

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 高精度相位式激光雷达测距系统的设计

李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 张传辉, 李伟, 牟媛慧, 蔡恩林

#### 引用本文:

李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 等. 高精度相位式激光雷达测距系统的设计[J]. *光电工程*, 2024, 51(3): 230246.

Li A A R, Shao G C, Jin F Y, et al. Design of high precision phase laser radar ranging system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230246.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.230246>

收稿日期: 2023-10-07; 修改日期: 2024-01-13; 录用日期: 2024-01-15

### 相关论文

#### 单光子激光雷达技术发展现状与趋势

赵浴阳, 周鹏飞, 解天鹏, 姜成昊, 蒋衍, 赵政伟, 朱精果

*光电工程* 2024, 51(3): 240037 doi: 10.12086/oe.2024.240037

#### 调频连续波激光多路并行相干精密长度测量方法

胡申博, 刘俊辰, 余苏, 杨承昱, 曲兴华, 张福民

*光电工程* 2024, 51(3): 230285 doi: 10.12086/oe.2024.230285

#### 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述

李超林, 刘俊辰, 张福民, 曲兴华

*光电工程* 2022, 49(7): 210438 doi: 10.12086/oe.2022.210438

#### 基于神经网络的侧向激光雷达信号去噪算法

马愈昭, 张岩峰, 冯帅

*光电工程* 2023, 50(6): 220341 doi: 10.12086/oe.2023.220341

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.230246

## 高精度相位式激光雷达测距系统的设计

李岸然<sup>1</sup>, 邵光存<sup>2</sup>, 靳凤宇<sup>3</sup>, 张传辉<sup>2</sup>, 李伟<sup>2</sup>,  
牟媛慧<sup>4</sup>, 蔡恩林<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院激光研究所,  
山东 济宁 272000;

<sup>2</sup>济宁科力光电产业有限责任公司, 山东 济宁 272000;

<sup>3</sup>天津市天锻压力机有限公司, 天津 300000;

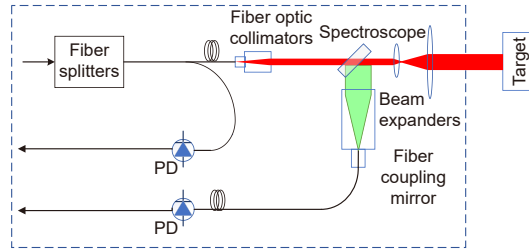
<sup>4</sup>青岛大学电子信息学院, 山东 青岛 266071

**摘要:** 现代科技中, 激光雷达在自动导航、工业测绘等领域扮演关键角色, 但传统相位测距系统普遍存在测量精度低和结构复杂等问题。本文提出了一种新型的高精度相位式激光雷达测距系统。该系统采用激光控制同频参比的相位差检测方法, 包括对激光发射和接收模块的光学结构优化, 以及对接收电路的放大滤波与差分混频处理, 最终制作出了一个基于 AD8302 的高分辨率鉴相系统。实验结果显示, 该系统测量精度为毫米级别, 简便实用且能满足广泛的实际应用需求。这一研究为激光雷达技术在高精度距离测量方面提供了可行的解决方案。

**关键词:** 激光雷达; 相位; 精度; 鉴相

**中图分类号:** TN959.3

**文献标志码:** A



李岸然, 邵光存, 靳凤宇, 等. 高精度相位式激光雷达测距系统的设计[J]. 光电工程, 2024, 51(3): 230246

Li A R, Shao G C, Jin F Y, et al. Design of high precision phase laser radar ranging system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230246

## Design of high precision phase laser radar ranging system

Li Anran<sup>1</sup>, Shao Guangcun<sup>2</sup>, Jin Fengyu<sup>3</sup>, Zhang Chuanhui<sup>2</sup>, Li Wei<sup>2</sup>, Mou Yuanhui<sup>4</sup>,  
Cai Enlin<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Academy of Sciences Laser Research Institute, Jining, Shandong 272000, China;

<sup>2</sup>Jining Keli Optoelectronics Industry Co., Ltd., Jining, Shandong 272000, China;

<sup>3</sup>Tianjin Tianforging Press Co., Ltd., Tianjin 30000, China;

<sup>4</sup>School of Electronic Information, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

**Abstract:** In modern science and technology, LiDAR plays a key role in automatic navigation, industrial mapping and other fields, but the traditional phase ranging system has many problems such as low measurement accuracy and complex structure. A new high-precision phase laser radar ranging system is proposed in this paper. The

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-01-13; 录用日期: 2024-01-15

\*通信作者: 蔡恩林, caienlin@qdu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

system adopts the phase difference detection method of laser control with the same frequency reference, including the optical structure optimization of the laser transmitting and receiving modules, and the amplification filtering and differential mixing processing of the receiving circuit, and finally produces a high-resolution phase discrimination system based on AD8302. The experimental results show that the measurement accuracy of the system is millimeter level, which is simple and practical and can meet the needs of a wide range of practical applications. This research provides a feasible solution for LiDAR technology in high-precision distance measurement.

**Keywords:** LiDAR; phase; precision; phase discrimination

## 1 引言

激光雷达系统作为一种重要的距离测量工具, 已经在众多领域中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 包括在航空航天测量<sup>[3]</sup>、三维测绘<sup>[4]</sup>和自动驾驶<sup>[5]</sup>等领域中都扮演着不可或缺的角色。在这些应用中, 对于高精度的距离测量需求越来越迫切<sup>[6-8]</sup>。在众多雷达测距技术中, 相位式激光雷达测距技术因其高精度、高分辨率和抗噪声性能而备受关注, 并已进入商用阶段<sup>[9-10]</sup>。

