

引用本文:何卓尔,周鹏威,简天浩. 基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法[J]. 光通信技术,2023,47(5):67-70.

基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法

何卓尔,周鹏威*,简天浩

(中国计量大学 光学与电子科技学院,杭州 310018)

摘要:针对传统基于导频信号的外调制测距方法精度不高的问题,提出了一种基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法。首先,分析了传统测距方法测距精度不高的原因;然后,设计了基于开关电路的偏压控制模块,以此改变传统测距方法在射频端同时输入粗尺信号和精尺信号的方式,在马赫-曾德尔调制器(MZM)的偏置电压输入端、射频端分别输入粗尺信号、精尺信号,同时实现偏压控制和激光测距。实验结果表明:在距离 80 cm 处进行 500 次测量时,测距系统相位差的重复性为 $\pm 0.150\ 4^\circ$,对应的测距精度为 $\pm 0.026\ 1\ \text{cm}$ 。

关键词:激光测距;偏压控制;马赫-曾德尔调制器

中图分类号:TN29 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)05-0067-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Phase laser ranging method based on switching circuit bias control module

HE Zhuoer, ZHOU Pengwei*, JIAN Tianhao

(School of Optics and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of traditional external modulation ranging method based on pilot signal, a phase laser ranging method based on switching circuit bias control module is proposed. Firstly, the reasons for the low accuracy of the traditional ranging method are analyzed. Then, a bias control module based on switching circuit is designed, which changes the traditional way of inputting coarse scale signal and fine scale signal at the radio frequency end at the same time, and inputting coarse scale signal and fine scale signal at the radio frequency end of Mach-Zehnder modulator (MZM) to realize bias control and laser distance measurement simultaneously. The experimental results show that the repeatability of phase difference is $\pm 0.150\ 4^\circ$ and the accuracy is $\pm 0.026\ 1\ \text{cm}$ when 500 measurements are made at a distance of 80 cm.

Key words: laser ranging, bias control, Mach-Zehnder modulator

0 引言

相位式激光测距技术具有射程远、精度高的特点,在中远距离激光遥感领域应用广泛^[1-3]。然而,由于光电探测器和模/数转换器中存在噪声,导致相位式激光测距的相位分辨率难以进一步提高^[4-5]。此时,提高调制频率是一种有效提高测距精度的方法^[6]。目前,用于激光测距的光调制主要采用内调制方式,即

收稿日期:2023-01-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(62075202)资助;浙江省自然科学基金项目(LY20F050008)资助;浙江省属高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介:何卓尔(1998—),男,汉族,湖北咸宁人,硕士研究生,现就读于中国计量大学光学与电子科技学院电子信息专业,主要从事光纤通信、激光测距方面的研究工作。

* **通信作者:**周鹏威(1984—),男,博士,副教授,主要从事光电探测、光纤通信方面的研究。



通过注入或驱动电流直接控制激光器的光输出,调制频率一般小于 150 MHz,而基于电光调制器的外调制法可以将调制频率提高到吉赫兹级别^[7]。马赫-曾德尔调制器(MZM)是一种广泛使用的电光调制器,其缺点是工作点会随着环境的扰动而漂移,调制性能较差^[8],所以需要调制器进行偏压控制,稳定调制器的工作点。常见的偏压控制方法有平均光功率法和导频法^[9-10]。平均光功率法受到衰减变化的影响,存在稳定精度低的问题。相比较而言,导频法更为适用,详见文献[11]。但由于导频信号是千赫兹级别的低频信号,而测距信号为兆赫兹级别信号。当调制器的工作点稳定后,导频信号作为杂散信号被引入测距系统,导致测距性能变差。因此,有必要引入一种不影响测距精度的新偏压控制方法来锁定调制器的工作点。本文提出一种基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法。

