

基于薄膜铌酸锂调制器的相位式激光测距关键技术研究

胡宇斌,周鹏威*,张圣龙,吕扬帆

(中国计量大学 光学与电子科技学院,杭州 310018)

摘要:针对基于薄膜铌酸锂调制器的相位式激光测距系统精度缺少长期稳定性的问题,提出一种基于开方电路的偏压控制方案。首先,分析该调制器传输函数曲线漂移对测距系统精度造成干扰的原因;然后,根据该调制器的工作原理,设计基于开方电路的偏压控制模块,用于稳定该调制器的Quad点。同时,搭建用于验证偏压控制模块功能的测距系统,进行精度的稳定性测试。实验结果表明:在测距系统中未采用该偏压控制模块时,10 h后系统测量误差增加了3.11 mm,而采用该偏压控制模块后,系统测距精度较为稳定。

关键词:薄膜铌酸锂调制器;偏压控制;激光测距

中图分类号:TN249 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0059-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.010

Research on key technology of phase laser ranging based on thin film lithium niobate modulator

HU Yubin, ZHOU Pengwei*, ZHANG Shenglong, LYU Yangfan

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

Abstract: To address the issue of the lack of long-term stability in the accuracy of the phase-based laser ranging system using thin film lithium niobate modulator, a bias control scheme based on a square root circuit is proposed. First, the reasons for the interference caused by the drift of the modulator's transfer function curve on the ranging system's accuracy are analyzed. Then, based on the working principle of the modulator, a bias control module based on the square root circuit is designed to stabilize the modulator's Quad point. A ranging system is built to verify the functionality of the bias control module, and stability tests on the accuracy are conducted. The experimental results show that, when the bias control module is not used in the ranging system, the measurement error increases by 3.11 mm after 10 hours, while when the bias control module is applied, the system's ranging accuracy remains relatively stable.

Key words: thin film lithium niobate modulator, bias control, laser ranging

0 引言

相位式激光测距技术在中远程距离具有精度高的优势^[1],广泛应用于3D成像、零件检测等领域^[2-3]。其中,采用外调制的测距方式能有效提高调制信号的频率,进而提升测距的精度。基于薄膜铌酸锂的马

赫-曾德尔调制器是一种应用十分广泛的器件,它具有小体积、高带宽以及低功耗等优势^[4],可以作为激光测距系统中的外调制器件,但该调制器长时间工作后存在工作点漂移的问题^[5-6],导致调制器输出的光功率发生变化,该变化会在光电探测器和相位计算时引入较大的相位误差^[7-8],降低激光测距系统的精度^[9],因此需要对该调制器的偏置电压进行控制,确保工作点的稳定。目前,科研学者已提出多种方法来控制调制器的偏置电压。其中一种方法是:实时监测调制器的输出光功率,并根据监测结果自动调节其直流偏置电压,以使输出光功率保持稳定^[10]。但该方法受调制器输入光功率波动和光路损耗的影响,导致工作点稳定性较差。另一种方法是在调制器的直流偏置端加入导频信号,通过监测调制器输出导频信号的谐波分量

收稿日期:2025-02-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(62075202)资助。

作者简介:胡宇斌(2000—),男,浙江绍兴人,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,主要研究方向为光电调制、激光测距。参与了基于马赫-曾德尔调制器的偏压控制技术、基于电光外调制的载波抑制单边带光信号产生技术研究等项目。

*通信作者:周鹏威(1984—),男,博士,教授,主要研究方向为光电成像、光电调制。



大小来调整偏置电压^[11-13]。例如,Wang L L等人^[14]提出一种采用基波与二次谐波之比作为反馈的任意点控制方法,该方法能够消除输入光功率波动和损耗带来的影响,因此相较于第一种方法而言稳定性更好。但是,传统基于导频的方法都是在偏置端加入正弦信号,适用于偏置端电光移相的调制器。对于热光移相的调制器,加入正弦信号会输出非正弦的调制光信号,难以通过谐波分量关系来分析工作点的漂移情况,从而使控制难度进一步提升^[15]。为此,本文提出一种基于开方电路的偏压控制系统,旨在稳定该调制器的工作点。