在过去的几年里, 相位式激光雷达测距技术获得了令人瞩目的成就。研究人员不断改进硬件和算法, 以提高系统的性能。据相关文献显示, 中国科学院光电所已在相位激光测量核心算法上获得了一些成果, 据技术验证近程测距精度达亚毫米级<sup>[11]</sup>。哈尔滨工业大学可以在 15 m 范围内对目标进行毫米量级的高精度定位。电子科技大学也研制出了双频激光相位式测距仪, 其测量精度可达 2.64 mm<sup>[12]</sup>。我国的研究工作主要集中在相位式激光雷达的测距原理、数据处理算

法, 以及点云成像相关技术方面<sup>[13]</sup>。国外的相位激光测距仪器与核心技术则较成熟, 并已在大尺度非合作目标的精确检测中获得了广泛的应用<sup>[14]</sup>。表 1 展示了国外主要测距仪器参数。

尽管相位式激光雷达测距技术取得了显著进展, 但仍然存在一些未解决的问题。例如在复杂环境中的测量精度和性能稳定性问题。此外, 高精度相位测距系统的成本通常较高, 这限制了其在某些领域的广泛应用。解决这些问题将为实现高精度距离测量的应用提供更多机会。

鉴于相位式激光雷达测距技术的潜力和现有挑战, 本研究旨在设计开发一种高精度相位式激光雷达测距系统, 以解决目前存在的问题并提供更高的测量精度和性能稳定性。充分利用最新的硬件和相位解算方法, 以提高系统的性能、稳定性和抗干扰能力, 将这一系统应用于实际场景中。为高精度距离测量技术的发展和应用做出贡献, 为未来更广泛的应用领域提供更准

表 1 国外主要测距仪器参数列表

Table 1 List of main distance measuring instrument parameters abroad

外观图			
生产厂家	Velodyne LiDAR	Leica ScanStation	Luminar Technologies
所在国	美国	瑞士	美国
仪器型号	HDL-64E	Leica ScanStation C10	Luminar Iris
测距方式	相位式	相位式	相位式
激光波段/nm	700~1550	700~1550	1550
激光等级	Class 1	Class 3	Class 1
测程/m	100~200	134~300	250~500
扫描速度/(10 <sup>3</sup> points/second)	700~1400	50	122
距离不确定度(k=2)	<1 mm@25 m	<2.5 mm@15 m	<3 cm@280 m

确的测距工具。

## 2 激光测距原理分析与对比

脉冲激光测距、激光三角法测距和相位激光雷达测距都是常见的激光测距技术<sup>[15]</sup>, 脉冲激光测距是通过测量短脉冲从激光器到目标再返回的时间来完成目标物体的距离测量。此方法测距范围长, 但测距精度低<sup>[16]</sup>。激光三角法测距利用激光束与两个或多个接收器之间的角度差异来计算目标物体的距离。此方法常用于测量地形或大型目标的位置, 精度和分辨率易受角度测量误差的影响, 且设备复杂昂贵<sup>[17-18]</sup>。相位式激光雷达测距利用激光脉冲的相位差来测量目标物体的距离<sup>[19]</sup>, 能够实现毫米甚至亚毫米级别的距离测量<sup>[20]</sup>。相位式激光雷达测距具有高精度的特点, 且不需要与目标物体接触, 在各个行业及人们的日常生活中有着广泛的应用<sup>[21-22]</sup>。

相位激光测距的原理如图 1 所示, 它是由起点  $A$  发射出一种具有特定频率、振幅的正弦调制激光, 经过一段距离到达终点  $O$  后反射回原点, 通过比较回波信号和发射信号的相位差, 计算得到两点的距离<sup>[23-24]</sup>。

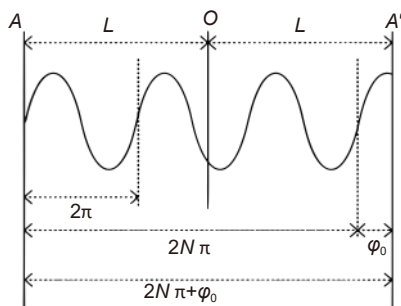


图 1 相位激光测距原理

Fig. 1 Principle of phase laser ranging

激光发射器发出的信号为

$$S_1 = a \sin(2\pi ft + \varphi). \quad (1)$$

激光探测器接收的信号为

$$S_2 = a \sin(2\pi ft + \varphi + \varphi_0). \quad (2)$$

式中:  $a$  为信号调制的振幅,  $f$  为发出的调制信号的频率,  $\varphi$  为初始信号的相位,  $\varphi_0$  为发射信号与接收信号的相位差。

待测距离  $L$  为

$$L = \frac{ct_{2L}}{2}, \quad (3)$$

又因为  $t_{2L} = \frac{\varphi}{\omega}$ ,  $\omega = 2\pi f$ , 则

$$t_{2L} = \frac{\varphi}{2\pi f}, \quad (4)$$

式中:  $t_{2L}$  为信号从发出点到测量目标后又返回至接收点所用时间,  $c$  为光在空气中传播的速度,  $\omega$  为角频率。

将式 (4) 代入式 (3) 可以得出:

$$L = \frac{c}{2} \frac{\varphi}{2\pi f}. \quad (5)$$

任何相位差都可被划分为整数个  $2\pi$  和不足整数个  $2\pi$  的  $\Delta\varphi$  之和, 则:

$$L = \frac{c}{2f} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) = \frac{\lambda}{2} \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right). \quad (6)$$

把  $\frac{\lambda}{2}$  当成测尺, 光的频率和波长已知, 只要求出  $N$  的个数和相位差就可以得到待测距离<sup>[25]</sup>。但当测尺长度大于待测距离时,  $N = 0$ , 这时距离  $L = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi}$ 。

据此可以看出, 在被测量的距离很长的情况下, 调制频率可以适当减小, 使其  $\frac{\lambda}{2} > L$ , 这样就可以确定出距离  $L$ , 但这样会增加测量的误差。同样地, 在被测距离很短的情况下, 可以适当增加调制频率, 使其精度更准确<sup>[26]</sup>。