1 传统测距方法误差分析

传统的基于导频法激光测距系统原理框图^[12-13]如图1所示。激光器产生1 550 nm 波长的光输出到 MZM 的光输入口。在偏压控制模块中,直接数字式频率合成器(DDS)同时产生正弦波导频信号 f_c 、精尺信号 f_k ,前者频率为 1 kHz、振幅为 200 mV,经加法器与偏置电压 V_{Bias} 相加,输出到 MZM 的偏压端口;后者频率为 120 MHz、幅度为 2 V,被连接到 MZM 的射频端口。经 MZM 输出的导频信号 f_c 被光电二极管(PD)捕获,通过带通滤波器、比例-积分-微分(PID)模块来实现调制器的工作点锁定;MZM 输出的带有 2 种频率信号(f_c+f_k)的调制光经过准直后,经分光片照射到激光收发模块。分光片按 50:50 的比例分光,其中 50% 的光用作参考光,另 50% 的光用作发射和接收的回波光。参考光和回波光通过两个跨阻放大器(TIA)转换成电信号,经模/数转换器转换和快速傅里叶变换(FFT)解算后,最终得到距离值。

仿真结果^[12-13]表明:在不考虑系统噪声和谐波影响的情况下,MZM 输出的精尺与射频端口输入的精尺信号之间无相位误差。在射频端口输入一个 240 MHz、幅度可调的正弦信号来模拟系统中存在的精尺信号二次谐波。当二次谐波的幅度大小处于精尺信号幅度的 1/100~1 000 范围内时,加入导频信号会对输出精尺信号的相位产生影响,尤其当二次谐波的幅度大小为精尺信号幅度的 1/100 时,相位误差达到 0.534° 。在实际实验条件下,加入导频信号后,当二次谐波的幅度衰减到 -20 dB 时,相位误差达到 1.21° 。在带有导频的相位激光测距系统中,导频将通过影响精尺的相位来影响最终的测距精度。因此,传统的测距方法的测距精度并不高。

2 基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法

2.1 偏压控制模块设计

传统的导频信号可能会对激光测距系统的相位检测产生干扰,其原因在于导频信号中混入了精尺信号与粗尺信号。因此,如果直接将导频信号作为粗尺信号,不仅可以降低系统信号的复杂程度,也不会影

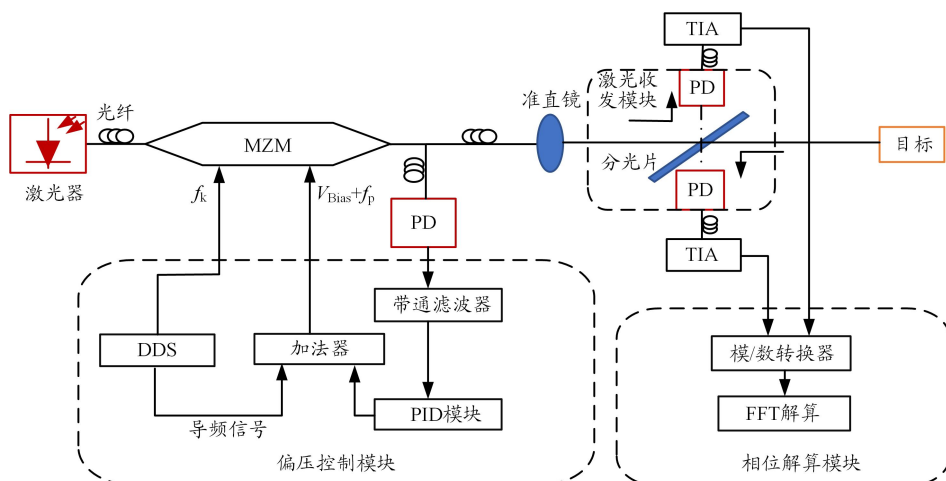


图1 传统的基于导频法激光测距系统原理框图

响激光测距的精度。本文设计了一种基于开关电路的偏压控制模块来消除导频信号对测距的影响。该模块在不使用带通滤波器的情况下,通过将调制后的粗尺信号和开关信号进行相关运算,输出信号被用作闭环偏压控制的误差信号以稳定中间工作点(Quad+)。偏压控制模块原理框图如图2所示,它由TIA、运算放大器、开关电路、PID模块、DDS和加法器组成。TIA将输入信号转换为包含粗尺信号的电压信号,然后将该电压信号通过运算放大器进行放大,并输出到开关电路;DDS产生的开关信号与放大后的电压信号相乘,作为误差信号输入PID模块;误差信号经PID模块处理后,在加法器中与粗尺信号叠加,叠加后的信号输出到偏压端口,以实现偏压模块的闭环控制。

