

文章编号 1004-924X(2023)15-2193-10

## 高频相位激光测距系统的高精度鉴相

孟语璇<sup>1,2</sup>, 董登峰<sup>1,2\*</sup>, 周维虎<sup>1,2</sup>, 纪荣祎<sup>1,2</sup>, 朱志忠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 101408)

**摘要:** 相位测距是一种非常重要的绝对测距手段, 是大尺寸精密测量的重要保障。提高激光调制频率并采用高性能器件实现高频采样分析是提升相位激光测距精度最有效的方式之一。针对高性能器件的最大采样频率总是受限, 难以满足高调制频率采样的难题, 分析验证了欠采样方法用于相位测距的可行性, 同时仿真分析了全相位傅里叶频谱分析法(all-phase Fast Fourier Transform, apFFT)提高鉴相精度的优势。在此基础上, 提出“欠采样+apFFT”的方法, 并构建了激光相位测距的鉴相系统。当调制频率为 201 MHz, 欠采样频率为 100 MHz 时, 系统鉴相精度高于  $\pm 0.04^\circ$ , 对应的测距精度为  $\pm 0.08$  mm。实验结果表明, 基于“欠采样+apFFT”的相位测距方法具有高精度、抗干扰能力强等优势, 在科学研究与工程应用中具有重要价值。

**关键词:** 相位测距; 欠采样; 全相位频谱分析法; 高精度; 鉴相系统

**中图分类号:** TN249; TH711 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233115.2193

## High-precision phase discrimination for high-frequency phase laser ranging system

MENG Yuxuan<sup>1,2</sup>, DONG Dengfeng<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Weihu<sup>1,2</sup>, JI Rongyi<sup>1,2</sup>, ZHU Zhizhong<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

\* Corresponding author, E-mail: dongdengfeng@ime.ac.cn

**Abstract:** Phase laser ranging is an important means of absolute ranging and an important guarantee for large-scale precision measurement. One of the most effective ways to improve the precision of phase laser ranging is to increase the laser modulation frequency and use high-performance devices to achieve high-frequency sampling analysis. However, the maximum sampling frequency of high-performance devices is limited. To solve the problem that existing devices have difficulty in the sampling of high modulation frequencies, the feasibility of an undersampling method for phase ranging was analyzed and verified. The advantages of all-phase fast Fourier transform (apFFT) analysis was examined to improve the precision of phase laser detection. Based on this idea, the method of undersampling and apFFT was developed, and a phase detection system for laser phase ranging was constructed. When the modulation frequency is 201 MHz and the undersampling frequency is 100 MHz, the system phase discrimination accuracy is higher than

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-03-13.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2020YFB1710500, No. 2019YFB2006100); 国家高质量发展专项 (No. TC220H05T)

$\pm 0.04^\circ$ , and the corresponding ranging accuracy is approximately  $\pm 0.08$  mm. The experimental results show that the phase ranging method based on undersampling and apFFT has the comprehensive advantages of high accuracy and strong anti-interference ability, making it valuable for scientific research and engineering applications.

**Key words:** phase ranging; under-sampling; all-phase fast fourier transform; high precision; phase discrimination system

## 1 引言

相位式激光测距技术具有响应快、量程大、抗干扰能力强、精度高等优点,被广泛应用于航空、航天、船舶和机器人等大型装备制造领域<sup>[1-6]</sup>。高端装备制造对于测距精度的要求已从亚毫米提升至数十微米量级,传统的相位式激光测距方法和系统性能迫切需要提升。由激光测距原理可知,信号调制频率和鉴相精度是影响相位激光测距精度的主要因素<sup>[7-8]</sup>。

滕晓<sup>[9]</sup>采用调制频率为 40 MHz 的激光进行测距,系统鉴相精度在  $0.1^\circ$  量级,测距精度在毫米量级,但是较低的激光调制频率限制了测距精度。王心遥等<sup>[10]</sup>使用 80 MHz 的调制信号进行测距仿真,鉴相精度为  $0.1^\circ$  左右,测距精度可达 0.68 mm。姜成昊<sup>[11]</sup>采用光频调制技术产生频率 100 MHz 的信号进行测距,系统的鉴相精度可达  $0.1^\circ$ ,测距精度优于 0.5 mm。由上述研究可知,在鉴相精度大体相当的情况下,随着调制频率的升高,测距精度同步升高。通常采样频率数倍于激光调制频率,随着信号调制频率的升高,对采样频率的要求也会越来越高,但是高速采样会受到 (Analog-to-Digital Converters, ADC) 器件采样频率的限制。为解决上述问题,人们将欠采样方法用于相位测距<sup>[12]</sup>。欠采样<sup>[13]</sup>方法过去曾被用于雷达信号测频。若用欠采样方法进行相位测距,则可在较高的调制频率下实现较低的采样频率,既提高调制频率,又降低对 ADC 采样频率的要求,有利于提高相位测距精度。

在确保高调制频率的条件下,采用先进的鉴相策略,进一步提高鉴相精度也是提高绝对测距精度的重要环节。孙懋珩,赵雯等<sup>[14]</sup>仿真对比了基于欠采样的数字同步解调法和频域谱分析法 (Fast Fourier Transform, FFT),发现频域谱分析法的鉴相精度更高,仿真鉴相误差为  $0.1^\circ$ 。王选

