

文章编号 1004-924X(2023)16-2343-09

高速高精度实时相位式激光测距系统

潘映伶^{1,2}, 纪荣祎^{1,2*}, 祁勤³, 高萌^{1,2}, 周维虎^{1,2}

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230000)

摘要:为解决工业现场测量对高速实时精密测距的需求,设计并搭建了一套高速高精度的激光测距系统。系统采用双测尺同时调制的激光光源以及双路信号同步探测的信号处理技术,提高了系统测量速度以满足高速测距的需求;分析验证了欠采样方法应用于高频信号测鉴相的有效性,基于欠采样可有效降低了鉴相处理电路的复杂度。采用 201 MHz+3 MHz 的双测尺调制光源及 40 MHz 的采样频率,结合收发光学系统及信号解算电路,搭建了高速激光测距系统;进行了激光测距系统的测量速度和测量精度实验。实验结果表明,该测量系统的测量速度可达 62 次/s,测距精度可达±0.2 mm。该系统具有高速高精度的实时测量性能,可用于高精度激光扫描仪、动态跟踪测量等高速测距系统。

关键词:相位测距;高速高精度;欠采样;实时测量;高频调制

中图分类号: TN249;P225.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233116.2343

High-speed and high-precision real-time phase laser ranging system

PAN Yingling^{1,2}, JI Rongyi^{1,2*}, QI Qin³, GAO Meng^{1,2}, ZHOU Weihu^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, China)

* Corresponding author, E mail: jirongyi@ime.ac.cn

Abstract: To solve the demands for high-speed real-time precision ranging in industrial field measurement, various high-speed and high-precision laser ranging systems have been designed and developed. The design of dual ruler frequency synchronously-modulated laser and dual signal synchronous detection improves the measurement speed of the system to meet the needs of high-speed ranging. The under-sampling method applied to the high-frequency signal phase detection has been analyzed and proved effectively, which considerably reduces the complexity of the phase detection processing circuit. The integrated high-speed laser ranging system, which uses 201 MHz+3 MHz dual rule-modulation laser source and a sampling frequency of 40 MHz, combining with optical transceiver system and signal solution circuit. The measurement speed and measurement accuracy of the laser ranging system were tested. The experimental results indicate that the measurement speed of the measurement system can reach 62 times/s, and the rang-

收稿日期:2022-12-05;修订日期:2023-02-18.

基金项目:民用航天预研项目资助(No. D020214);国家重点研发计划资助项目(No. 2019YFB2004900)

ing accuracy can reach ± 0.2 mm. The real-time measurement performance of the system with high speed and high accuracy is effectively verified, which can be used for high-speed ranging systems such as high-precision laser scanners and dynamic tracking measurement

Key words: phase ranging; high speed and high precision; under-sampling; real-time measurement; high frequency modulation

1 引言

相位激光测距是工业测量中绝对距离测量的主要测量手段,广泛用于工业测距、三维扫描测量、动态跟踪测量、机器人导航及自动驾驶等领域^[1-3]。目前,传统的相位激光测距系统的测量速度受限于多测尺切换和内外光路切换时间,测量精度受限于精测尺调制频率和鉴相精度。同时,传统的相位测距系统采用混频降频方式将高频调制信号转换为低频信号进行鉴相处理,也限制了测量速度和鉴相精度的提升^[4-7]。

为了提高测量速度和测距精度,近年来研究人员从提高测尺调制频率、采用直接采样鉴相方法和无切换实时测量方案等方面开展了研究工作,为测量速度和测距精度的提升扩展了研究思路。文献[7-8]将激光测距系统中信号调制频率提高为 100 MHz,结合欠采样方法,分别采用全相位傅里叶变换(apFFT)和希尔伯特变换预处理的傅里叶(FFT)算法实现测距精度为 0.38 mm 和 0.4 mm^[8-9]。文献[9-10]激光测距系统采用双测尺调制信号源,实现了亚毫米测距精度,并将测程提升至百米量级^[10-11];文献[11]采用降频测时技术,基于单频测尺实现了测程 500 m,测距精度 1.08 mm,测量速度 0.03~0.04 s 的快速、高精度及大范围的测距性能^[12]。以上研究结果表明,提高测尺调制频率、欠采样鉴相方法和无切换测量等方法能够有效提高相位激光测距系统的测量速度和测量精度。

本文设计并搭建的高速高精度的相位式激光测距系统,采用双测尺调制和双探测器同步探测的方法,提高了系统的测量速度;使用 201 MHz 的高频调制缩短精测测尺,提升了相位测距的测量精度;采用 40 MHz 的欠采样方法进行高频信号鉴相,降低了鉴相电路的复杂度,并进一步提升了系统测量速度。目前国内外的相位式