粗尺信号的表达式为

$$f(t) = A \sin(2\pi f_k t + \phi) \quad (1)$$

其中, A 、 f_k 、 ϕ 、 t 分别为粗尺信号的振幅、频率、相位、发射时刻。

开关电路由一个模拟开关(MaxinMAX4696E-KA-T)和一个运算放大器(ADI AD822BR)设计而成,

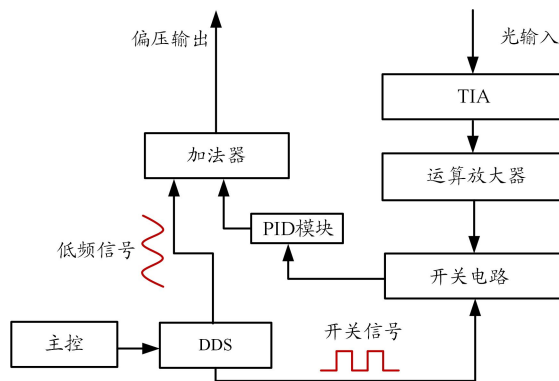


图2 偏压控制模块原理框图

其原理图如图3所示。模拟开关的2个输入(NO和NC)是粗尺信号及其反相信号,其中 $R_1=R_2$,反相信号是通过AD822BR对粗尺信号进行反相单倍放大产生的,开关信号的高低电平决定了模块的输出是粗尺信号还是其反相信号。

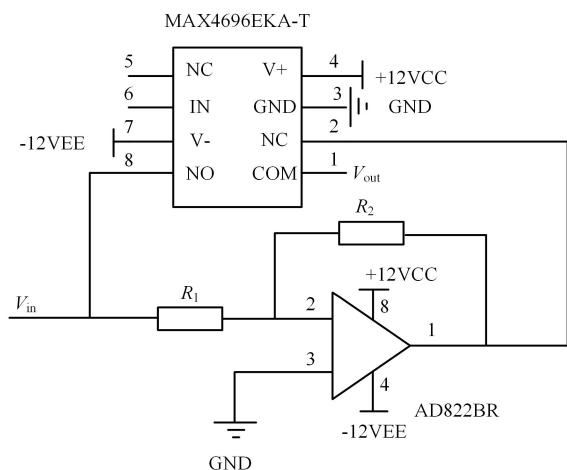


图3 开关电路图

开关信号是一种频率为 $2f_i$ 的方波,其表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \frac{1}{8f_i} < t < \frac{3}{8f_i} \\ -1, & 0 < t < \frac{1}{8f_i}, \frac{3}{8f_i} < t < \frac{1}{2f_i} \end{cases} \quad (2)$$

为了稳定闭环工作点,开关信号需满足

$$\int f(t) \times g(t) dt = 0 \quad (3)$$

根据式(1)~式(3)可知,当 φ 为 60° ,输入正弦波信号的幅度、频率分别为2 V、1 MHz时,开关信号是高电平为2.5 V、低电平为0 V的2 MHz方波信号,得出Quad+的相位关系如图4所示。