钢和缙宁祎等<sup>[15]</sup>将希尔伯特变换用于 FFT 法,减小了鉴相偏差,在信噪比为 40 dB、调制频率为 100 MHz 时,仿真鉴相精度可达  $0.1^\circ$ 。王兆华和侯正信<sup>[16]</sup>改进了 FFT 方法,提出了 apFFT 法,并认为 apFFT 可以使始端和终端保持连续,避免采样信号起止点和终止点的相位不连续,能够有效抑制频谱泄漏<sup>[17]</sup>。但上述方法大多基于仿真研究,没有开展实际测距系统的实验验证。

目前,调制频率最高大约为 100 MHz,测距精度在亚毫米量级,无法满足高端装备制造的高精度测距需求。本文提出欠采样与 apFFT 融合的方法,将调制频率提高至 200 MHz,采用 apFFT 进行鉴相,充分利用两者的综合优势,大幅度提高鉴相精度,从而提高激光测距精度。

## 2 相位测距原理

相位式激光测距是通过测量激光从起点到被测目标往返的相位差来间接测量激光飞行时间的测距技术。相位激光测距信号的往返过程见图 1。图中:点 O 为激光发射点,点 O' 为测距信号接收点,两者为同一个点,A 点为被测目标点, $x$  是待测距离, $\varphi$  是信号从发射到接收信号变化的相位。

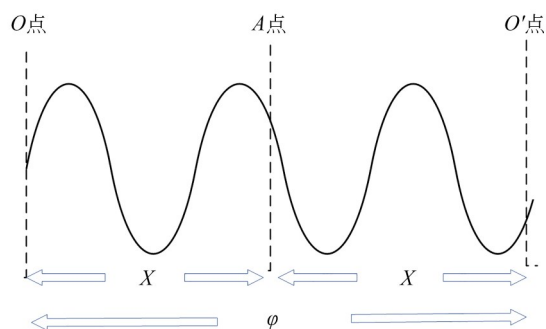


图 1 相位式激光测距信号往返

Fig. 1 Round-trip of phased laser ranging signals

激光由发射器从点  $O$  发出到达目标物点  $A$ , 经点  $A$  反射回点  $O'$ , 由探测器接收。此过程中, 假设激光的飞行时间为  $t$ , 飞行速度为  $c$ , 则从起点到终点的距离为:

$$x = \frac{ct}{2}. \quad (1)$$

式中飞行时间  $t$  可由相位  $\varphi$  求出, 即:

$$t = \frac{\varphi}{\omega} = \frac{\varphi}{2\pi f}, \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  是激光往返的相位变化,  $f$  是信号调制频率。由式(1)和式(2)可得:

$$x = \frac{c\varphi}{4\pi f}. \quad (3)$$

由式(3)可知, 所测距离由  $\varphi$  和  $f$  决定, 已知调制频率  $f$ , 只需测出相位差  $\varphi$  即可求出待测距离  $x$ 。相位激光测距系统原理如图 2 所示。

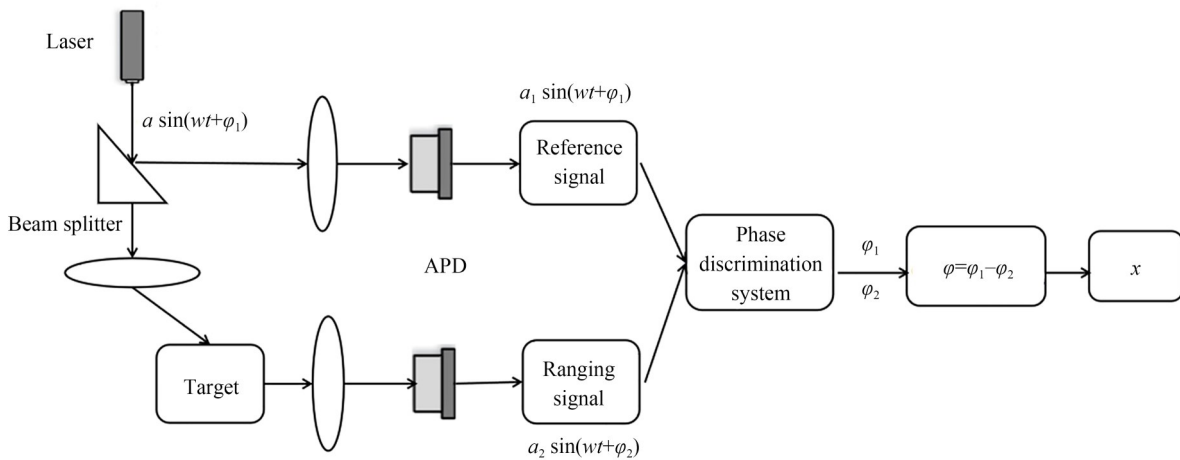


图 2 相位式激光测距系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of phase laser ranging system

在激光测距系统中, 为了降低噪声的影响, 激光器调制后的信号通过分光镜, 一部分作为参考信号, 直接通过光路, 由 APD 接收; 另一部分作为测量信号, 由目标物反射后, 再由 APD 接收; 将参考信号和测量信号送入鉴相系统, 通过对参考信号和测量信号鉴相分别求出相位  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ , 两者做差即可求出变化的相差  $\varphi$ , 并通过式(3)计算距离  $x$ 。显然, 相位测距精度与  $\varphi$  的鉴相精度相关, 鉴相精度越高, 测距精度就越高。