激光测距仪产品主要有德国 ASTECH(LDM42 E)、瑞士 DIMETIX(DAE-10-050)、中国苏州一光(RTS102R10)及莱赛激光(LS203-100)等,上述产品测量精度为 ± 1 mm~ ± 3 mm,测量速度为 1~50 Hz,测量量程为 30 m~100 m^[13-16]。本文研发的高速高精度相位式激光测距系统,实现了 62 次/s 的测量速度,并在 45 m 测程内实现了 ± 0.2 mm 的测距精度,与同等测量量程的相位式激光测距仪相比,具有高速、高精度的性能优势。

2 基于欠采样的高速鉴相系统

2.1 欠采样原理

针对高频信号的采样,需满足奈奎斯特(Nyquist)采样定理,实际应用中的采样频率需达到被测信号频率的 2~5 倍,大幅提高采样电路的采样频率和系统复杂度^[17]。针对上述问题,采用欠采样的方法降低采样频率,可在满足测量精度的同时简化系统复杂度。

欠采样是一种以低于 Nyquist 采样定理的采样率进行采样的方法。如图 1 所示,对高频待测信号进行固定周期采样,因待测信号周期延迟累加,达到一定周期的采样后可遍历待采信号一个完整周期,此完整周期即可还原为完整的待采信号^[18]。

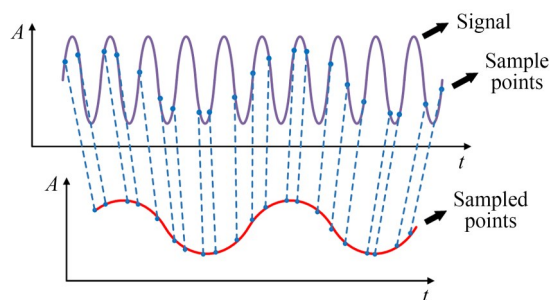


图 1 欠采样示意图

Fig. 1 Schematic of the under-sampling

高频待采信号可表示为:

$$y = A \sin(2\pi ft + \phi), \quad (1)$$

其中: A 为信号幅值, f 为信号频率, ϕ 为初始时刻的相位。

经采样频率 f_s 采样后的数字信号为:

$$y_n = A \sin\left(2\pi \frac{f}{f_s} n + \phi\right), n = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

使用欠采样方法时,满足有效欠采样的待采信号 f 和采样频率 f_s 的关系式为:

$$f = Nf_s + \Delta f, \quad (3)$$

其中: N 为正整数, Δf 为频率偏差余量。

结合式(2)和式(3),可以将式(2)化简为:

$$y_n = A \sin\left(2\pi \frac{\Delta f}{f_s} n + \phi\right), n = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

从式(4)可得,欠采样方法相当于将待采信号频率实现下变频,同时保留了原始待采信号的初始相位值 ϕ ,采样后的相位信息即为待采信号相位信息。

通常采用欠采样进行信号采样时,由于信号频率未知,在一定条件下才能满足采样后的频谱不会发生混叠,无失真的还原信号的相位信息,且求解相位时需通过重构算法求出真实相位信息所对应的谱线。而欠采样应用于相位式激光测距时,由于调制频率已知,无需对采样信号进行频率重构,根据调制信号的频率,采样频率及DFT运算的点数三个已知量,即可确定所求相位信息对应的谱线位置^[9]。

2.2 等效频率

使用欠采样方法进行采样,采样后的信号频率称为欠采样等效频率,等效频率的相位信息即是待采信号相位信息。

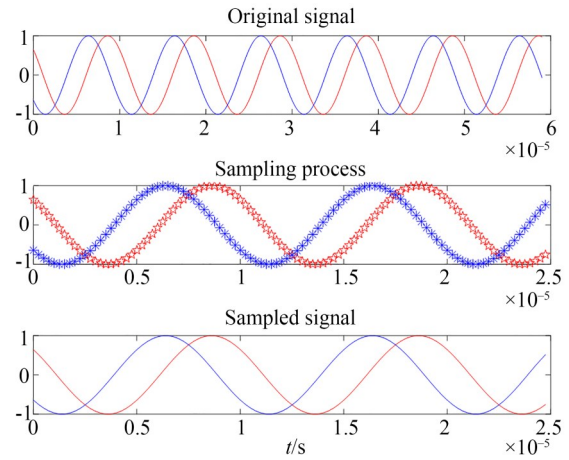
欠采样时,采样信号周期 T_s 和待测信号周期 T 的关系可表示为:

$$T_s = N \cdot T \pm m \cdot T, \quad (5)$$

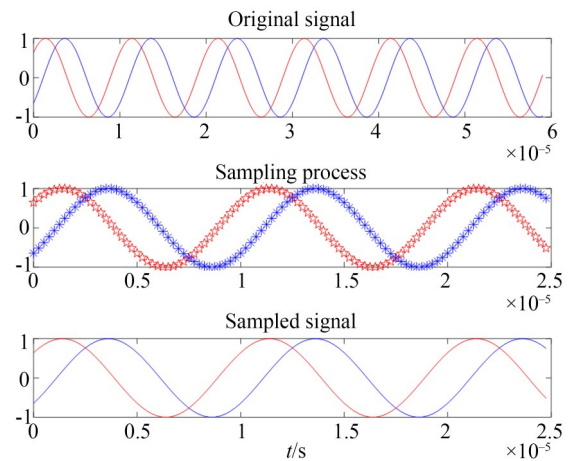
其中: N 为正整数, m 为小数, mT 为欠采样后信号各点时间间隔,正负号分别表示为信号的正序采样和逆序采样。