在本相位测距系统中, 设所选频率为 100 MHz、10 MHz、1 MHz、100 kHz 和 10 kHz, 则测尺长度, 测尺频率和精度之间的对应关系如表 2 所示。

表 2 测尺长度和测尺精度表

Table 2 Scale length and accuracy table

频率	长度/m	精确度/m
100 Hz	1.5	0.001
10 Hz	15	0.01
1 Hz	150	0.1
100 kHz	1500	1
10 kHz	15000	10

由上图可知, 当测尺的频率一定时, 测尺的长度与精确度成反比关系, 测尺精确度即为此频率情况下测尺长度产生的误差。在本系统中, 随着测尺长度的增加, 精确度随之降低。假设鉴相精度为  $0.1^\circ$ , 测距精度达 0.001 m, 则信号频率应大于 83.33 MHz, 即可选择 100 MHz 信号频率。然而此时测尺最大测量距离仅为 1.5 m, 为了弥补该测量技术的缺陷, 可以



使用多个测尺联合测量的方式<sup>[27]</sup>。选择 1 MHz 信号作为低频率, 此时测尺的最大测量长度可达 150 m。

### 3 系统性能分析

#### 3.1 系统设计

从冗余设计以及电路设计的费用与难度等方面进行全面考虑, 相位式激光测距采用 100 MHz 的精测尺和 1 MHz 的粗测尺。利用高频测尺的高精度优势来测量被测距离的精确距离, 利用低频测尺的宽量程优势来测量被测距离的范围<sup>[28]</sup>。最后, 将两个结果合成即为最终距离。

基于相位式激光测距方法的系统框图 2 所示。

本系统采用 stm32f103 为核心单片机, 驱动 DDS 信号发生模块产生本振信号与主振信号, 其中主振信号为 100 MHz 与 1 MHz, 分别为高频精测尺信号与低频粗测尺信号, 双频测尺信号驱动激光调制电路产生激光, 大部分信号经过激光扩束准直系统后发射到目标物体再反射回来, 经过光学接收系统将光信号转换成电信号, 再经过功分模块分为两部分, 一部分经过高频滤波后与 99 MHz 本振信号混频, 混频后的信号在经过滤波放大后输入到 AD8302 鉴相模块中; 另一部分经过低频滤波获得 1 MHz 信号, 进入放大模

块后也由 AD 采集进入 AD8302 模块。另一小部分未经过发射到目标点直接反射回来的信号, 直接进入 APD 及其处理单元, 由 AD 采集模块采集到 AD8302 中作为参考信号, 进行相位差计算, 解算出目标距离信息。

#### 3.2 激光发射系统

要同时产生初相位相同的 1 MHz 低频测尺和 100 MHz 高频测尺信号, 对信号源的相位精度及频率稳定性提出了较高的要求。DDS 技术与传统频率合成技术相比频率分辨率高、输出频点多且输出相位噪声低, 则本系统所设计的相位式激光测距系统中采取 stm32f103+DDS 的方案进行激光测距。利用信号发生模块实现高低频率测尺信号及本振信号三种信号的输出。以 ADI 公司的 AD9959 单片机为核心, AD9959 的数据采集速度达到了 500 MS/s。另外, AD9959 能同时输出四个不同幅度、相位和频率的信号, 每一个信道都是彼此独立的, 完全符合了本文的设计要求。

在相位激光雷达中, 激光光源是最重要的部分。激光发射器的工作是产生高强度高稳定的激光脉冲。为达到更高的测量精度和更大的测量范围, 本文选用了波长 650 nm、功率 100 mW 的 HSLD650-5 型激光器。其各项技术指标均达到了设计要求, 具有较高