在系统工程实现时, 想要获得好的鉴相精度, 需要考虑各方面的影响, 比如调制频率、采样器件和鉴相方法等, 本文综合考虑这些因素, 提出采用“欠采样+apFFT”的方法实现鉴相系统。与正常采样法相比, 欠采样法在低的采样频率下能够获得更高的信号调制频率; 全相位频谱分析法抗干扰能力强、鉴相精度高; 将两种方法结合, 实现测距系统的鉴相并进行测距系统验证。

### 3 仿真分析

#### 3.1 欠采样对鉴相精度的影响

Nyquist 定理要求对信号采样时要满足式(4), 理论上才能恢复出原始波形。

$$f_s \geq 2f_m, \quad (4)$$

式中:  $f_s$  是采样频率,  $f_m$  是信号频率。

在实际电路中, 由于各种噪声的影响, 采样频率要远高于式(4)中的采样频率, 才能比较好地恢复原始信号<sup>[18]</sup>。但过高的采样频率对硬件的要求很高且伴随着高频串扰, 在具体实现时难度很大。传统方法使用混频电路<sup>[19]</sup>, 降低携带相位信息的高频信号频率, 达到降低采样频率的效果, 但该方法电路复杂, 且易引入干扰, 降低鉴相精度。为解决上述问题, 同时考虑到相位测距无须恢复原始信号, 只需提取对应的相位信息的特点, 本文提出欠采样的方式, 在降低采样频率的同时简化硬件复杂度, 减少干扰。

值得一提的是,欠采样的方法会使信号的频谱发生搬移。假设要提取频率为 $f_m$ 的信号携带的相位信息,则欠采样后变为提取 $f'$ 频率处的信息,如下:

$$f' = \begin{cases} f_m - f_s \left[ \frac{f_m}{f_s} \right], & 0 < f_s < f_m, \\ f_s - f_m, & f_m < f_s < 2f_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_m$ 是信号频率, $f_s$ 是采样频率, $[\cdot]$ 是向下取整, $f'$ 是欠采样后携带原频相位信息的谱线频率。

为了分析欠采样方法的可行性,首先采用仿真法研究欠采样对鉴相精度的影响,仿真生成两路频率为 201 MHz、相位不同的正弦信号,均加入 40 dB 的高斯白噪声,两路信号的相位差分别设为  $10^\circ, 30^\circ, 170^\circ, 180^\circ, 200^\circ, 330^\circ$ ,依次用不同的采样率对信号采样,得到不同采样率下的鉴相结果,如图 3 所示,可以比较欠采样和正常采样的鉴相精度。

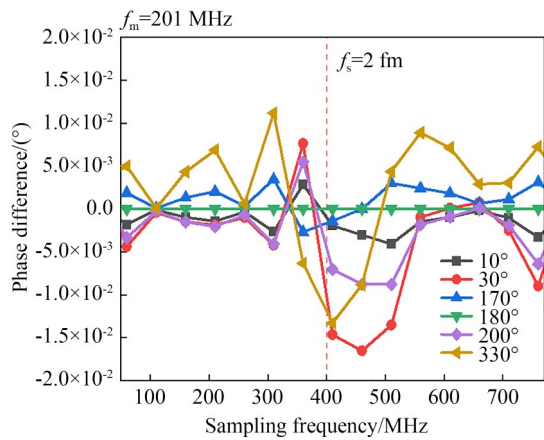


图 3 信号频率为 201M 时不同相位差下欠采样与正常采样的鉴相误差

Fig. 3 Undersampling and normal sampling phase discrimination error under different phase differences with signal frequency of 201M

图 3 为调制频率 $f_m$ 固定,采样频率变化的鉴相误差,横坐标是采样频率 $f_s$ ,纵坐标是调制信号 $f_m$ 为 201 MHz 时仿真计算的相位差与设定相位差的偏差,参考线 $f_s = 2f_m$ 的左边代表欠采样,右边代表正常采样。从图中可以看出,当选取采样频率是调制频率的倍数 402 MHz 时,在附近区域出现较大的鉴相误差;除此之外,参考线左边和

参考线右边整体鉴相误差相近,说明欠采样和正常采样在此区域内的鉴相误差相近,如果选取欠采样频率得当,欠采样不会影响鉴相误差。因此,合理选用欠采样频率不会导致鉴相精度变低,欠采样方法用于相位测距具有可行性。后续测距系统的采样频率选用 100 MHz。

### 3.2 鉴相方法精度

相位测距广泛采用数字鉴相,主要方法有正交法、相关法,及利用频域鉴相等方法<sup>[20]</sup>。正交法抗高斯白噪声能力较弱,相关法对信号采样要求严格。相较于两种方法,频域鉴相法有较高的鉴相精度,可与欠采样方法结合实现高精度鉴相。频域鉴相主要有 FFT 和 apFFT 两种方法。

相较于 FFT,apFFT 增加了预处理过程,具体步骤如下:

- (1) 两个长度为  $N$  汉宁窗卷积,得到长度为  $2N - 1$  的卷积窗;
- (2) 对长度为  $2N - 1$  的卷积窗进行归一化;
- (3) 用归一化的卷积窗对长度为  $1 : 2N - 1$  的时间序列信号加权;
- (4) 将第 1 项与  $N + 1$  项,第 2 项与  $N + 2$  项, ..., 第  $N - 1$  项与第  $2N - 1$  项相加,得到  $N$  点时间序列;
- (5) 对预处理后得到的  $N$  点序列再进行 FFT。