1 薄膜铌酸锂调制器工作原理及对测距精度的影响分析

薄膜铌酸锂调制器的内部结构如图1所示。该器件偏置端采用热光移相的方式,其工作原理是:激光器作为光源输出光信号,之后在第一个Y波导处被分为幅度相同的2束光,分别在上下2条支路上进行传输。这2条光波导构成马赫-曾德尔干涉仪结构,其中高速的射频(RF)信号通过电光效应对光波进行相位调制,而直流偏置端的加热电阻则利用热光效应进行精细的相位补偿与工作点控制。光波导由铌酸锂薄膜衬底所组成,直流偏置端的加热电阻对光波导进行加热,利用热光效应改变铌酸锂的折射率进行移相。最终,2束光在第二个Y波导处汇合产生干涉,折射率的变化引起光程差的改变,使得干涉光强发生改变。薄膜铌酸锂调制器输出的光功率 P_{out} 为

$$P_{out} = \frac{kP_{in}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V_{in}^2(t) + \theta_0 \right) \right] \quad (1)$$

式中: P_{in} 表示薄膜铌酸锂调制器输入的光功率, k 表示损耗因子, V_{π} 表示半波电压, $V_{in}(t)$ 表示薄膜铌酸锂调制器偏置端输入的电压, θ_0 表示薄膜铌酸锂调制器固有的相位差。

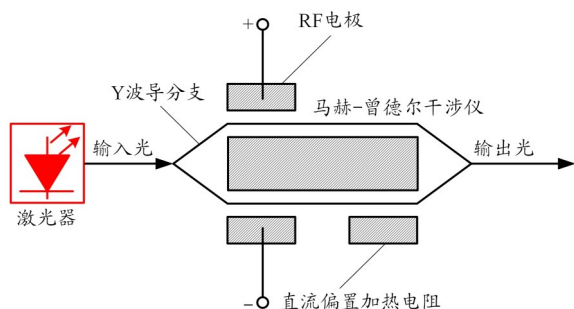


图1 薄膜铌酸锂调制器内部结构

薄膜铌酸锂调制器的传输函数如图2所示(红色曲线)。由图可知,Quad点(线性区中点)是最优工作点,此时调制输出的信号强度与调制深度最大,且信号频率不发生倍频。在Peak或Null点调制时,由于传输函数的强非线性,输出测尺信号的基频将变为驱动频率的2倍。在相位式激光测距系统中,该输出信号作为测尺信号,其幅值与频率的稳定性至关重要,因此必须将工作点精确稳定在Quad点。

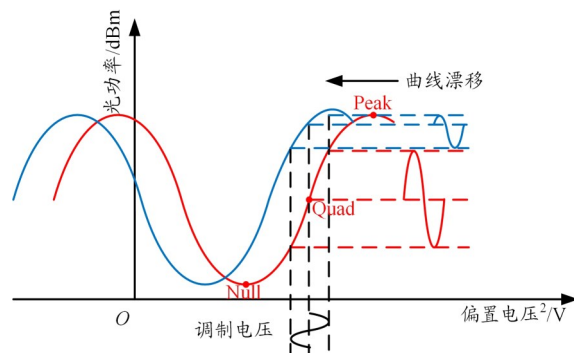


图2 薄膜铌酸锂调制器传输函数曲线及其漂移情况

然而,受温度、湿度等环境因素及器件老化的影响,使得式(1)中的损耗因子 k 、半波电压 V_{π} 以及固有相位差 θ_0 等关键参数随之发生变化,导致调制器传输函数曲线会产生漂移,如图2中蓝色曲线所示(向左漂移)。这种漂移使实际工作点偏离Quad点,导致输出信号的幅值减小,信噪比降低,使后续鉴相过程更易受噪声干扰,影响测距精度。若工作点漂移至Peak或Null点,输出信号频率将加倍。在固定距离下,鉴相单元测得的相位差将变为原来的2倍。若仍用原频率 f 解算距离,则会产生大小为 $c\Delta\varphi/4\pi f$ 的固定误差。其中, $\Delta\varphi$ 为初始相位差, c 为光速。

2 总体方案设计

基于上述分析,为稳定薄膜铌酸锂调制器在相位式激光测距系统中的工作点(Quad点),避免因工作点漂移导致输出信号幅度衰减、频率倍频或失真,进而影响系统测距精度的问题,本文设计一种基于开方电路的偏压控制模块。该模块旨在实时锁定并动态补偿调制器的工作点,确保其输出信号的幅度与频率长期稳定,从而提升激光测距系统的可靠性和测量精度。