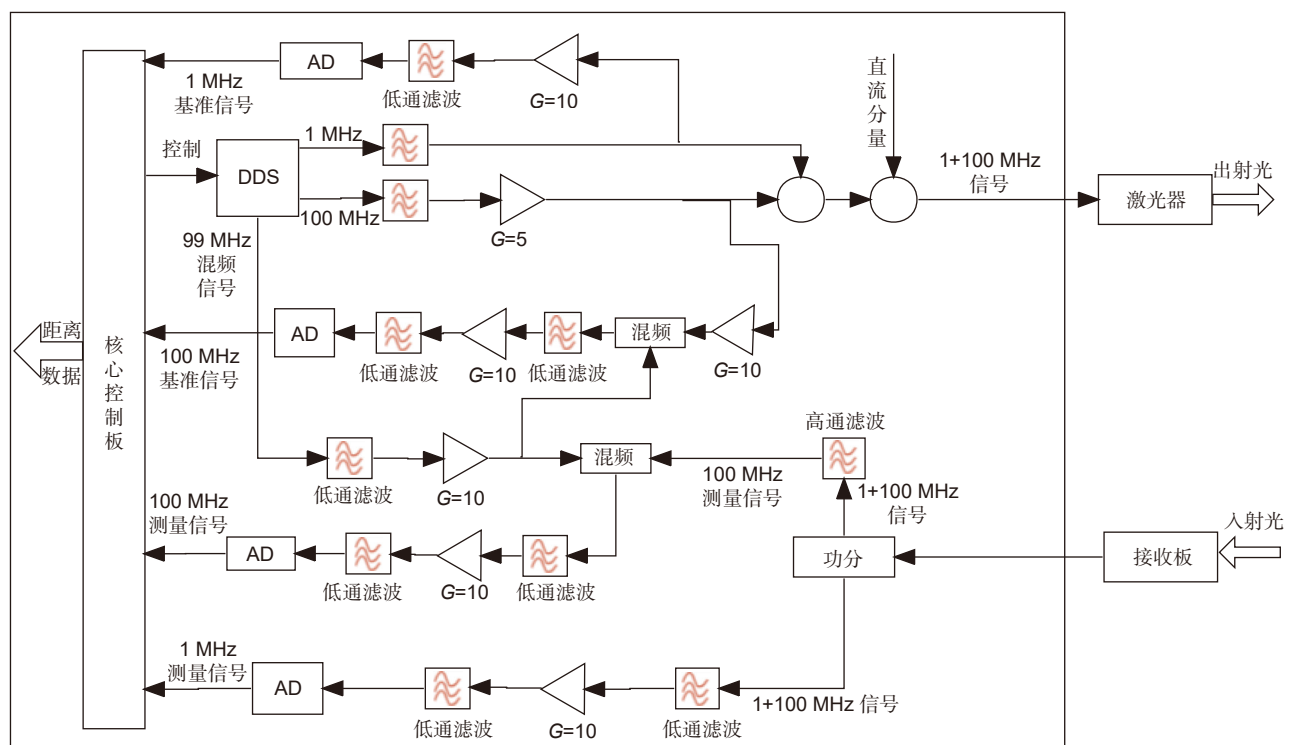


图 2 相位式激光测距系统框图

Fig. 2 Block diagram of phase laser ranging system

的光强度和较高的稳定性。该产品的优点是性价比高、精度高、可见度高。该激光器的内部构造由激光发射管 LD 和激光接收管 PD 两个部件组成。前者是用来发射激光的, 后者接收激光, 通过反馈调整激光的输出功率, 以确保激光器的正常工作, 并与 PD 共享同一电极。表 3 所示为 HSLD650-5 主要特性参数。

### 3.3 激光接收系统

相位测距系统接收部分的功能是接收测量信号发射到目标后的反射信号, 并且实现光信号到电信号的转换与处理。使用直接探测的方式将信号聚焦到 APD 雪崩光电探测器。APD 雪崩光电二极管的信号处理系统主要由 APD 及其偏压驱动电路、前置跨阻放大电路、低通滤波器以及混频电路等构成。APD 探测原理框图如图 3 所示。

本系统选用了高灵敏度的光电探测器 LSGSPD-UL0.25 和放大器 MAX3658, 以确保可以检测到微弱的光信号, 将其转换为可测量的电压信号并放大信号幅值。光电探测器可响应 500 nm~880 nm 的波长, 峰值响应波长与激光二极管峰值波长接近, 且具有高灵敏度和低噪声。通过选用高性能的光电探测器和放大器, 并进行适当的调校和校准, 可以确保系统能够稳定地捕获、处理和量化来自目标的反射光信号, 从而实现高精度的激光测距。

接收部分光学系统如图 4 所示, 光纤分束镜将正

弦调制信号分为测量信号与参考信号, 参考信号直接由光电探测器接收, 而测量信号首先通过光纤准直镜调整和准直光束, 使得光线尽可能平行的传输, 减小光束的散射, 提高光信号的传输效率。测量信号到达目标物体后反射回来的信号通过分光镜后通过光纤耦合镜进入光纤, 再由光电探测器接收。

### 3.4 数据处理

数据处理部分负责对从光电探测器获取的信号进行滤波、混频和相位差计算。我们采用了 AD8656 低通滤波电路来滤掉电路中的高频信号, 再用 LT5560 来对系统的本振信号与主振信号进行混频, 最后用 AD8302 相位鉴别器来计算距离。

采用高性能运放 AD8656 构成低通滤波电路, 可滤除高于截止频率的信号从而获得 1 MHz 的低频信号。AD8656 具有低噪声、低失真和高增益等特点, 它具有目前业界最低的噪声, 这使它非常适用于要求高精度信号处理的应用, 适用于本系统的高精度测量。AD8656 放大低幅度信号的同时保持信号的高质量, 具有良好的稳定性和低漂移特性, 适用于本系统长时间稳定运行。

高频信号采样难度大, 鉴相误差大, 本设计需对本振信号与主振信号进行混频以提高测量精度。采用的 LT5560 是一种双平衡有源混频器, 图 5 是 LT5560 混合器的电路示意图, 由该图可见, LO-和 LO+管脚

表 3 25 °C 下 HSLD650-5 的光电特性

Table 3 Photoelectric characteristics of HSLD650-5 at 25 °C

性能参数	符号	工作条件	最小值	最大值	单位
峰值波长	$\lambda_p$	$P_o=10 \text{ mW}$	-	-	nm
阈值电流	$I_{th}$	-	-	30	mA
工作电流	$I_{op}$	$P_o=10 \text{ mW}$	-	40	mA
工作电压	$V_{op}$	$P_o=10 \text{ mW}$	-	2.5	V
PD监控电流	$I_m$	$P_o=10 \text{ mW}, V_{RD}=5 \text{ V}$	0.05	0.3	mA
平行发散角	$\theta_{//}$	$P_o=10 \text{ mW}$	6	10	deg
垂直发散角	$\theta_{\perp}$	$P_o=10 \text{ mW}$	30	36	deg

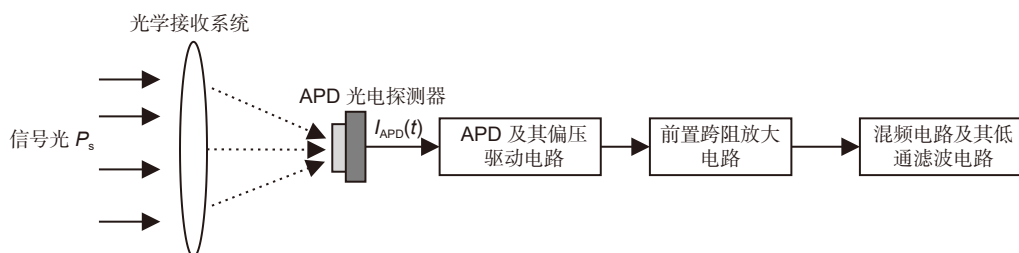


图 3 APD 探测原理框图

Fig. 3 APD detection principle block diagram

对应于本振信号; EN 是使能端; IN+ 与 IN- 管脚相应于 RF 信号的输入差频信号; OUT+ 和 OUT- 两个管脚所对应的是一个输出差分混频信号, 并且需要在输出端进行阻抗匹配。