FFT 变换公式如下:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} k n}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (6)$$

其中: $x(n)$ 为长度从  $0, 1, 2, \dots, N-1$  的  $N$  个时域序列, $X(k)$ 为长度从  $0, 1, 2, \dots, N-1$  的  $N$  个频域序列。FFT 将时域的  $N$  个点变换为频域的  $N$  个点,频域各点分别携带不同频的实部、虚部信息。

序列点与频率的对应关系如下:

$$k' = f' \frac{N}{f_s}, \quad (7)$$

其中: $k'$ 代表频域的序列点数, $N$ 是 FFT 的计算点数, $f_s$ 是采样频率。正常采样时, $f'$ 是信号的频率;欠采样时, $f'$ 是据式(5)得出的频率。

综合式(4)~式(6)可得对应频率的实部、虚部信息,如下:



$$X(k') = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2n\pi}{N} k'} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \frac{2n\pi}{N} k' - j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin \frac{2n\pi}{N} k'. \quad (8)$$

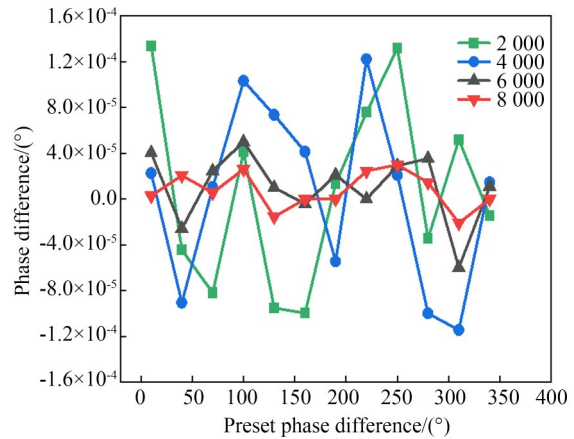
所求信号的相位差为:

$$\theta(k') = \arctan \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin \frac{2n\pi}{N} k'}{\sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \frac{2n\pi}{N} k'} = \arctan \left( \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \frac{\sin \frac{2n\pi}{N} k'}{\cos \frac{2n\pi}{N} k'} \right). \quad (9)$$

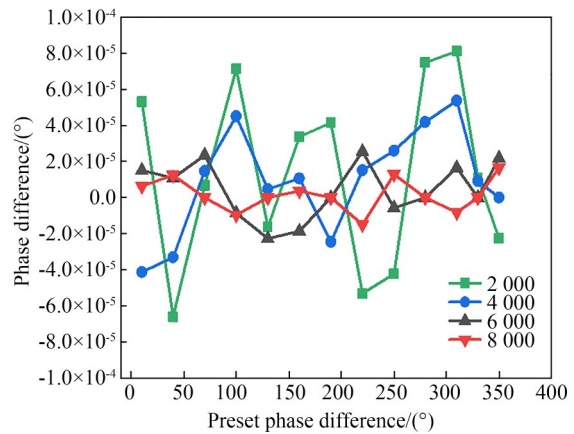
为了对比分析 FFT 和 apFFT 两种频域鉴相方法的特性,采用仿真法生成频率为 201 MHz 的正弦信号,采样频率为 100 MHz,初始相位在 0°~350°变化,并设置多组计算点数不同的对照组,计算点数分别设为 2 000, 4 000, 6 000, 8 000。FFT 法结果见图 4 (a), apFFT 法结果见图 4 (b)。

如图 4 (a) 所示,FFT 法在计算点数为 2 000, 4 000 时鉴相精度在 ±0.000 12° 左右,点数为 6 000 时鉴相精度优于 ±0.000 08°, 计算点数为 8 000 时鉴相精度在 ±0.000 02° 左右,高于其他对照组。如图 4 (b) 所示,当 apFFT 法计算点数为 8 000 时鉴相误差最低,精度在 ±0.000 002° 左右,远高于其他计算点数的对照组。对比图 4 (a) 和 4 (b),FFT 法和 apFFT 法均在 8 000 的计算点数下鉴相精度最高,且 apFFT 法的鉴相精度比前者高一个数量级。

实际测距过程中,由于仪器电磁干扰和外部环境干扰,测距信号有较大噪声,影响鉴相精度,本文进一步仿真比较两种频域鉴相方法的抗噪性能。测距时,参考信号直接从内光路得到,受到的噪声干扰较小。相比而言,测距信号更易受到外界噪声的干扰。MATLAB 仿真时,两路信号均加入高斯白噪声,参考信号的信噪比设为 45 dB,测距仿真信号的信噪比从 5 dB 增加到 50 dB,变化步长设为 5 dB,在每个信噪比下进行多次鉴相,计算鉴相均值,并求出与预设相差的绝对误差,结果如图 5 所示。



(a) FFT法在不同相差和计算点数下的鉴相误差  
(a) Phase discrimination error of FFT method under different phase differences and calculation points



(b) apFFT法在不同相差和计算点数下的鉴相误差  
(b) Phase discrimination error of apFFT method under different phase differences and calculation points