2.1 偏压控制模块设计

为了找到稳定薄膜铌酸锂调制器Quad点的方法,需要对其传输函数进行分析。根据式(1)可知,薄膜

铌酸锂调制器的输出光功率与偏置电压的平方项成余弦函数关系,导致传统正弦电压加载在偏置电压端时会输出非正弦的光调制信号,难以分析其谐波分量。该偏压控制模块通过开方电路将送入调制器偏置端的电压作开方运算,即此时的输入电压为 $\sqrt{V_{in}(t)}$,这时薄膜铌酸锂调制器输出的光功率就正比于 $(\sqrt{V_{in}(t)})^2$,即正比于 $V_{in}(t)$,从而可以在不改变原来适用于传统铌酸锂电光调制器导频方案的基础上^[16],实现对薄膜铌酸锂调制器Quad点的稳定。

偏压控制模块的整体流程框图如图3所示。该模块主要由跨组放大电路、滤波电路、主控单元、加法电路以及开方电路组成。系统首先对直流偏置电压与导频信号进行开方运算,实现电压到光强的非线性转换,并将其输入调制器的偏置端。调制器输出光的一部分(约1%)经光电探测器转换为电信号,由跨阻放大电路放大。放大后的信号经过滤波电路,提取出导频信号的二次谐波分量并送入主控单元。主控单元根据二次谐波分量的大小生成误差补偿电压,该电压与原始直流偏置电压及导频信号在加法电路中叠加。叠加后的信号再次经过开方处理,以保持电压与光强之间的非线性关系,并继续送入调制器的偏置端,形成闭环控制。

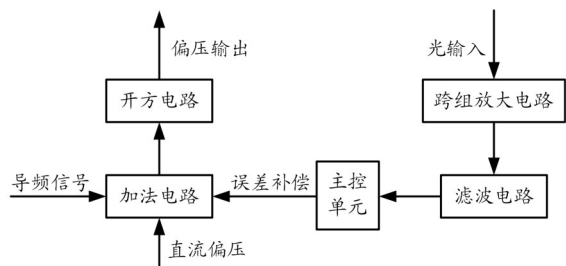


图3 偏压控制模块流程图

开方电路采用专用集成电路芯片AD734实现,通过将其引脚配置为平方根计算模式完成非线性转换,具体原理如图4所示。该芯片关键输入端(Z_1 、 Z_2)的电

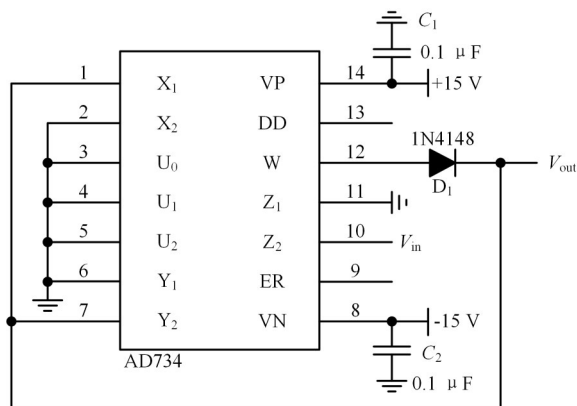


图4 开方电路原理图

压小于10 V,而本系统所用的薄膜铌酸锂调制器半波电压约为3.3 V。因此,用于稳定Quad点的偏置电压完全满足AD734的输入范围要求,电路设计合理。

此时,开方电路输入与输出关系可由式(2)表示,通过调节芯片10脚的输入电压 V_{in} ,可在输出端得到输入电压开方运算后的结果 V_{out} 为

$$V_{out} = \sqrt{10(V_{Z_2} - V_{Z_1})} = \sqrt{10V_{in}} \quad (2)$$

式中: V_{Z_1} 、 V_{Z_2} 分别为端口 Z_1 、 Z_2 的输入电压

2.2 系统设计

为验证所设计的偏压控制模块对薄膜铌酸锂调制器工作点的稳定效果,及其对确保激光测距系统长期精度稳定性的作用,本文设计的相位式激光测距系统整体架构如图5所示,主要分为发射、光路与接收3个部分。在发射部分:薄膜铌酸锂调制器输出的光信号在经过分光探测器(TAP PD)后,99%的部分作为光源输出给后级,1%的部分接入到所设计的偏压控制模块中,该模块通过对采集信号谐波分量的分析来判断工作点的位置,同时向调制器的偏置端输出补偿电压来稳定工作点。在确保调制器稳定Quad点的基础上,由信号发生电路产生测尺信号,经功率放大后加载至调制器的射频端口,最终将1 550 nm连续光调制成携带测尺信息的光信号输出。在光路部分,调制