正序采样与逆序采样仅决定采样的顺序,对还原采样频率没有区别,两种采样情况如图2所示,图中两种采样仅初始和最终相位值对调,但相位差值保持一致。

欠采样还原一个完整周期的待采信号所需



(a) 正序采样
(a) Positive sampling along the x-axis



(b) 逆序采样
(b) Negative sampling along the x-axis

图2 正序及逆序采样示意图

Fig. 2 Schematic of positive and negative sampling along the x-axis

采样信号的周期数 M 为:

$$M = \frac{T}{mT} = \frac{1}{m}. \quad (6)$$

欠采样后所得信号的新周期 T_n 及频率 f_n 表示为:

$$T_n = M \cdot T_s = \frac{T_s}{m}, \quad (7)$$

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{m}{T_s}. \quad (8)$$

结合进行DFT计算的点数为 n ,则等效频率对应的频域坐标 P 为:

$$P = n \frac{f_n}{f_s}. \quad (9)$$

例如采样频率 f_s 为 40 MHz,待采信号频率 f 为 201MHz,采样的计算点数 n 为 2 048 个点,上述参数分别为:

$$\text{采样周期: } T_s = \frac{1}{f_s} = 25 \text{ ns}$$

$$\text{待采信号周期: } T = \frac{1}{f} = \frac{1\,000}{201} \text{ ns}$$

周期信号关系式可表示为: $T_s = 5T + 0.025T$

$$\text{等效频率: } f_n = \frac{m}{T_s} = \frac{0.025}{25\text{ns}} = 1 \text{ MHz}$$

$$\text{频域坐标: } P = n \frac{f_n}{f_s} = \frac{2\,048}{40} = 51.2 \text{ (取整为}$$

坐标位置 51)

从待采信号频率、采样频率和 DFT 计算点数可求出待采信号的等效频率对应的频域位置,从而进行等效频率相位的解算。

2.3 欠采样鉴相仿真

为验证欠采样应用于相位差测量的有效性,仿真分析了欠采样的鉴相相位差与预设相位差的偏差。仿真设置信号频率为 201 MHz,欠采样频率为 40 MHz,每次采样点数为 4 000,分别计算不同相位差的测量值与预设值的偏差。

图 3 中横坐标为预设相位差,左侧纵坐标为欠采样和 DFT 计算的相位差,右侧纵坐标为欠采样和 DFT 计算的相位差与预设相位差的差值。从图中数据可知,欠采样方法计算的相位差值与预设相位差值一致,非线性度为 2×10^{-5} ,具有良好的测量线性度,与预设值的偏差波动范围为 $\pm 0.03^\circ$ 。对应 201 MHz 的调制频率,测量距离值波动范围为 $\pm 60 \mu\text{m}$ 。上述数据表明,采用

欠采样应用于高频信号的相位差测量可以实现较高的测量精度。

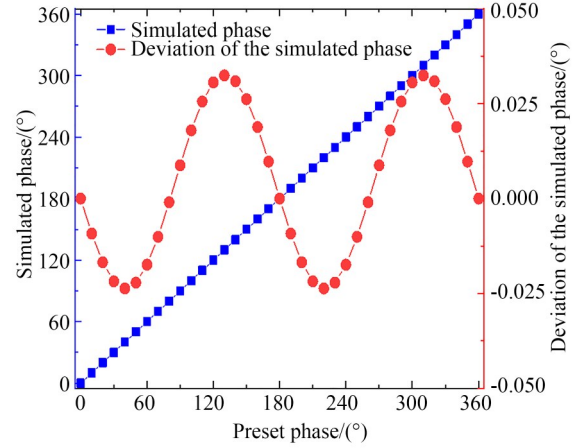


图 3 欠采样相位有效性验证示意图

Fig. 3 Schematic of undersampling phase validity verification

3 高速高精度相位式激光测距系统

3.1 系统设计

针对高精度激光扫描仪、动态跟踪测量等高速测距需求,设计了高速高精度的激光测距系统。采用双测尺同时调制的激光光源和基于双路探测器的同步鉴相方案,避免了测尺切换和内外光路切换;采用欠采样的方式进行测量信号的采样处理,降低了信号处理电路的复杂度。