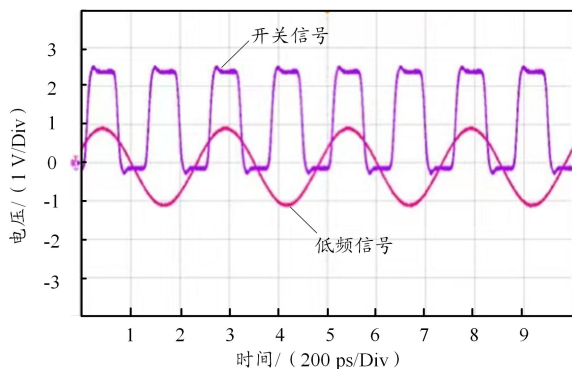


图4 在Quad+点开关信号和输入信号之间的相位关系

根据图4所示的相位关系,本文使用光功率计测量调制器输出光功率的稳定性。在30 min内,测得

Quad+点光功率为最高光功率的一半(-3 dB),功率最大漂移量为0.07 dB。工作点被长期锁定,满足了偏压控制的要求。

2.2 基于开关电路偏压控制模块的激光测距系统设计

本文设计了一种基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距系统。传统方案是在射频端同时输入粗尺信号和精尺信号,而本文提出的系统则是将粗尺信号和精尺信号分别输入到MZM的偏置电压输入端和射频端。系统实物如图5所示。DDS生成幅度为2 V、频率为240 MHz的精尺信号并将其发送至射频端口。偏压控制模块则产生幅度为2 V、频率为1 MHz的粗尺信号。

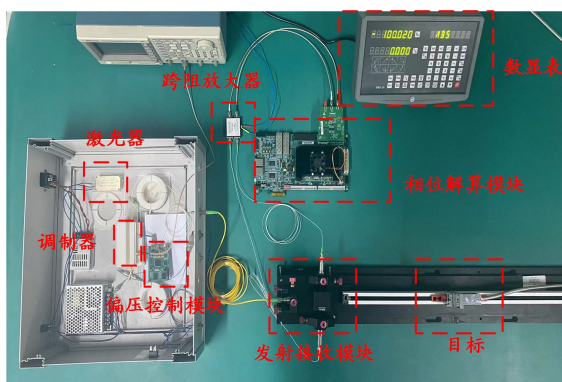


图5 基于开关电路偏压控制模块的激光测距系统实物图

本文通过对比使用精度为 $5 \mu\text{m}$ 、量程为1 m的光栅尺测量值与激光测距相位解算模块的计算值,来分析测距精度。在距离20、40、60、80 cm处,通过前后移动0.1 cm来分别计算目标,并利用解相得到的相位差来计算实际距离。计算距离与测量值的对比情况如表1所示,激光测距系统的测距精度在 $\pm 0.02 \text{ cm}$ 以内。

本文在距离80 cm处重复进行了500次上述测量,

表1 计算距离与测量值的对比情况

计算距离/m	相位差/(°)	测量值/m	偏移/m
0.199 000 0	114.743 232 0	0.199 207 0	0.000 207 0
0.200 000 0	115.113 888 0	0.199 850 5	-0.000 149 5
0.201 000 0	115.871 731 2	0.201 166 2	0.000 166 2
0.399 000 0	229.737 715 2	0.398 850 2	-0.000 149 8
0.400 000 0	230.462 150 4	0.400 107 9	0.000 107 9
0.401 000 0	231.061 075 2	0.401 147 7	0.000 147 7
0.599 000 0	345.122 668 8	0.599 171 3	0.000 171 3
0.600 000 0	345.525 926 4	0.599 871 4	-0.000 128 6
0.601 000 0	346.242 124 8	0.601 114 8	0.000 114 8
0.799 000 0	100.120 492 8	0.798 820 3	-0.000 179 7
0.800 000 0	100.869 292 8	0.800 120 3	0.000 120 3
0.801 000 0	101.438 035 2	0.801 107 7	0.000 107 7

何卓尔,周鹏威,简天浩: 基于开关电路偏压控制模块的相位激光测距方法

以评估相位差的可重复性。实验结果如图 6 所示。可以看出,500 次实验测得的相位差在 $100.6501^{\circ} \sim 100.9504^{\circ}$ 之间。考虑到距离为 80 cm 时的理论相位差为 100.8° (基于 0 cm 定义的相对相位),相位差为 $\pm 0.1504^{\circ}$,对应的实际距离测距精度在 ± 0.0261 cm 以内。这表明本文提出的将导频信号作为粗尺信号的方法具有较高的精度和可行性。