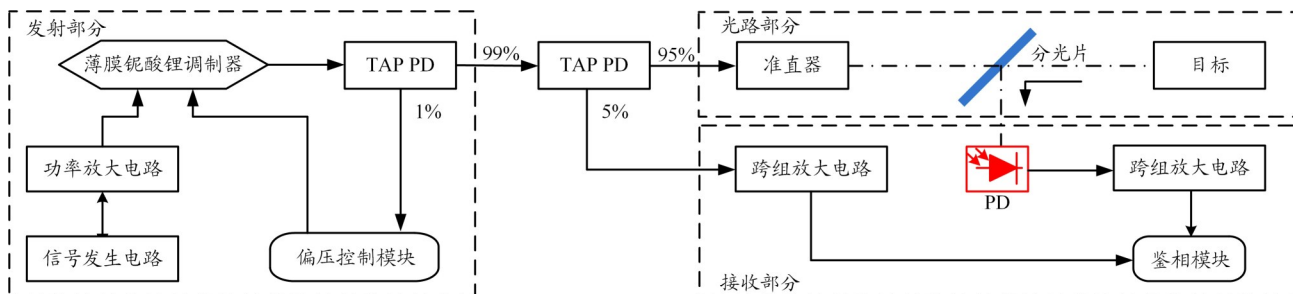


图5 基于薄膜铌酸锂调制器的相位式激光测距系统框图

后的光信号由TAP PD进行分光,其中5%作为参考路光信号,95%的光信号先经过准直器准直,再经过分光片,在到达目标返回后将作为回波光路信号;接收部分,负责信号转换与解算。参考光与回波光分别由光电探测器接收,经跨阻放大电路转换为电信号并放大后,送入鉴相模块进行相位解算,最终计算出目标距离值。

为构建该系统,关键器件选型如下:在发射部分,信号发生电路采用MAX2870芯片,可生成最高6 GHz的正弦信号;该信号经由SBB5089芯片构成的功率放大电路进行放大,其在1 GHz处的增益为20 dB,最高工作频率亦可达6 GHz。在接收部分:光信号由LSIPD-A75型PIN进行探测,其接收光谱覆盖800~1 700 nm,且-3 dB带宽达2.5 GHz;后续的跨阻放大电路基于HMC478MP86芯片实现,在DC-1 GHz频带内提供22 dB增益,最高工作频率为4 GHz。鉴相端采用AD8302鉴相芯片,最高工作频率可达2.7GHz,其输出电压 V_{PHS} 可以表示为

$$V_{PHS} = K(\varphi(V_{INA}) - \varphi(V_{INB})) \quad (3)$$

式中: K 表示相位差调整斜率, $\varphi(V_{INA})$ 和 $\varphi(V_{INB})$ 表示2路信号输入的相位。为了解决AD8302芯片存在的相位二值性和非线性问题,通常采用移相双重解调法^[17],具体方案如图6所示。参考信号被分为两部分:一部分和回波信号经过AD8302鉴相电路得到第一个测量值,另一部分先经过移相电路后再与回波信号经过AD8302鉴相电路得到第二个测量值,移相电路的移相值可通过事先标定,综合2个测量结果可以避免AD8302非线性区影响鉴相精度且拓宽鉴相范围。

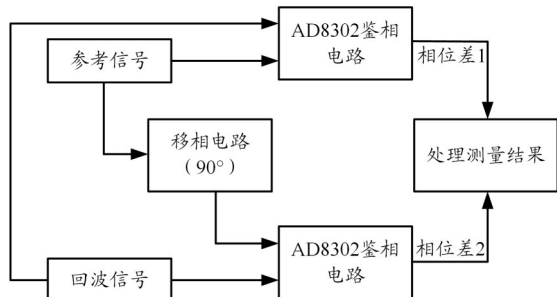


图6 移相双重解调法方案图

3 实验结果与分析

为了测试所设计的偏压控制模块的性能,本文采用JW3208光功率计对薄膜铌酸锂调制器输出的光功率稳定性进行测试,测试过程中以调制器输出最大光功率值的Peak点作为基准,此时Quad点的光功率理