高速高精度相位式激光测距系统结构如图 4 所示,由双测尺调制光源、收发光学系统以及信号采集与相位解算电路组成。

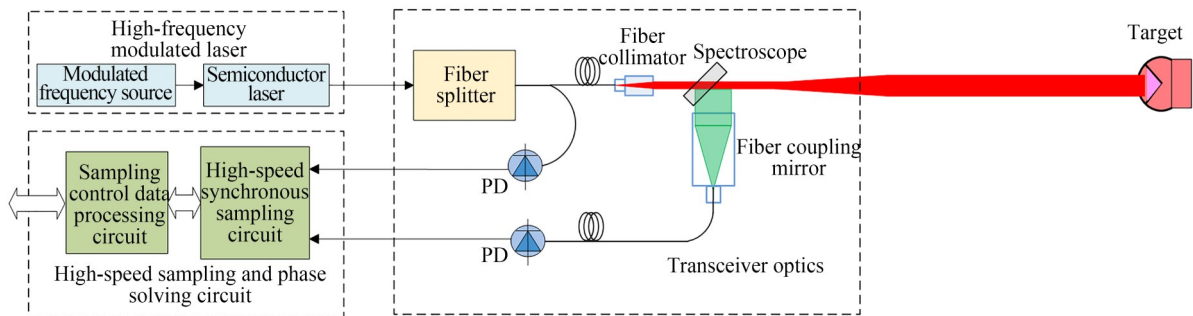


图 4 高速高精度相位式激光测距系统示意图

Fig. 4 Schematic of high-speed and high-precision laser ranging system

3.2 双测尺调频光源

如图 5 所示,双测尺调频光源由高稳晶振、分

路器、PLL 频率转换模块、频率合成模块和半导体激光器组成。

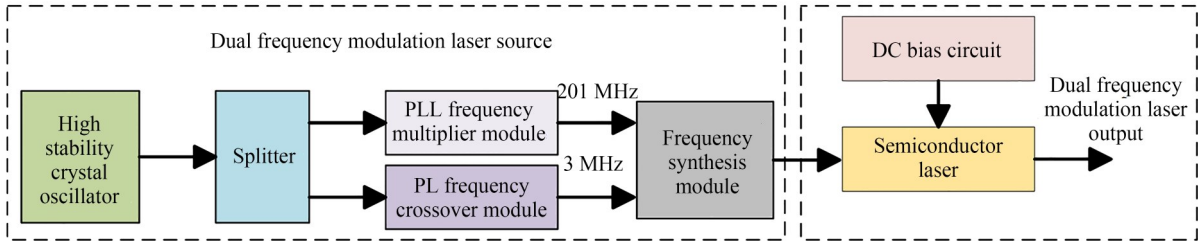


图 5 双测尺调频光源示意图
Fig. 5 Schematic of a dual-frequency modulated laser source

高稳晶振产生 100 MHz 的稳定频率信号(频率稳定度 ± 0.1 ppb/s, 相位噪声 -152 dBc/Hz @1 MHz), 由分路器分为两路, 分别输入 PLL 倍频模块和 PLL 分频模块, 产生 201 MHz 及 3 MHz 两个频率信号, 经频率合成模块后实现幅值相加, 输出具有两个频率信号的调制信号, 对半导体激光器进行调制, 输出双频调制激光信号, 作为测距光源。双频调制激光信号波形如图 6 所示。

分为参考路和测量路, 参考路信号由参考探测器直接接收; 测量路信号经过准直后出射, 到达被测目标后由被测目标反射, 回波信号再由分光镜反射后由光纤耦合镜耦合进光纤, 由测量探测器接收。

3.4 信号采集与相位解算电路

信号采集与相位解算电路由两路同步采样模块和 FPGA 数据处理模块组成, 如图 8 所示。高速采样芯片对双探测器输出的信号进行同步采样, FPGA 芯片实现对采样芯片的控制和采样数据的高速传输, 并对采样数据进行实时 FFT 解算后输出相位差数据, 实现对目标距离的实时测量。

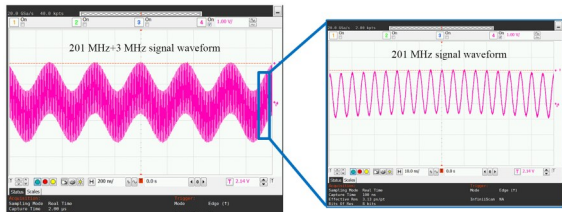


图 6 双测尺调制信号波形图
Fig. 6 Waveform of dual-ruler modulated signal

3.3 收发光学系统

测距系统的收发光学系统如图 7 所示, 由光纤分束器、光纤准直镜、分光镜、光纤耦合镜和双探测器组成。光纤分束器将调制后的激光信号

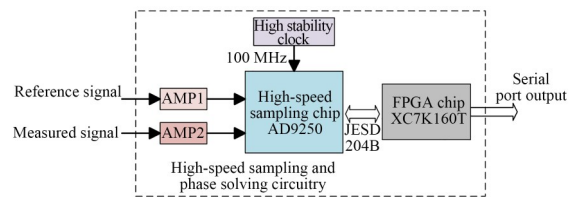


图 8 信号采集与相位解算电路流程图
Fig. 8 Flowchart of signal sampling and phase solution circuit