图 4 FFT 和 apFFT 法在不同相差和计算点数下的鉴相误差

Fig. 4 Phase discrimination error of FFT and apFFT methods under different phase differences and calculation points

如图 5 所示,随着横轴信噪比的增大,FFT 法和 apFFT 法的鉴相误差逐渐减小,在 15 dB 之后减小趋势变缓,误差趋于稳定,FFT 法的误差稳定在 0.006~0.009° 内,apFFT 法的误差稳定在 0.002° 以下。在相同的信噪比下,apFFT 法的鉴相误差始终小于 FFT 法。仿真结果表明,在信号频率为 201 MHz,采样频率为 100 MHz,相同信噪比时,apFFT 法优于 FFT 法。

另一方面,考虑到相位激光测距系统中激光

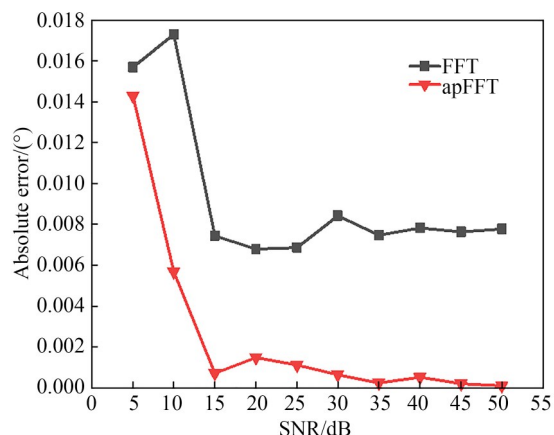


图5 不同信噪比两种鉴相方法的鉴相误差对比

Fig. 5 Comparison of phase detection error of two phase detection methods with different signal-to-noise ratios

信号频率源不稳定可能导致参考和测量信号采样存在偏移,影响鉴相精度。为此仿真分析存在频率偏移时两种频域鉴相方法的鉴相精度。设置参考信号频率为 201 MHz,信噪比为 45 dB;测量信号频率为  $201 \text{ MHz} \pm 4 \text{ Hz}$ ,信噪比为 35 dB,每个频率下进行 1 000 次仿真鉴相,结果如图 6 所示。

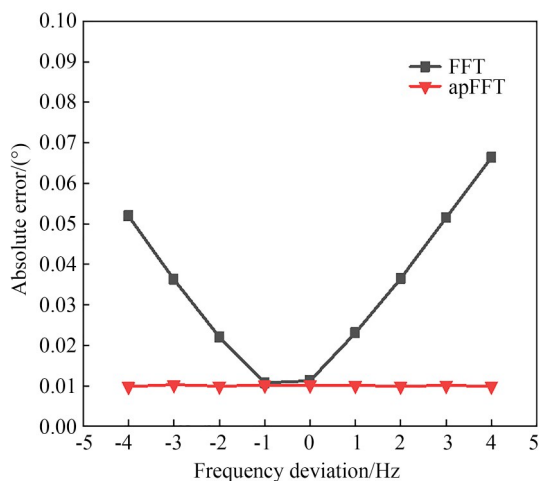


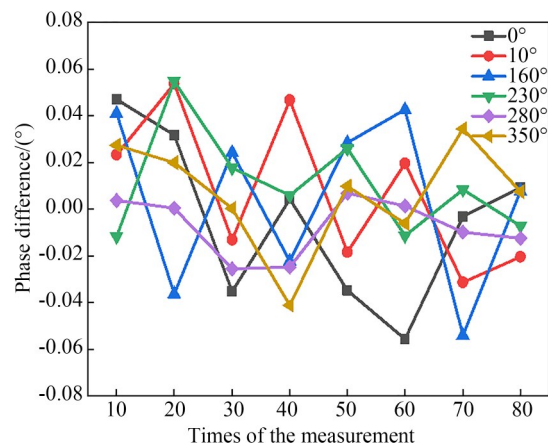
图6 不同频率偏移时两种鉴相方法的鉴相误差

Fig. 6 Phase detection error of two phase detection methods at different frequency offsets

图 6 中,当测量信号频偏为 0 时,FFT 法的鉴相误差最小,随着频率偏移的增大,FFT 法的鉴相误差逐渐增大。apFFT 法在频率偏移的过程

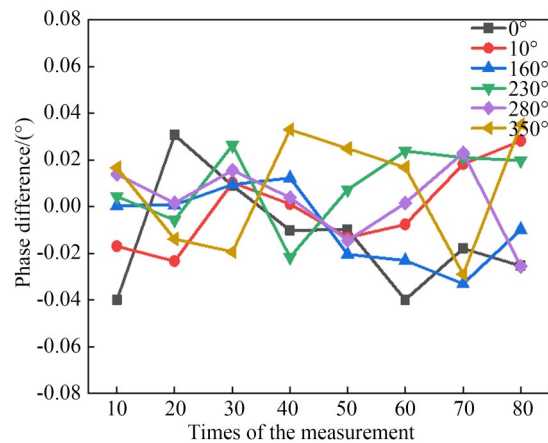
中,误差变化很小。仿真结果表明,当测量信号存在频率偏移时,相较 FFT 法,apFFT 法鉴相具有更好的抗频率偏移能力,鉴相精度优于前者。