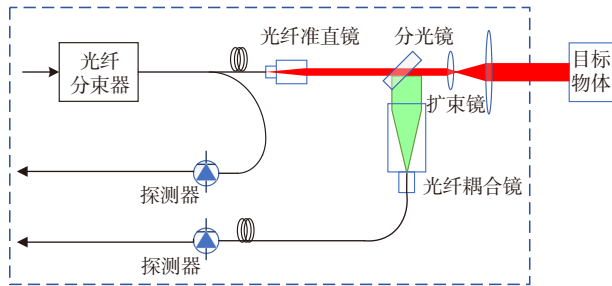


图 4 接收光学系统图

Fig. 4 Receiving optical system diagram

最后, 信号由 AD 采集模块采集到 AD8302 中进行参考信号与测量信号的相位差检测, AD8302 是一种高性能的相位鉴别器, 可以测量激光脉冲的到达时间差异, 常用于测量微弱信号的相位差, 特别适用于激光雷达系统中的距离测量。AD8302 具有两个输入通道, 通常用于输入两个信号, 以便测量它们之间的

相位差, 具有高线性特性和低失真特性。它能够在广泛的输入信号范围内提供一致的响应, 尤其是在涉及微小相位变化的测距应用中。其低失真特性保证了输入信号的信号质量不会受到明显的改变或损害, 有助于维持高信噪比并减小测量误差。

它通过将两个输入信号进行相位比较, 然后输出与相位差相关的电压信号。这个电压信号的幅度和极性随着相位差的变化而变化。在 AD8302 之后, 接入放大器与滤波器对 AD8302 的输出信号进行放大和处理, 用模数转换器将其数字化以进一步处理和采集相位差数据。最后将采集到的数据传输到微处理器中。AD8302 检测当前默认的精度是 10 mV/(°), 采用偏置方案将相位差控制在线性区域, 在一定的线性区域可以进行多级放大, 实现 1 mV 以下的分辨, 从而实现低于 0.1° 的相位检测。AD8302 方案框图如图 6 所示。

#### 4 实验与分析

为验证高精度相位式激光雷达测距系统的测量精

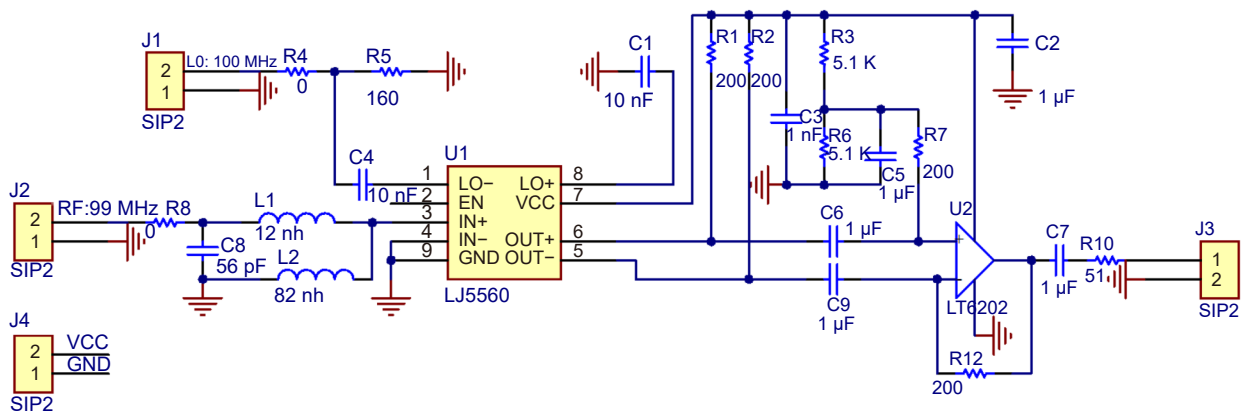


图 5 LT5560 混频器电路图

Fig. 5 LT5560 mixer circuit diagram

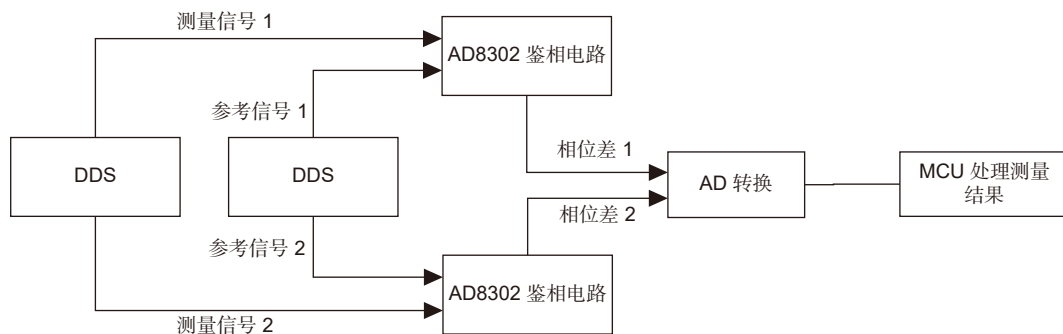


图 6 AD8302 方案框图

Fig. 6 Block diagram of AD8302 scheme

度, 在 0~100 m 范围内进行了本系统测量精度实验。实验的主要目标是评估系统的性能、测量精度以及稳定性。激光雷达系统由 HSLD650-5 型激光器、LSGSPD-UL0.25 型光电探测器、DSO-X 3032A 示波器和数据记录设备组成。所使用的示波器是安捷伦公司的 DSO-X 3032A 示波器, 带宽为 350 MHz, 最大采样频率为 4 GSa/s, 可满足要求。如图 7 所示, 在不同的距离对所测量的数据进行采集记录。