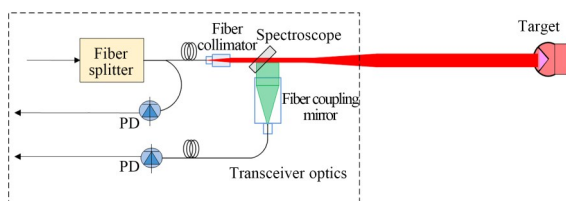


图 7 收发光学系统图
Fig. 7 Schematic of optical transceiver system

相位差解算流程如图 9 所示。采集到的两路信号数据在 `fft_module` 模块中进行 FFT 计算, 得到对应频率的幅值数据, 在 `atan_module` 中进行反正切解算, 得到两路信号的相位值, 在 `phase_average` 中进行相位差计算, 由 `uart_top` 模块输出。数据采集和相位差解算由 `timing_ctrl` 模块进行时序控制。

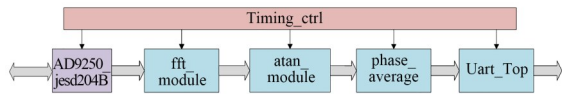


图 9 相位差解算流程图

Fig. 9 Flowchart of phase difference solution

4 测量实验与结果

分别开展了信号采集与相位解算电路的实时鉴相性能、测距系统的测量速度和测距精度的实验测试以验证测距系统的测量性能。

4.1 信号采集与相位解算电路实时鉴相精度

采用信号源(安捷伦 81150A)设置两路具有固定相位差的正弦波信号,输入信号采集与相位解算电路,将采样解算的相位值与预设相位差值对比,分析采样板卡的实时鉴相精度。

设置的两路信号频率为 201 MHz,信号幅值为 0.5 V_{pp},设置的相位差值变化范围为 10°~360°,步长为 10°。鉴相数据如图 10 所示,横坐标为设置相位差,左侧纵坐标为实测的相位差,右侧纵坐标为实测相位差与设置相位差的差值。

从图 10 中数据可知,实测相位差的非线性度为 7×10^{-8} ,实测相位差与预设相位差的偏差为 $\pm 0.04^\circ$,对应 201 MHz 的调制频率,测量距离值波动范围为 $\pm 80 \mu\text{m}$,与仿真结果基本一致。

4.2 系统的测量速度

为验证测距系统的测量速度,将反射靶标固定于音圈振动台(微航动力 OWS445-25),如图 11 所示。通过设置振动台的振动幅度和振动频率,验证测距系统的测量速度。

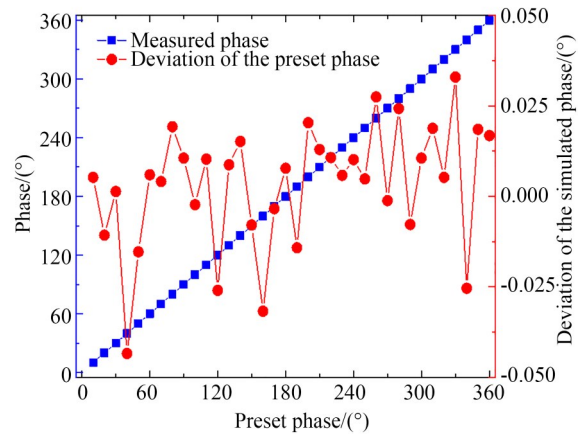


图 10 采样板卡实时鉴相性能数据

Fig. 10 Data of sample board real-time phase detection performance

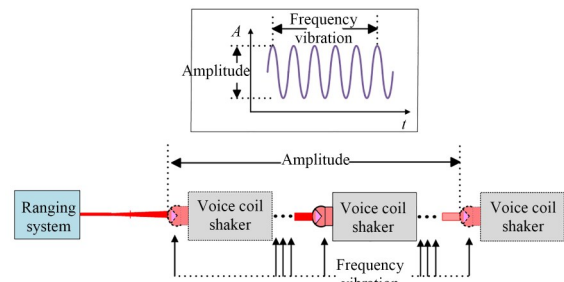
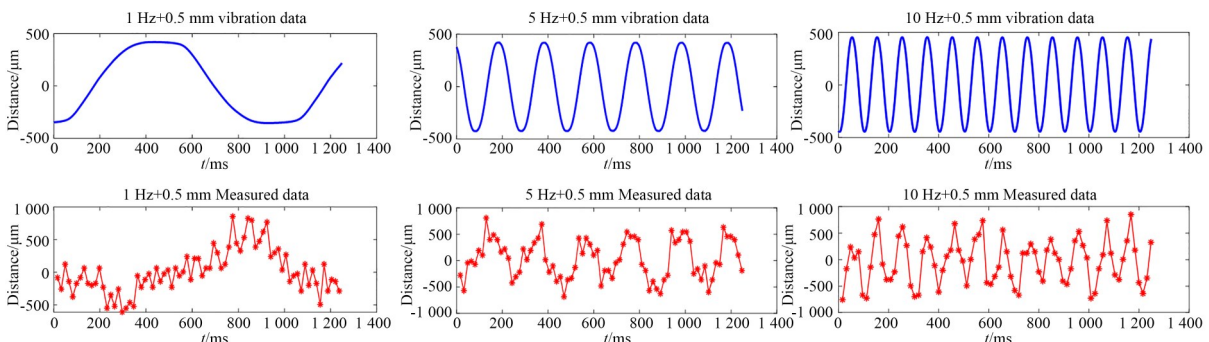


