\Delta\nu v_m R}{c}, \quad (15)$$

$$\bar{\nu}_D = \frac{\bar{\omega}_D}{2\pi} = \frac{2n}{\lambda_0} s. \quad (16)$$

从而,可实现运动目标的距离和速度测量,分别为

$$R = \frac{\nu_b c}{2\Delta\nu v_m}, \quad (17)$$

$$s = \frac{\bar{\nu}_D \lambda_0}{2n}. \quad (18)$$

当目标运动时,会在三角波调制上、下坡区对应的拍频信号中,同时分别增加和减少一个多普勒频移项。因此,在某一调频方向对应信号中减少一个多普勒频移项时,为避免信号频率出现零值或负值<sup>[14]</sup>,导致信号解调错误,必须保证运动速度引起的多普勒频移量  $\bar{\nu}_D$  小于目标距离所对应的频率项  $\nu_b$ , 有

$$\bar{\nu}_D < \nu_b. \quad (19)$$

那么,运动速度必须满足

$$s < \frac{\Delta\nu v_m \lambda_0}{nc} R. \quad (20)$$

可知,利用三角波调制方法对运动目标距离-速度测量时,其最大运动速度受目标距离的限制。当光学调制频率  $\Delta\nu$  和电流调制频率  $\nu_m$  固定时,目标距离越远,可以允许测量的运动目标速度越大。

### 3.3 三角波调制下拍频信号解调方法

对拍频信号进行解调时,其核心是实现信号频率鉴别。考虑到所采用的三角波调制方法,需要对三角波调制上、下坡区对应的拍频信号分别进行处理,同时基于电流节点校正法实现调频非线性校正时需识别信号极小值点位置,故采用数字鉴频算法,算法流程如图 4 所示。

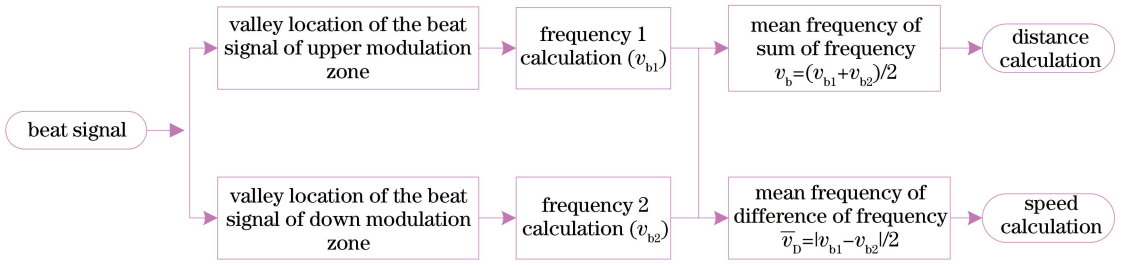


图 4 数字鉴频算法流程图

Fig. 4 Flowchart of digital frequency discrimination algorithm

将拍频信号按照三角波调制上、下坡区对应分开,并分别查找对应拍频信号的波谷位置,通过信号波谷位置得到上、下坡区对应拍频信号的频率  $v_{b1}$  和  $v_{b2}$ ;再根据三角波调制下的频率关系,可得与目标距离有关的频率值  $v_b = (v_{b1} + v_{b2}) / 2$  与目标速度有关的频率值  $\bar{v}_D = |v_{b1} - v_{b2}| / 2$ ;最后,根据(17)式和(18)式可实现运动目标距离-速度测量。

#### 4 实验验证与分析

在气浮光学平台上搭建 F-P 干涉仪结构的光纤式 FMCW 干涉测距系统,实验装置如图 5 所示。信号发生电路产生三角波调制电流,对中心波长为 1550 nm 的 DFB 半导体激光器进行调制,调制周期为 100 Hz,并利用电流节点校正法实现激光器的调频非线性校正。为使系统结构紧凑,将 20% 部分反射镜粘接在准直器前端,并在线性电动位移台滑块上安装合作反射镜,作为待测目标。参考光与信号光干涉产生的拍频信号由光电探测器接收,以 STM32F4 为主控器的调理电路进行信号处理,并利用解调算法实现待测目标绝对距离测量。