由于受实验室条件限制, 无法提供高精度的 100 m 的位移台, 因此采用多次定点测量取平均值的方法来验证此系统的性能, 将 SICK 公司的 SICK DL-22AA2101 激光测距仪的测距值作为标准值, 本系统的测距结果作为实际测距值, 与 SICK DL-22AA2101 测同一距离, 以具有高反射率值的平面作为测量对象,

使其到测距仪的距离依次增加, 本系统分别对同一距离进行 100 次测量, 来求实际测距值与标准值的误差。

在系统的电路检测中, 采用了示波器来检测本设计的系统中的关键信号。图 8 是由示波器所收集到的重要信号, 图 8(a) 是由一个由 DDS 信号发生器所生成的一个主振信号, 图 8(b) 是由 DDS 信号发生器所生成的一个本振信号。这两个信号波形相似但有一个频率上的差异。图 8(c) 是由光电接收电路获得的差频回波信号, 其频率大约是 1 mHz, 与主振和本振信号的频差近乎一致。通过以上的实验与分析, 可以看出, 各个主要部件的输出都达到了设计要求。

激光测距系统的距离测量性能以测量范围、测量精度与稳定性的指标来体现。测量精度是测量值与真

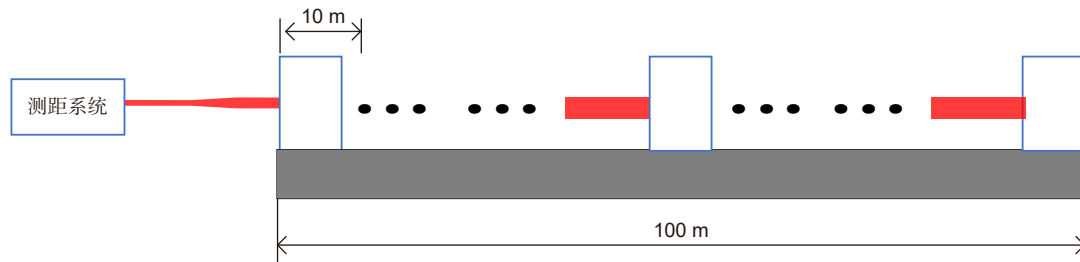


图 7 系统测距实验装置图  
Fig. 7 System-ranging experimental device diagram

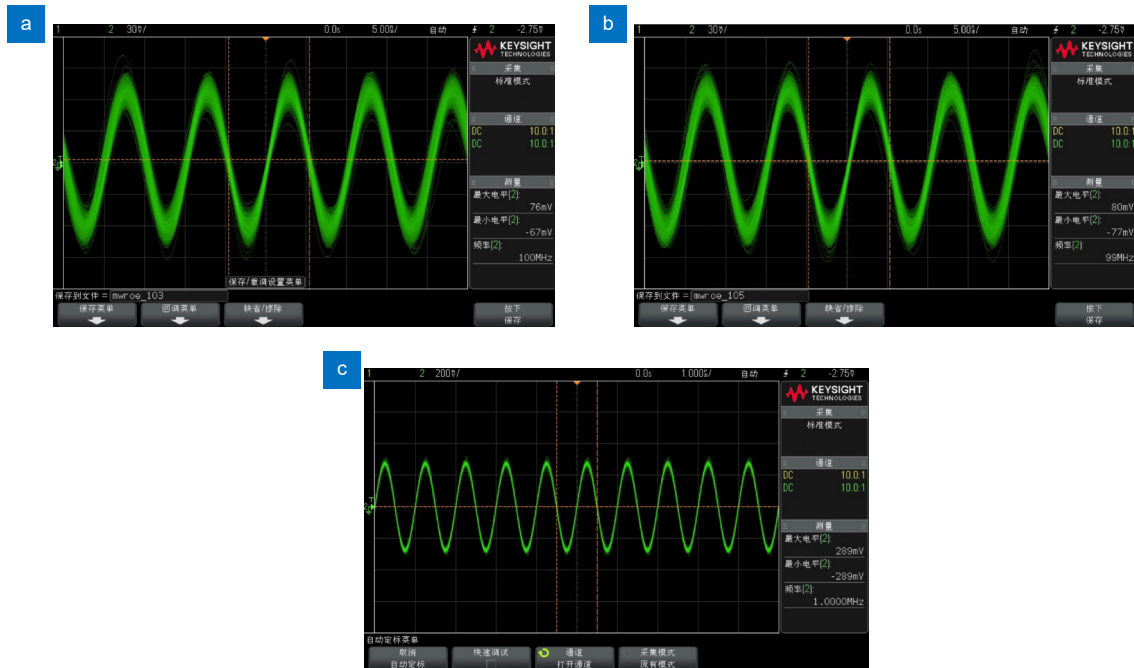


图 8 示波器中采集的系统中关键信号。(a) 主振信号; (b) 本振信号; (c) 差频回波信号  
Fig. 8 Key signals in the system collected from the oscilloscope. (a) Main oscillator signal ; (b) Local oscillator signal; (c) Differential frequency echo signal



值的接近程度。接近程度越高, 测距精度越高。本文把实验的距离分为 0 m 到 3 m, 3 m 到 100 m 两部分, 第一部分取 0.3 m 作为步长, 第二部分因距离较大取 10 m 作为步长。每个区间的距离都进行 100 次测量, 并对每组获得的数据进行保留三位小数且取平均值计算。

表 4 显示了在 0.3 m 至 3 m 范围内所测得的数据, 由多次实验测量取平均值可得, 测量误差都在 0.004 m 之内, 具有较好的精确度。

表 4 0.3 m 到 3 m 内的测量结果  
Table 4 Measurement results within 0.3 m to 3 m

标准值/m	测量均值/m	测量误差/mm	标准差/mm
0.300	0.301	1.000	0.690
0.600	0.602	2.000	0.678
0.900	0.901	1.000	0.734
1.200	1.202	2.000	0.670
1.500	1.503	3.000	0.722
1.800	1.802	2.000	0.740
2.100	2.102	2.000	0.664
2.400	2.403	3.000	0.680
2.700	2.703	3.000	0.696
3.000	3.004	4.000	0.682