图 11 系统测速示意图

Fig. 11 Schematic of system velocimetry

分别设置振动频率为 1 Hz, 5 Hz 及 10 Hz, 振幅为 0.5 mm, 1 mm 和 2 mm, 测量得到的数据曲线如图 12 所示。

实验结果表明,当振动频率设置为 1 Hz 时,测距系统在一个振动周期内可输出 62 个测量数据,验证了测距系统的测量速度可达 62 次/s。同时,测距系统能够测量振动频率为 10 Hz, 振幅为



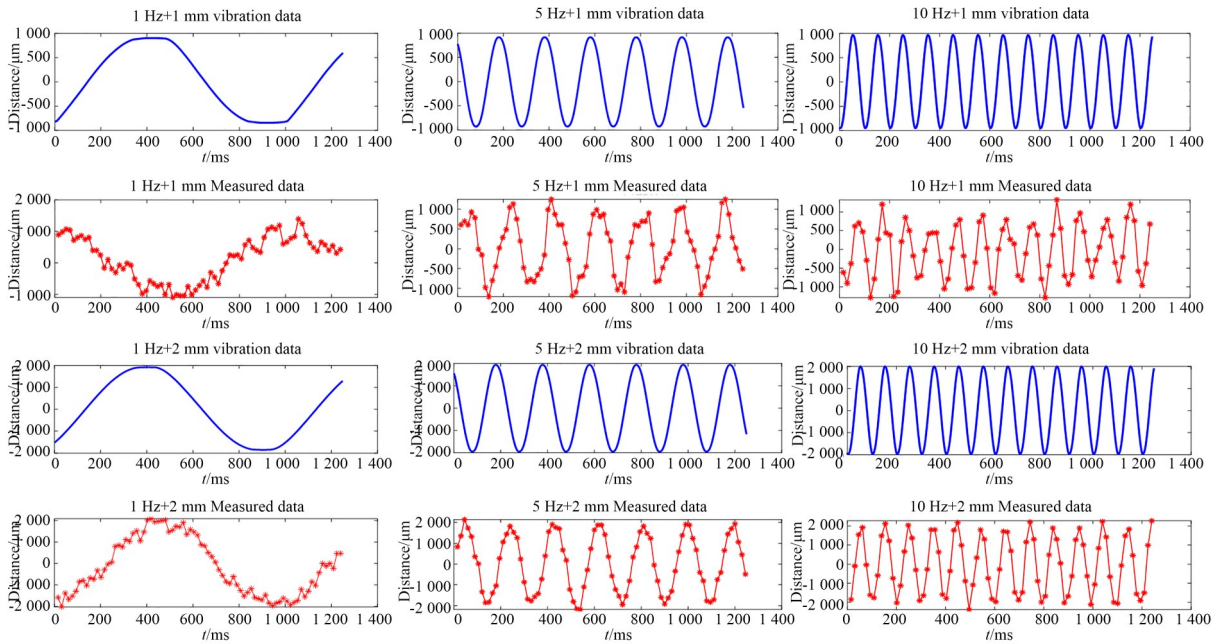


图 12 不同振动频率及振动幅值的系统测速性能(振频:从左至右为 1 Hz, 5 Hz 及 10 Hz;振幅:从上至下为 0.5 mm, 1 mm 及 2 mm)

Fig. 12 System speed measurement performance with different vibration frequencies and vibration amplitudes (Vibration frequency: 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz and 10 Hz from top to bottom; Amplitude: 500, 1 000 and 2 000 from left to right)

0.5 mm 的高速小振幅的振动,有效验证了测距系统的测量速度和测距分辨率。

4.3 系统测距精度

为验证测距系统的测量精度,在 0~45 m 范围内进行了测距系统与激光干涉仪的测量精度比对实验。如图 13 所示,将反射靶标固定于电控位移台上,以 5 m 为步长移动反射靶标,在不同距离处进行测量数据的采集与比对。

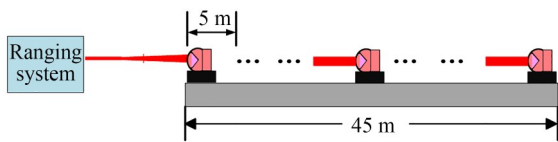


图 13 系统测距精度测量示意图(45 m)