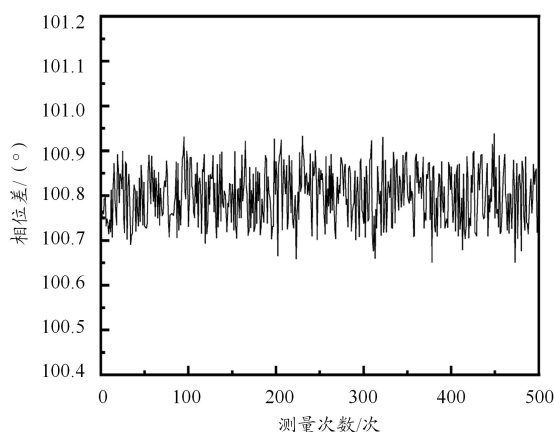


图 6 500 次重复性实验结果

3 结束语

在传统基于导频法的激光测距系统中,系统中的二次谐波会对测距产生干扰,从而无法充分发挥外调制相位激光测距的高精度优势。因此,本文提出了一种将偏压控制的导频信号作为粗尺的外调制激光测距系统,通过设计一个基于开关控制方法的偏压控制模块,实现了调制器长时间锁定在 Quad+ 点。在 30 min 内,输出光功率的最大漂移为 0.07 dB,满足了偏压控制的要求。在实现了光功率的稳定控制后,本文构建了一个全新的相位激光测距系统,以评估其测距精度。实验测试结果表明:在对单个目标进行 500 次测量后,系统相位误差达到 $\pm 0.1504^{\circ}$,对应的测距精度达到 ± 0.0261 cm。与目前相位式激光测距系统普遍的毫米级测距精度相比,这种方法实现了亚毫米级的测距精度。同时,该方法不需要通过射频端口输入粗尺信号,从而降低了系统的复杂性和设计成本。此外,若选择更高频率的调制信号(如 1 GHz),配合更高采样率的采集模块,则可以实现更高精度的提升。根据以上实验分析,所提出的方法在相位式激光测距领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] LI X, WU W, GUO J, et al. The method and development trend of laser ranging [C]//2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Aug. 26–27, 2013, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2013, 2: 7–10.
- [2] PETRIE G, TOTH C K. Introduction to laser ranging, profiling, and scanning[M]. New York: CRC Press, 2018.
- [3] DONG P, CHEN Q. Lidar remote sensing and applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [4] ZHANG X, LI H, ZHANG S. Design and analysis of laser photoelectric detection sensor [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63 (12): 3092–3099.
- [5] QIN J, CUI S, DAI J. Noise analysis and compensation strategy of photoelectric detection circuit [C]//2020 4th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE 2020), June 19, 2020, Beijing, China. Beijing: AEIC, 2020: 285–290.
- [6] LIU Y, ZHU G, ZHAO B. Phase-shift range finder based on Mach-Zehnder modulator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (21): 99–104.
- [7] BANERJEE C R, DAS B A, BHANJA S, et al. Low phase noise frequency tripled microwave signal generation using external optical modulation [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58 (5): 1082–1085.
- [8] FU Y, ZHANG X, HRAIMEL B, et al. Mach-Zehnder: a review of bias control techniques for Mach-Zehnder modulators in photonic analog links [J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, 14(7): 102–107.
- [9] QU J, YIN F, DAI Y, et al. Dither-free bias control technique at the null point of the MZM based on power monitoring [C]//Twelfth International Conference on Information Optics and Photonics, July 23–26, 2021, Xi'an, China. Washington: SPIE, 2021: 575–578.
- [10] YOSHIDA T, SUGIHARA T, SAWADA K, et al. Automatic bias control for arbitrary optical signal generation by dual-parallel MZM[C]//OECC 2010 Technical Digest, July 5–9, 2010, Sapporo, Japan. New York: IEEE, 2010: 460–461.
- [11] ACKERMAN E I, COX C H. Effect of pilot tone-based modulator bias control on external modulation link performance [C]//International Topical Meeting on Microwave Photonics MWP 2000 (Cat. No. 00EX430), September 11–13, 2000, Oxford, UK. New York: IEEE, 2000: 121–124.
- [12] JIA F, DING Z L, YUAN F. Design of intelligent receiver system for phase-shift laser range finder [C]//Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology, September 15–18, 2008, Shenyang, China. Washington: SPIE, 2009, 7133: 721–728.
- [13] NEJAD S M, FASIHI K, OLYAEE S. Modified phase-shift measurement technique to improve laser-range finder performance [J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(2): 316–321.