表 5 显示了在 3 m 至 100 m 范围内所测得的数据, 随着测量距离标准值的增大, 测量均值与标准值的差距慢慢增大, 测量误差增大, 相比于 0 m 至 3 m 的测量误差有点差距, 但是测量误差也都保持在 0.01 m 之内, 系统测量精度较好。标准差在 0.6 mm~0.8 mm 之间, 数据的分散程度相对较小, 系统稳定性较好。实验结果表明, 该系统基本可以达到高精度的要求, 能够满足相位式激光雷达测距系统在生产生活等应用中的需求。

表 5 3 m 到 100 m 内的测量结果  
Table 5 Measurement results within 3 m to 100 m

标准值/m	测量均值/m	测量误差/mm	标准差/mm
3.000	3.004	4.000	0.682
13.000	13.004	4.000	0.693
23.000	23.005	5.000	0.684
33.000	33.006	6.000	0.658
43.000	43.009	9.000	0.747
53.000	53.007	7.000	0.772
63.000	63.009	9.000	0.733
73.000	73.009	9.000	0.668
83.000	83.010	10.000	0.692
93.000	93.008	8.000	0.616
100.000	99.990	10.000	0.720

## 5 结论

本研究以相位式激光测距原理为基础, 采用激光控制同频参比的相位差检测方法, 包括了对激光发射和接收模块的选型与光学结构优化、对接收电路的放大滤波与差分混频处理, 以及对 AD8302 鉴相模块的搭建, 设计了一种高精度相位式激光雷达测距系统。使用多个测尺联合测量的方式, 利用高频的高精度优势来提高被测距离的精度, 利用低频的宽量程优势来扩大被测距离的范围, 实现满足高精度下的远距离要求。在高频鉴相误差大的情况下, 采用混频鉴相的方法提高系统的精度, 以 AD8302 模块作为基础, 可以提高系统的测量精度又可以简化系统的硬件设计, 减少传统的复杂信号处理算法的需求, 降低系统的复杂性和成本。

对研制的高精度相位式激光测距系统分别进行了测量误差与标准差测试。实验结果表明, 该系统可以实现毫米级别的距离测量精度, 标准差在 0.6 mm~0.8 mm 之间, 可满足在生产生活等应用中的需求。综上所述, 通过对系统的性能评估发现满足设计要求, 系统能够实现毫米级别的距离测量精度, 并能保持出色的稳定性。尽管本研究取得了重要的突破, 但仍然存在许多未来研究的机会, 包括进一步提高系统的测距范围、优化数据处理方法以及降低系统的成本等问题。

## 参考文献

- [1] Killinger D K, Menyuk N. Laser remote sensing of the atmosphere[J]. *Science*, 1987, **235**(4784): 37-45.
- [2] Tsai B M, Gardner C S. Remote sensing of sea state using laser altimeters[J]. *Appl Opt*, 1982, **21**(21): 3932-3940.
- [3] Moeller C, Schmidt H C, Koch P, et al. Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system[J]. *SAE Int J Aerosp*, 2017, **10**(2): 100-108.
- [4] Jung J, Yoon S, Ju S, et al. Development of kinematic 3D laser scanning system for indoor mapping and as-built BIM using constrained SLAM[J]. *Sensors*, 2015, **15**(10): 26430-26456.
- [5] Kim J, Cho H, Kim S. Positioning and driving control of forklift-type automatic guided vehicle with laser navigation[J]. *Int J Fuzzy Logic Intell Syst*, 2013, **13**(4): 307-314.
- [6] Bergstrand E. The geodimeter system: a short discussion of its principal function and future development[J]. *J Geophys Res*, 1960, **65**(2): 404-409.
- [7] Wyant J C. Testing aspherics using two-wavelength holography[J]. *Appl Opt*, 1971, **10**(9): 2113-2118.
- [8] De Groot P, Kishner S. Synthetic wavelength stabilization for two-color laser-diode interferometry[J]. *Appl Opt*, 1991, **30**(28): 4026-4033.
- [9] Desai V D, Ferrario J L, Bentley J L, et al. Portable laser range finder and digital compass assembly: 5, 831, 718[P]. 1998-11-