Fig. 13 Schematic of system ranging accuracy(45 m)

以干涉仪所测距离值为标准对测距系统所测距离值进行修正,得到修正公式(10),其中, D_0 是测量数据, D_1 是修正测量数据,0.998 96是比例误差系数,0.095 3 mm是固有误差。

$$D_1 = 0.998\ 96D_0 + 0.095\ 3. \quad (10)$$

基于修正公式求解得每个测量位置的测距值,图 14 为 0~45 m 10 个位置点的测量稳定性数

据(均方差),图 15 为 10 个位置点的测距值与干涉仪比对的测距误差分布。

由图 14 及图 15 所示的测量结果可知,在 45 m 测量范围内,以 5 m 为步长,每个测量位置的测量稳定性优于 0.15 mm,具有较好的重复性;与干涉仪测量值相比,各个位置点的残差优于 ± 0.2 mm。以上数据表明,该高速高精度实

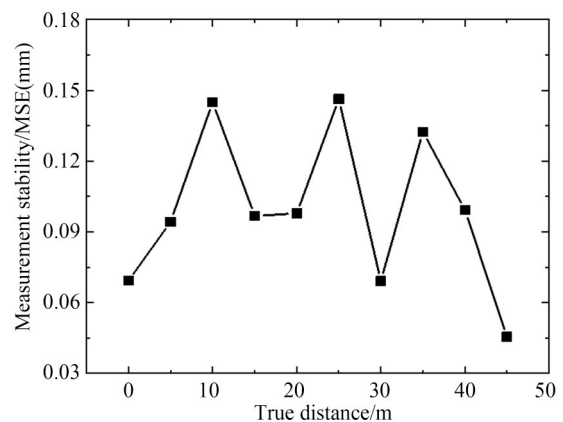


图 14 45 m 内各测量点测量稳定性(均方差)分布图

Fig. 14 Distribution of measurement stability (mean square deviation) at each measurement point within 45 m

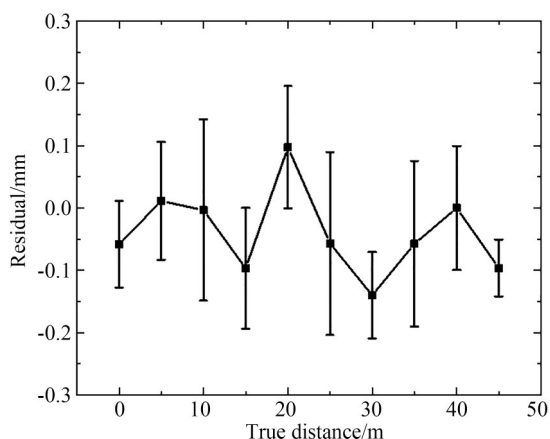


图 15 测距精度与干涉仪精度比对偏差分布图

Fig. 15 Deviation distribution diagram of ranging accuracy and interferometer accuracy

时相位激光测距系统具有较好的测量稳定性,其测距精度为 ± 0.2 mm。

参考文献:

- [1] QIU B W, ZHANG Y W, SUN X Y, *et al.* Laser ranging with micrometer precision and kHz rate via joint frequency-phase measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(22): 1214-1217.
- [2] ZHOU L S, HE H Y, SUN J F, *et al.* Phase-shift laser ranging technology based on multi-frequency carrier phase modulation[J]. *Photonics*, 2022, 9(9): 603.
- [3] 赵树华, 王玉冰, 张明时, 等. 调频连续波激光雷达及数据采集信号链噪声分析[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1): 78-88.
ZHAO S H, WANG Y B, ZHANG M S, *et al.* FMCW Lidar and noise analysis of data acquisition signal chain[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(1): 78-88. (in Chinese)
- [4] 贺红雨, 孙建锋, 卢智勇, 等. 基于载波相位调制的相位式激光测距外场实验[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2404001.
HE H Y, SUN J F, LU Z Y, *et al.* Outdoor experiments of phase-shift laser range finder technique based on optical carrier phase modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2404001. (in Chinese)
- [5] 刘逸, 杨学友, 刘常杰. 正交混频相位式激光测距

5 结 论

本文中研制的高速高精度的激光相位式测距系统,采用双测尺调频光源及双路信号探测,避免粗精测尺互换及内外光路切换,有效提升系统测量速度;基于欠采样实现信号采集及实时相位处理,简化了信号处理电路的复杂度,提升系统集成度。

对研制的激光相位式测距系统分别进行了测相精度、测量速度和测距精度的实验测试。实验结果表明,该高速高精度测距系统具有 62 次/s 的测量速度;在 45 m 测程内的测距精度为 ± 0.2 mm。本测量系统具有测量速度快、测距精度高的特点,可应用于高精度激光扫描仪、动态跟踪测量等系统,满足高速测距需求。

方法与系统实现[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0208004.