论上与Peak点相差3 dB。30 min内薄膜铌酸锂调制器Quad点的漂移情况如图7所示。可以看出,误差最大两点分别为-2.97 dB和-3.02 dB,最大漂移不超过0.03 dB,说明本文设计的基于开方电路的偏压控制模块能够很好的稳定该调制器的Quad点。

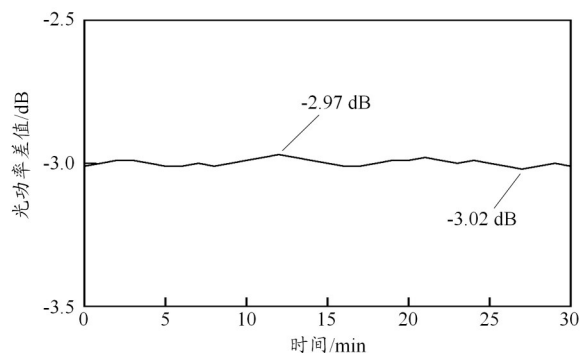


图7 Quad点在30 min内的漂移情况

在薄膜铌酸锂调制器的Quad点稳定后,采用本文所设计的相位式激光测距系统进行距离的测量,搭建的相位式激光测距系统如图8所示。实验中,信号发生电路产生频率为800 MHz、功率为+5 dBm的正弦信号作为测尺信号。该信号经功率放大电路放大后,驱动薄膜铌酸锂调制器的射频端口。调制器输出的已调光信号经光路分为参考路与回波路,2路光信号分别由光电探测器接收,并经跨阻放大电路转换为电信号后,送入鉴相模块。具体鉴相过程如下:首先,测量未经移相支路(鉴相器A)的输出电压,并依据式(3)将其转换为一个候选相位差值,此值因相位二值性存在2个可能解。接着,测量经固定移相支路(鉴相器B)的输出电压,通过比对2路结果,可唯一确定真实的相位差。若任一鉴相器的输出电压处于AD8302的非线性区间,则优先采用另一处于线性区的读数进行计算。由此最终得到精确的相位差 $\Delta\varphi$,再代入式(4)即可计算出待测距离 D 。

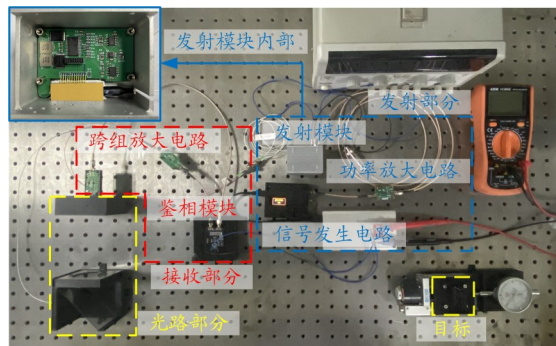


图8 整体系统搭建图

$$D = \frac{c}{2f} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (4)$$

该系统将步进电机与精度为0.01 mm的指针式百分表相结合,通过整体移动与调节百分表来实现远距离与微小距离的设置。激光测距系统中鉴相模块在测得相位差后,将相位差转换成测量值与实际距离进行比较,来分析测距系统的精度。本文以0 m为基准点,在4、8、12、16 cm位置处,通过前后移动5 mm作为待测距离。每个测量距离处分别测试100次后取平均值,实际距离与测量值的比较如表1所示,可以看出在量程范围内,本文所搭建的激光测距系统误差在±0.19 mm以内。

表1 实际距离与测量值的比较情况

实际距离/m	测量值/m	精度/m
0.035 00	0.034 84	-0.000 16
0.045 00	0.044 87	-0.000 13
0.075 00	0.075 12	0.000 12
0.085 00	0.084 81	-0.000 19
0.115 00	0.114 91	-0.000 09
0.125 00	0.125 09	0.000 09
0.155 00	0.155 16	0.000 16
0.165 00	0.165 15	0.000 15