- 03.
- [10] Seidel R W. From glow to flow: a history of military laser research and development[J]. *Hist Stud Phys Biol Sci*, 1987, **18**(1): 111–147.
- [11] Wang X G. Research on Key Technologies of high-speed and high-precision phase-shift laser rangefinder[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2012. 王选钢. 高速高精度相位式激光测量关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [12] Yang H X. Phase shift laser range finding based on synchronous tunable measuring wavelength[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. 杨宏兴. 基于同步可调谐测尺方法的相位式激光测距技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [13] Jia F X. Research on key technologies of phase-shift laser range finder with multi-frequency modulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. <https://doi.org/10.7666/d.D269457>. 贾方秀. 多频调制的相位法激光测距中若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. <https://doi.org/10.7666/d.D269457>.
- [14] McManamon P. *Field Guide to Lidar*[M]. Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2015. <https://doi.org/10.1117/3.2186106>.
- [15] Huang J, Dong B Q. The research of phase method of laser ranging measurement system[J]. *Adv Mater Res*, 2012, **479–481**: 632–635. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.479-481.632>.
- [16] Zhang C, Huang H. Design and experiment of phase laser ranging system based on MEMS mirror for scanning detection[J]. *Key Eng Mater*, 2015, **645–646**: 1099–1104. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.645-646.1099>.
- [17] Fu Q Y, Zhou Z M, Jin D F, et al. Triangular-wave modulation in a laser ranging system[J]. *Chin J Lasers*, 2020, **47**(3): 0304006. 傅勤毅, 周遵梅, 金鼎沸, 等. 三角波调制在激光测距中的应用研究[J]. *中国激光*, 2020, **47**(3): 0304006.
- [18] Dorsch R G, Häusler G, Herrmann J M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement[J]. *Appl Opt*, 1994, **33**(7): 1306–1314.
- [19] Liu Y. The application and optimization of phase method in laser distance measurement[J]. *J Phys Conf Ser*, 2021, **1881**: 022002.
- [20] Kikuta H, Iwata K, Nagata R. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(17): 2976–2980.
- [21] Lee W L, Wu K C, Jiang J Y, et al. A laser ranging radar transceiver with modulated evaluation clock in 65 nm CMOS technology[C]//2011 Symposium on VLSI Circuits-Digest of Technical Papers, 2011: 286–287.
- [22] 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.
- [23] Poujouly S, Journet B, Placko D. Digital laser range finder: phase-shift estimation by undersampling technique[C]//25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1999, **3**: 1312–1317. <https://doi.org/10.1109/IECON.1999.819401>.
- [24] Sun X B, Tan J J, Xu J, et al. Research on key technology for phase-shift laser range finder[C]//2013 IEEE 11th International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 2013: 235–237. <https://doi.org/10.1109/DASC.2013.68>.
- [25] You T, Li P J, Tong G J, et al. Development of acoustic emission high-speed data acquisition system[J]. *Adv Mater Res*, 2012, **433–440**: 5666–5671.
- [26] Hu P C, Yu L, Mei J T, et al. Increasing the operating distance of a phase-shift laser range-finding system by using an active reflector[J]. *Opt Commun*, 2015, **356**: 7–11.
- [27] Jia F X, Ding Z L, Yuan F. Design of intelligent receiver system for phase-shift laser range finder[J]. *Proc SPIE*, 2009, **7133**: 71332U.
- [28] Journet B A, Poujouly S. High-resolution laser rangefinder based on a phase-shift measurement method[J]. *Proc SPIE*, 1998, **3520**: 123–132.

## 作者简介



李岸然(1973-), 女, 山东省科学院激光研究所工程师, 研究方向为工业智能传感技术开发与成果转化, 参与国家级项目 1 项、省部级项目 2 项。在该领域的研究成果获山东省级科技进步奖二等奖, 并参与制定相关国家标准 1 项。

E-mail: keli@sdkeli.com



【通信作者】蔡恩林(1978-), 男, 博士, 青岛大学二层次特聘教授, JMRH 专家。长期从事军工领域与医工结合领域相关项目, 目前主要研究方向有半导体器件、微纳器件、微型传感器的设计与开发; 脑机接口微型电极、医用微型传感器设计与开发及样品制作。

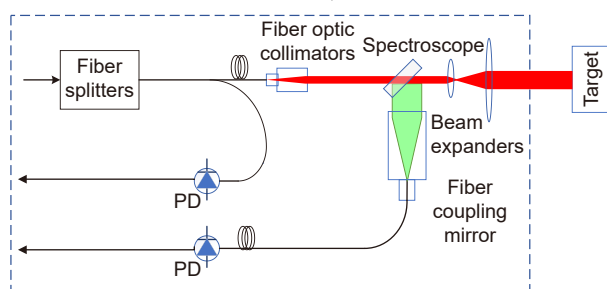
E-mail: caienlin@qdu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Design of high precision phase laser radar ranging system

Li Anran<sup>1</sup>, Shao Guangcun<sup>2</sup>, Jin Fengyu<sup>3</sup>, Zhang Chuanhui<sup>2</sup>, Li Wei<sup>2</sup>,  
Mou Yuanhui<sup>4</sup>, Cai Enlin<sup>4\*</sup>



Receiving optical system diagram

**Overview:** With the advent of the intelligent era, laser ranging is widely used in remote sensing, and the development and research of radar technology has been attached to great importance in the world. Phase ranging is one of the most favourite ranging ways at present, and the phase LiDAR ranging technology has a wide application prospect in modern science and technology, especially in the fields of automatic driving, robot navigation, three-dimensional mapping and so on. Compared with traditional ranging methods, phase LiDAR ranging technology can achieve higher accuracy and resolution. However, despite significant progress in phase LiDAR ranging technology, there are still some not solved troubles. For example, the measurement accuracy and performance stability problems in complex environments, and the cost of high-precision phase ranging systems is usually higher, which restricts its widespread application in certain fields. The objective of this study is to design and develop a high-precision phase LiDAR ranging system. To improve the measurement accuracy and stability of phase ranging and reduce the cost of the laser ranging system. Firstly, Based on the principle of phase laser ranging, the transmitting and receiving parts of the optical system are designed and selected to ensure the stable transmission and reception of the laser. Then the receiver circuit of the hardware system is processed with signal amplification, filtering and mixing structure. In the case of large high-frequency phase discrimination errors, the method of mixed-frequency phase identification is used to improve the accuracy of the system. Finally, The AD8302 module is used as a foundation to improve the measurement accuracy of the system, simplify the hardware design of the system, and reduce the need for traditional complex signal processing algorithms. At the same instant, the technology of multi-ruler joint measurement is adopted. The high precision advantage of high frequency is used to improve the accuracy of the measured distance, and the wide range advantage of low frequency is used to expand the range of the measured distance to meet the long-distance requirements of high precision. Through the performance evaluation of the system, the system meets the design requirements. The experimental result manifests that the measurement system not only has high measurement accuracy and strong stability, but also reduces the complexity and cost of the system and meets the practical application requirements.

Li A A R, Shao G C, Jin F Y, et al. Design of high precision phase laser radar ranging system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(3): 230246; DOI: 10.12086/oe.2024.230246

<sup>1</sup>Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Shandong Academy of Sciences Laser Research Institute, Jining, Shandong 272000, China; <sup>2</sup>Jining Keli Optoelectronics Industry Co., Ltd., Jining, Shandong 272000, China; <sup>3</sup>Tianjin Tianforging Press Co., Ltd., Tianjin 30000, China; <sup>4</sup>School of Electronic Information, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China

\* E-mail: caienlin@qdu.edu.cn