LIU M, YANG X Y, LIU C J. Phase shift laser range finding with a novel quadrature modulation method and system implementation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(2): 0208004. (in Chinese)

[6] 许贤译, 翁名杰, 徐逢秋, 等. 正交调制降频相位式激光测距[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 1979-1986

XU X Z, WENG M J, XU F Q, *et al.* Phase laser ranger based on quadrature modem and frequency reduction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 1979-1986(in Chinese)

[7] 李相敏, 康壮. 基于正交混频的相位激光测距实验分析系统[J]. *激光杂志*, 2022(6): 170-174.

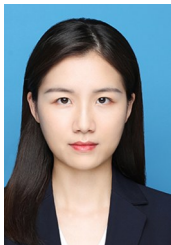
LI X M, KANG Z. Experimental analysis system of phase laser ranging based on orthogonal mixing[J]. *Laser Journal*, 2022(6): 170-174. (in Chinese)

[8] 缙宁祎, 张珂殊. 高速相位式激光测距数字鉴相方法仿真与实现[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2358-2363.

GOU N Y, ZHANG K S. High speed digital phase-difference measuring methods simulation and implementation in phase-shift laser range finder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2358-

2363. (in Chinese)
- [9] 王选钢, 缙宁祎, 张珂殊. 相位式激光测距谱分析鉴相的无偏改进[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 888-895.
WANG X G, GOU N Y, ZHANG K S. Unbiased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 888-895. (in Chinese)
- [10] 左金鑫, 张大卫, 聂俊缘, 等. 基于 Delta-Sigma 调制的多频相位激光测距[J]. 光通信研究, 2022(1): 1-5, 44.
ZUO J X, ZHANG D W, NIE J Y, *et al.* Multi-frequency phase laser ranging based on delta-sigma modulation [J]. *Study on Optical Communications*, 2022(1): 1-5, 44. (in Chinese)
- [11] 张云雷, 张珂殊, 邵永社, 等. 基于双频测尺的大尺寸空间激光测距方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(3): 45-49.
ZHANG Y L, ZHANG K S, SHAO Y S, *et al.* Research on phase-difference measuring methods in laser range based on two measurement rulers at large scale space [J]. *Computer Technology and Development*, 2015, 25(3): 45-49. (in Chinese)
- [12] 郑大青, 陈伟民, 陈丽, 等. 一种基于相位测量的快速高精度大范围的激光测距法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(2): 303-308.
ZHENG D Q, CHEN W M, CHEN L, *et al.* A laser ranging method with high precision and large range in high speed based on phase measurement [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(2): 303-308. (in Chinese)
- [13] 德国 ASTECH. LDM41E and LDM42E. Network-compatible laser distance sensor [EB/OL] (2023-2-3) [2023-2-3]. <https://www.astech.de/en/produkt.html?name=LDM41E%20und%20LDM42E>
- [14] Dimetix 股份有限公司. D 系列. Dimetix D 系列的激光距离传感器 [EB/OL] (2023-2-3) [2023-2-3]. <https://dimetix.com/cn/?product=d-series-zh>
- [15] 苏州一光 FOIF. RTS100+ 系列全站仪. RTS102R10 产品介绍 [EB/OL] (2023-2-3) [2023-2-3]. <http://www.syg.com.cn/products/rts100%E7%B3%BB%E5%88%97%E5%85%A8%E7%AB%99%E4%BB%AA-0>
- [16] LAiSai 莱赛激光. 激光测距仪 LS203-100. 100 米手持式激光测距仪 [EB/OL] (2023-2-3) [2023-2-3]. <https://www.laisai.com/cejuyi/391.html>
- [17] 景宁, 姚鼎一, 王志斌, 等. 等效时间采样压缩感知高频信号重建[J]. 光学精密工程, 2022, 30(10): 1240-1245.
JING N, YAO D Y, WANG Z B, *et al.* High frequency signal reconstruction based on compressive sensing and equivalent-time sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(10): 1240-1245. (in Chinese)
- [18] 王玉兰, 刘娅, 李孝辉. 基于欠采样的频率测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 45-49.
WANG Y L, LIU Y, LI X H. A method of frequency measurement based on sub-nyquist sampling [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(1): 45-49. (in Chinese)

作者简介:



潘映伶(1994—),女,四川凉山人,2015年于西安电子科技大学获得学士学位,2018年于北京航空航天大学获得硕士学位;现为中国科学院微电子研究所工程师,中国科学院大学博士生,主要从事激光精密测量、激光测距等方面的研究。E-mail: panyingling@ime.ac.cn

通讯作者:



纪荣祎(1984—),男,陕西富平人,副研究员,2006年于北京化工大学获得学士学位,2012年于北京理工大学获得博士学位;主要从事激光精密测量、激光测距等方面的研究。E-mail: jirongyi@ime.ac.cn