最后,考虑到实际 ADC 的采样信号存在多种噪声,故直接利用 ADC 采样到的信号进行频域鉴相,鉴相误差如图 7 所示。



(a) 实际采样信号下 FFT 鉴相误差

(a) FFT phase discrimination error under actual sampling signal



(b) 实际采样信号下 apFFT 鉴相误差

(b) apFFT phase discrimination error under actual sampling signal

图7 实际采样信号下 FFT 和 apFFT 的鉴相误差

Fig. 7 Phase discrimination errors of FFT and apFFT under actual sampling signals

图 7(a) 比较了在不同预设相位差下 FFT 法多次鉴相的误差,最大鉴相误差大约在  $\pm 0.06^\circ$  左右;图 7(b) 比较了在不同预设相位差下 apFFT 法多次鉴相的误差,最大鉴相误差大约在  $\pm 0.04^\circ$  左右;综合比较图 7(a) 和 7(b) 可得,

apFFT 鉴相精度整体要优于 FFT。

实际上,当采样为整周期时,频谱泄漏最小,频域分析鉴相精度最高。FFT 法要尽可能调整采样频率和采样点数以达到整周期采样,但实际结果一般会存在极小的差距,影响鉴相精度。而 apFFT 法对采样序列进行预处理后,对于任何采样频率和采样点数,均可达到采样整周期的效果,因此相较 FFT 法,apFFT 法具有“相位不变性”<sup>[21]</sup>,故精度高于 FFT 法。

综合考虑以上仿真结果,系统采用 apFFT 的鉴相方法。

### 4 实 验

为了实现大范围高精度的激光相位测距,在仿真分析基础上设计鉴相电路系统,其主要参数如下:信号频率为 201 M,采样频率为 100 MHz,计算点数为 8 000,系统主时钟为 100 MHz。测距系统的主控电路使用 XILINX 的 XC7K325T 系列,采样芯片使用 AD9250。鉴相电路流程如图 8 所示。

如图 8 所示,相位测距鉴相系统的工作流程如下:

(1)系统上电;

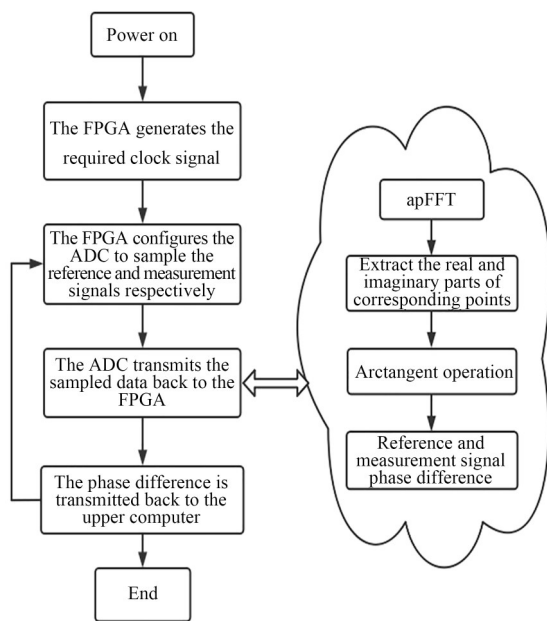


图 8 相位式测距鉴相系统框图

Fig. 8 Block diagram of phased laser ranging system

(2)FPGA 生成一系列时钟信号;

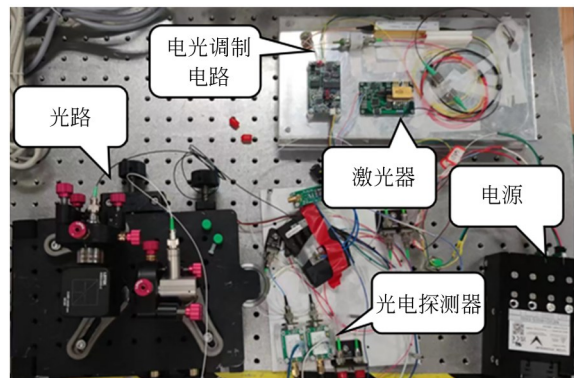
(3)FPGA 作为主控电路<sup>[22]</sup>,通过 SPI 协议配置 AD9250 工作模式,控制它对参考和测距信号进行采样;

(4)AD9250 将采样数据通过 JESD204B 协议传给 FPGA,由 FPGA 内部进行数据处理,包括 apFFT 处理、提取相应序列谱线、反正切变换、求相位差等操作;

(5)FPGA 等待上位机指令,得到指令后将相位差数据通过串口传回上位机显示。若得到多次鉴相指令,返回第三步,进行多次测量。

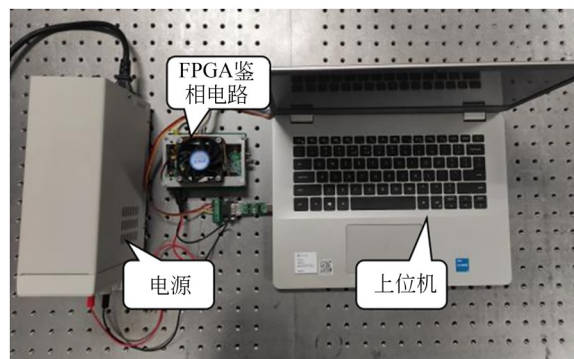
为测试测距电路的性能,按图 2 相位测距原理图搭建测距系统,实物如图 9 所示。