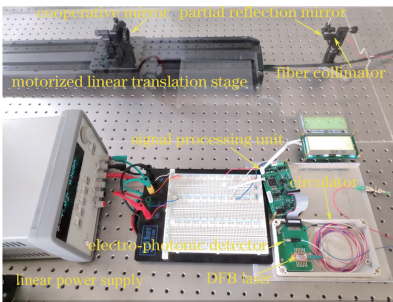


图 5 光纤 FMCW 干涉测距实验装置

Fig. 5 Experimental setup for optical fiber FMCW interference ranging

为验证三角波调制可克服多普勒影响,先后对静止状态和微小运动状态下的同一位置目标的拍频信号进行频谱分析。利用精密压电位移台(精度 1 nm,行程 18.34  $\mu\text{m}$ )在测量方向上使待测目标发

生频率为 2 Hz、振幅为 15.57  $\mu\text{m}$  的单一方向的振动。同一目标位置不同状态时测量所得拍频信号的频谱图如图 6 所示,从图中可知,目标静止时拍频信号频谱峰值处频率为 5005 Hz;目标运动状态下,同时获得三角波调制上坡区和下坡区对应拍频信号频谱峰值处的频率分别为 5081 Hz、4929 Hz。由此可知,目标运动产生的多普勒现象,会导致上、下坡区对应拍频信号发生相反方向的频移。所提出的运动目标测量方法对上、下坡区拍频信号频率取平均,平均频率为 5005 Hz,与静止状态下所得拍频信号频率相等,从而表明三角波调制可消除微小运动的多普勒频移。

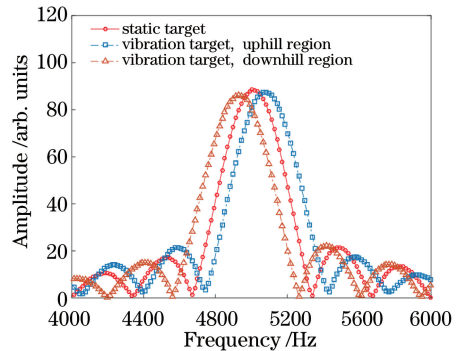


图 6 同一目标位置不同状态下所得拍频信号的频谱图

Fig. 6 Frequency spectra of beat signal obtained under different states for the same target position

再对微小运动目标的拍频信号进行解调,包括对三角波调制上坡区、下坡区的拍频信号,以及二者信号频率平均后对应的拍频信号,3 组测量结果如图 7 所示。25 次重复测量结果平均值分别为 272.108 mm、261.844 mm、266.976 mm,测量结果标准差分别为 0.082 mm、0.088 mm、0.035 mm。从图中可知,多普勒频移现象会导致上、下坡区对应的测量结果产生约 5 mm 的偏移,测量结果错误;而对上、下坡区对应信号频率取平均后再解调,消除了测量偏差,且减小了测量结果标准差值。

对运动目标距离进行跟踪测量。将待测目标安

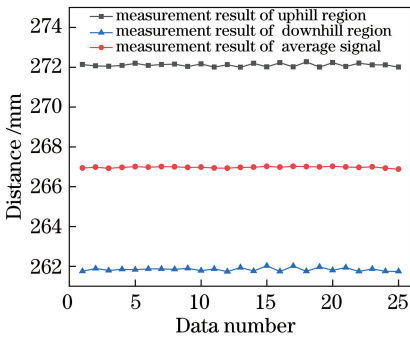


图 7 同一目标位置不同状态下的距离测量结果

Fig. 7 Distance measurement results under different states for the same target position

装在线性位移平台(行程为 600.000 mm, 轴向定位精度为  $\pm 12.00 \mu\text{m}$ , 双向重复性为  $\pm 0.25 \mu\text{m}$ )上, 利用软件控制待测目标匀速往返运动。目标初始位置为 200.600 mm, 每秒记录一次测量结果, 测量结果如图 8 所示。从图中可看出, 在目标匀速往返运动过程中, 受多普勒影响, 三角波调制上坡区对应的测量结果存在固定偏差, 且目标远离光源时测量结果偏小, 表明在该调制方向上的对应信号中多普勒频移项为负; 靠近光源时测量结果偏大, 对应信号中多普勒频移项为正。而利用三角波调制上、下坡区对应拍频信号频率的平均值进行解调, 克服了多普勒影响, 实现运动目标距离跟踪测量。对往返测量结果线性拟合, 线性回归  $R^2$  分别为 0.99998 和 0.99997, 表明该系统具有良好的线性度。