为进一步验证薄膜铌酸锂调制器在工作时稳定Quad点对于激光测距系统的帮助,设计针对调制器有无稳定在Quad时的对比试验。搭建有无偏压控制模块的2种激光测距系统,并分别在工作1 h和10 h后对2个激光测距系统的精度进行测试。测试发现,搭载了偏压控制模块的激光测距系统在工作1 h和10 h后的测距精度分别为±0.20 mm和±0.22 mm;而未搭载偏压控制模块的激光测距系统在工作1 h和10 h后的测距精度分别为±0.28 mm和±3.3 mm。显然,采用偏压控制模块稳定Quad点后,激光测距系统在长时间工作下的测距精度较为稳定;而在未采用偏压控制模块的激光测距系统中,长时间工作使得其测量精度增加了3.11 mm。该结果进一步验证了在长时间工作时,基于开方电路的偏压控制模块能够有效使激光测距系统的测量精度更加稳定与可靠。

4 结束语

本文针对薄膜铌酸锂调制器在相位式激光测距应用中因传输函数漂移导致长期精度下降的问题,提

出并实现了一种基于开方电路的偏压控制方案。该方案通过引入开方运算,有效补偿了热光移相机固有的电压-光强非线性关系,从而实现了调制器Quad工作点的精确锁定。

基于此,本文搭建了完整的相位式激光测距实验系统进行验证。测试结果表明:所设计的偏压控制模块能够显著提升系统的工作点稳定性,在30 min观测周期内,Quad点光功率的最大漂移被控制在0.03 dB以内;在连续工作10 h后,集成该模块的系统测距精度保持稳定,而未采用该模块的对照系统其测量误差累计增大了3.11 mm。

综上所述,本文研究的偏压控制技术有效解决了薄膜铌酸锂调制器在激光测距系统中的工作点漂移难题,为提升高精度、长期稳定运行的相位激光测距系统的工程实现提供了可靠的关键技术支撑。

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, August 26-27, 2013, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2013, 2: 7-10.
- [2] Pinto A M, Rocha L F, Moreira A P. Object recognition using laser range finder and machine learning techniques[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 12-22.
- [3] Gatet L, Tap-Beteille H, Lescure M. Surface detection using a phase-shift laser range finder and neural network [J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 073002-1-073002-11.
- [4] Zhang M, Wang C, Kharel P, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability[J]. Optica, 2021, 8(5): 652-667.
- [5] Salvestrini J P, Guilbert L, Fontana M, et al. Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based Mach-Zehnder modulators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1522-1534.
- [6] Sosunov A, Ponomarev R, Zhuravlev A, et al. Reduction in DC-Drift in LiNbO₃-based electro-optical modulator[J]. Photonics, 2021, 8(12): 571-1-571-10.
- [7] Phung D H, Merzougui M, Alexandre C, et al. Phase measurement of a microwave optical modulation: characterisation and reduction of amplitude-to-phase conversion in 1.5 μm high bandwidth photodiodes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3759-3767.
- [8] Guillory J, García-Márquez J, Alexandre C, et al. Characterization and reduction of the amplitude-to-phase conversion effects in telemetry [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(8): 084006-1-084006-7.
- [9] Yang H X, Li J, Man X Y, et al. Operating point control method for the Mach-Zehnder modulator in a phase-shift laser range finder[J]. Optics express, 2024, 32(11): 19881-19894.
- [10] Ning J Y, Dai Y T, Yin F F, et al. Dither-free low-bias controller for

胡宇斌,周鹏威,张圣龙,等:基于薄膜铌酸锂调制器的相位式激光测距关键技术研究

deeply modulated Mach-Zehnder modulators[J]. Photonic Network Communications, 2016, 32(2): 259-265.

[11] Bui D T, Nguyen C T, Ledoux-Rak I, et al. Instrumentation system for determination and compensation of electro-optic modulator transfer function drift [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(12): 125105-1-125105-12.

[12] Svarny J, Chladek S. Model-based bias controller for a Mach-Zehnder intensity modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(3): 720-727.

[13] Shi S X, Yuan J, Huang Q, et al. Bias controller of Mach-Zehnder modulator for electro-optic analog-to-digital converter[J]. Micromachines,

2019, 10(12): 800-1-800-10.

[14] Wang L L, Kowalczyk T. A versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate mach-zehnder modulators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(11): 1703-1706.

[15] Chen H G, Zhang B, Hu L L, et al. Thermo-optic-based phase-shifter power dither for silicon IQ optical modulator bias-control technology [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21546-21564.

[16] 周鹏威,卢田,张益溢,等. 功率和谐波同步检测的马赫曾德调制器偏压控制技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 208-213.

[17] 张又戈,卜雄洙,杨昊青,等. 基于AD8302的鉴相系统精度提高方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(7): 27-30.