图 9(a)为测距电路的光路系统,图 9(b)为相位测距电路的鉴相系统。测距电路使用 12 V 电压供电,使用安捷伦 81150A 信号发生器产生两



(a) 高频相位测距光路系统

(a) High frequency phase ranging optical system



(b) 高频相位测距电路鉴相系统

(b) Phase detection system of high frequency phase ranging circuit

图 9 高频相位测距光路系统和鉴相系统

Fig. 9 Optical and phase detection system of high-frequency phase ranging circuit

路相位不同的正弦波,相位差分别设置为  $10^\circ$ ,  $160^\circ$ ,  $230^\circ$ ,  $280^\circ$  及  $350^\circ$ , 进行多次鉴相, 将相位结果传输到上位机显示。随机选取 3 次鉴相结果, 如表 1 所示。多次测量的相位误差如图 10 所示。

表 1 是从多次鉴相结果中随机选取 3 次的鉴相数据, 其中第 1 列是标准相位差, 后 3 列为鉴相数据。观察表中每行可以看出, 实际鉴相结果与标准相位差相近, 鉴相误差均小于  $0.04^\circ$ 。

如图 10 所示, 在不同预设相差下, 鉴相误差大约在  $\pm 0.04^\circ$  以内, 对应的测距精度为  $\pm 0.08$  mm。

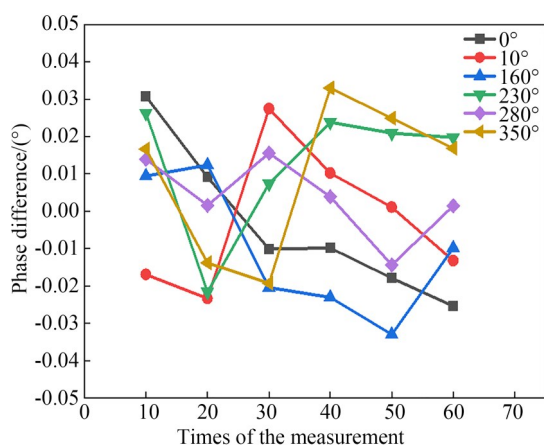


图 10 测量的相位差与实际相位差的误差

Fig. 10 Error between measured phase difference and actual phase difference

表 1 相位测量结果

Tab. 1 Result of phase measurement ( $^\circ$ )

标准相位差/ $^\circ$	1	2	3
0	-0.004 87	-0.010 45	0.002 20
10	9.992 95	10.010 92	10.014 37
160	160.005 79	160.006 56	160.011 26
230	229.991 45	230.002 81	230.006 53
280	279.997 15	279.989 89	280.002 46
350	350.005 78	349.997 32	350.011 10

#### 参考文献:

- [1] 董登峰, 周维虎, 纪荣祎, 等. 激光跟踪仪精密跟踪系统的设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 309-318.  
DONG D F, ZHOU W H, JI R Y, et al. Design of

图 11 表征了鉴相系统的重复性。从图中可以看出, 不同相差下, 标准差在  $0.005 \sim 0.02^\circ$  之间变化, 鉴相系统的重复性较好。

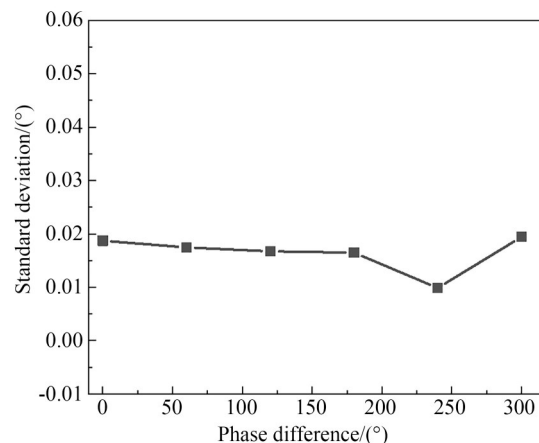


图 11 不同相位差下多次测量的标准差

Fig. 11 Measurement standard deviation of different phase differences

## 5 结 论

本文从原理和系统实现方面分析了提高相位测距精度的方法, 即提高调制频率和鉴相精度。针对这两种方法仿真对比了欠采样和正常采样的鉴相误差, 分析了欠采样方法的可行性; 在此基础上仿真比较了 FFT 和 apFFT 在不同相差和采样点数影响下的鉴相误差, 以及两者对高斯白噪声和频率偏移的抗干扰能力, 对比得出 apFFT 法的鉴相和抗干扰能力更强。最后, 根据仿真研究结果构建了基于 FPGA 的欠采样全相位激光测距系统, 当待测信号为 201 MHz, 计算点数为 8 000 点时, 系统的鉴相精度优于  $\pm 0.04^\circ$ , 测距精度为  $\pm 0.08$  mm 左右, 系统方差小于 0.01, 较为稳定。这表明本文提出的“欠采样+apFFT”方法在高精度激光测量领域具有重要的应用价值。

precise tracking system of laser tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 309-318. (in Chinese)

- [2] BÉCHADERGUE B, CHASSAGNE L, GUAN H Y. Visible light phase-shift rangefinder for platooning applications[C]. 2016 *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Sys-*