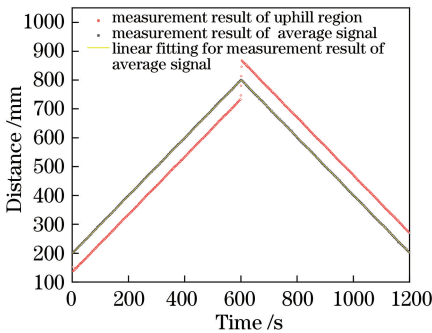


图 8 三角波调制下, 运动目标距离跟踪测量结果

Fig. 8 Distance-tracking measurement results of moving target under triangular wave modulation

利用 FMCW 干涉测距系统进行运动目标速度测量实验。采用软件控制待测目标匀速运动, 并对不同速度下的运动目标进行测量, 测量结果如表 1 所示。在 800 mm 处能实现的最大测量速度为 9 mm/s, 测量结果相对误差最小可达 0.067%。为实现更大速度测量, 可调整目标至更远位置, 以满足运动引起的多普勒频移项小于与距离有关频率项的要求。

表 1 运动目标速度测量结果

Table 1 Speed measurement results of moving target

Number	Actual speed / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Measurement result / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Absolute error / $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Relative error / %
1	1.000	0.999	-0.001	0.100
2	2.000	2.002	0.002	0.100
3	3.000	3.002	0.002	0.067
4	4.000	4.004	0.004	0.100
5	5.000	5.009	0.009	0.180
6	6.000	6.006	0.006	0.100
7	7.000	6.994	-0.006	0.085
8	8.000	7.993	-0.007	0.087
9	9.000	8.990	-0.010	0.111

## 5 结 论

在 FMCW 干涉测距技术的基础上, 分析多普勒效应对运动目标测距时产生的影响; 对系统光源进行三角波连续调频, 并进一步理论分析三角波调制下的距离-速度解耦原理; 采用数字鉴频方法实现信号解调。实验结果表明三角波调制可消除目标运动所产生的多普勒影响, 并能实现 800 mm 范围内运动目标的距离-速度测量。由此证明, 该方法可适用于运动目标的实时跟踪测量, 调频连续波干涉测距技术在工业智能领域中具有重要的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Ye S H, Zhu J G, Zhang Z L, *et al.* Status and development of large-scale coordinate measurement research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29 (B09): 1-6.  
叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. *计量学报*, 2008, 29(B09): 1-6.
- [2] Berkovic G, Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(4): 441-471.
- [3] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [4] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(12): 124404.
- [5] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers [J]. *Applied Optics*, 2006, 45 (12): 2723-2730.
- [6] Zheng J. Coherence analysis of optical frequency-

- modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3681-3687.
- [7] Kakuma S, Katase Y. Frequency scanning interferometry immune to length drift using a pair of vertical-cavity surface-emitting laser diodes [J]. *Optical Review*, 2012, 19(6): 376-380.
- [8] Tao L, Liu Z G, Lü T, *et al.* Drift error compensation method of frequency sweeping interferometer by consecutive forward and reverse optical frequency scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212002.  
陶龙, 刘志刚, 吕涛, 等. 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法 [J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212002.
- [9] Liu G D, Xu X K, Liu B G, *et al.* A method of suppressing vibration for high precision broadband laser frequency scanning interferometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(20): 209501.  
刘国栋, 许新科, 刘炳国, 等. 基于振动抑制高精度宽带激光扫频干涉测量方法 [J]. *物理学报*, 2016, 65(20): 209501.
- [10] Li Y T, Zhang F M, Pan H, *et al.* Simulation of vibration compensation in frequency-modulated continuous-wave laser ranging system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0104001.  
李雅婷, 张福民, 潘浩, 等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0104001.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Zhang K S. Application of laser tracker system in aircraft manufacturing [C] // 2016 Aviation Test Technology Academic Exchange Conference Proceedings. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016.  
张奎生. 激光跟踪仪系统在飞机制造中的应用技术 [C] // 2016 航空试验测试技术学术交流会议论文集. 北京: 中国航空学会, 2016.
- [14] Zhou J, Wei G, Long X W. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 632-638.  
周健, 魏国, 龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 632-638.