- tems (ITSC). November 1-4, 2016, Rio de Janeiro, Brazil. IEEE, 2016: 2462-2468.
- [3] JUNG J W, PARK J, KANG T, *et al.* Mobile robot path planning using a laser range finder for environments with transparent obstacles [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10, 2799.
- [4] FEDORENKO A V, VORONA I O, MASLOV V P. Investigation of Ge p-i-n photodetector as a part of pulsed laser rangefinder prototype[J]. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 2021, 24(1): 100-104.
- [5] POUJOULY S, JOURNET B, MILLER D. Laser range finder based on fully digital phase-shift measurement [C]. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No. 99CH36309)*. May 24-26, 1999, Venice, Italy. IEEE, 2002: 1773-1776.
- [6] 张赫, 乔川, 匡海鹏. 基于激光测距的机载光电成像系统目标定位[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 8-16.
- ZHANG H, QIAO CH, KUANG H P. Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 8-16. (in Chinese)
- [7] PENG X Y, YANG J Q, WU C H, *et al.* The method of improving the measurement accuracy of infrared laser ranging system [C]. *Proc SPIE 11763, Seventh Symposium on Novel Photoelectron Detection Technology and Applications*, 2021, 11763: 1968-1973.
- [8] MA H B, LUO Y, HE Y, *et al.* The short-range, high-accuracy compact pulsed laser ranging system [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(6): 2146.
- [9] 滕晓. 用于相位式激光测距的欠采样鉴相方法研究及实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- TENG X. *Research and Implementation of Undersampling Phase Discrimination Method for Phase Laser Ranging*[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [10] 王心遥, 张珂殊. 基于欠采样的激光测距数字鉴相方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1330-1337.
- WANG X Y, ZHANG K SH. Digital phase-shift measuring methods based on sub-sampling in laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1330-1337. (in Chinese)
- [11] 姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 等. 基于激光拍频高精度相位式测距方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(9): 162-166.
- JIANG CH H, YANG J H, ZHANG L J, *et al.* High-precision phase-shift laser range finder system based on laser beat-frequency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 162-166. (in Chinese)
- [12] 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.
- JIA F X, DING ZH L, YUAN F. Phase-shift laser range finder receiver system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2377-2384. (in Chinese)
- [13] BI H, JIANG C L, ZHANG B C, *et al.* Radar change imaging with undersampled data based on matrix completion and Bayesian compressive sensing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1546-1550.
- [14] 孙悉珩, 赵雯. 应用欠采样原理提高相位式激光测距精度[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 70-73.
- SUN M H, ZHAO W. Precision improvement of undersampling theory using phasic laser rangefinder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 70-73. (in Chinese)
- [15] 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 SH. Unbiased improvement of spectrum analysis phase discrimination for phase-shift laser range finder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 888-895. (in Chinese)
- [16] 王兆华, 黄翔东, 杨尉. 全相位 FFT 相位测量法 [J]. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(4): 28-32, 27.
- WANG ZH H, HUANG X D, YANG W. The measuring phase method of all-phase FFT [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2007, 29(4): 28-32, 27. (in Chinese)
- [17] 郭天茂, 刘柯, 缪寅宵, 等. 全相位 FFT 频率测量在调频激光测距技术中的应用 [J]. *宇航计测技术*, 2019, 39(2): 45-50.
- GUO T M, LIU K, MIAO Y X, *et al.* Application of all phase FFT frequency measurement in FMCW laser ranging technology [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2019,

- 39(2): 45-50. (in Chinese)
- [18] 林巍晓, 刘士湛. “通信原理”中采样与信道容量的直观教学[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(5): 33-36.  
LIN W Y, LIU SH ZH. Intuitive teaching of sampling and channel capacity in communication principle[J]. *Journal of Electrical and Electronic Education*, 2022, 44(5): 33-36. (in Chinese)
- [19] 陈祚海. 无棱镜相位式激光测距系统的设计与实现[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.  
CHEN Z H. *Design and Implementation of Prism-free Phase Laser Ranging System*[D]. Suzhou: Soochow University, 2011. (in Chinese)
- [20] 潘映伶, 纪荣祎, 高超, 等. 矢量内积法高速相位式激光测距技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 269-275.  
PAN Y L, JI R Y, GAO CH, *et al.* High-speed phase laser ranging technology based on vector inner product method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 269-275. (in Chinese)
- [21] 黄翔东, 王兆华, 罗蓬, 等. 全相位FFT密集谱识别与校正[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 172-177.  
HUANG X D, WANG ZH H, LUO P, *et al.* Discrimination and correction for dense all-phase FFT spectrums [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(1): 172-177. (in Chinese)
- [22] 范进, 金声震, 孙才红. 超高速FFT处理器的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2241-2246.  
FAN J, JIN SH ZH, SUN C H. Design and implementation of hyper-speed FFT processor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2241-2246. (in Chinese)

#### 作者简介:



孟语璇(1997—),女,山西晋中人,硕士研究生,2016年于山西大学获得学士学位,主要从事相位式激光测距方面的研究。E-mail: mengyuxuan20@mails.ucas.ac.cn

#### 通讯作者:



董登峰(1981—),男,河南商丘人,博士,研究员,硕士生导师,2004年于郑州大学获得学士学位,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,现为中国科学院微电子研究所光电技术研发中心副主任,主要从事光学精密测量、跟踪伺服控制、高速信息处理等方面的研究。E-mail: dongdengfeng@ime.ac.cn