

# 马赫-曾德尔调制器最佳偏置点自动锁定技术研究

石跃武 周辉 聂鑫 王伟 冯寒亮 孙蓓云 相辉 朱志臻 杨静

西北核技术研究所 强辐射脉冲环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 目前电光调制器偏置点自动控制通常采用小信号扰动法, 主要应用于高速数字通信, 而不适用于模拟信号传输。为此提出了一种迭代算法, 通过闭环控制实现调制器最佳偏置点的锁定。从理论上分析了方法的可行性, 并搭建了反馈系统。在变温环境中进行了偏置控制实验, 结果表明, 环境温度变化率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时, 被测调制器功率抖动小于1.5%, 该方法可用于模拟信号的传输。

**关键词** 光通信; 电光调制器; 自动偏置控制; 闭环控制; 模拟信号

**中图分类号** TN761

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.042301

## Research on the Best Bias Point Automatic Locking Technique for Mach-Zehnder Modulators

Shi Yuewu Zhou Hui Nie Xin Wang Wei Feng Hanliang Sun Beiyun

Xiang Hui Zhu Zhizheng Yang Jing

State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** Small signal perturbation method is usually used for the automatic bias control of electro-optic modulator. This method is mainly applied in high speed digital communication, but is not suitable for the transmission of analog signals. An iterative algorithm is proposed, which can lock the best bias point based on closed-loop control method. The feasibility of this method is analyzed in theory, and the feedback system is built. Experiment is carried out under condition of varying temperature. The result shows that the output power jitter is less than 1.5% as the temperature change rate is less than  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . This method can be used in the transmission of analog signals.

**Key words** optical communications; electro-optic modulator; automatic bias control; closed-loop control; analog signals

**OCIS codes** 230.4110; 060.4510; 250.7360

### 1 引言

马赫-曾德尔调制器(MZM)具有带宽宽、体积小、可抑制啁啾等特点, 适用于数字通信<sup>[1]</sup>、模拟信号传输以及电场信号的测量<sup>[2-3]</sup>, 受到不同领域的广泛关注<sup>[4-6]</sup>。然而, 随着环境的变化, 调制器工作点会产生漂移, 从而导致输出信号产生不同程度的失真, 影响调制器的工作性能<sup>[7]</sup>。由于调制器材料本身的性质, 现有水平无法消除它的温度依赖性。通过施加偏置电压可使调制器处于最佳工作状态。在实际应用过程中, 人为调节偏置电压较为繁琐, 同时也不够实时准确。因此, 需要通过一种自动跟踪手段来实现最佳偏置点的锁定。

闭环控制是一种常用自动偏置控制手段。目前, 已经有多位学者提出了不同的闭环控制方法<sup>[8-12]</sup>。主要思路是向调制器发射扰动信号, 通过检测输出端高次谐波来实现。然而这些方法也有其局限性: 一方面, 扰动信号发射电路和高次谐波提取电路增加了系统的复杂程度; 另一方面, 在传输含有中低频成分的信号时, 调制信号与扰动信号会发生重叠。在最佳偏置点搜寻时, 文献中广泛采用的模糊比例-积分-微分(PID)法一定程度上降低了系统的复杂性, 但并无清晰的数学关系指导参数的选取, 需要反复调试。本文采用控制

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-11-24; 网络出版日期: 2015-02-10

作者简介: 石跃武(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事信号测量方面的研究。E-mail: shiyuewu@nint.ac.cn

导师简介: 周辉(1961—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事电磁脉冲技术方面的研究。E-mail: zhouhui@nint.ac.cn

输出光功率的思路,提出了一种无扰动信号的循环迭代锁定算法,无需发射扰动信号,结构简单,锁定快速稳定。采用可编程芯片控制偏置输出,搭建了控制电路,实现了最佳偏置点的锁定。

## 2 最佳偏置点锁定算法

### 2.1 迭代关系式

调制器输入输出光功率  $P_{in}$  与  $P_{out}$  可表示为<sup>[13-14]</sup>

$$P_{out} = \frac{\eta}{2} P_{in} \left\{ \cos \left[ \frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} + \frac{\pi V_{signal}}{V_{\pi signal}} + \varphi(t) \right] + 1 \right\}, \quad (1)$$

式中  $\eta$  为传输系统的传播系数,  $V_{bias}$  和  $V_{signal}$  为直流置偏电压与交流调制电压,  $V_{\pi bias}$ 、 $V_{\pi signal}$  分别为偏置电极半波压与信号电极半波压,  $\varphi(t)$  为调制器自然偏置点。对于小信号调制

$$\frac{\pi V_{bias}}{V_{\pi bias}} + \varphi(t) = \frac{\pi}{2} + k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (2)$$

当(2)式成立时,可得

$$P_{out} = \pm \frac{\eta}{2} P_{in} \left( \sin \frac{\pi V_{signal}}{V_{\pi signal}} + 1 \right) \approx \pm \frac{\eta}{2} P_{in} \left( \frac{\pi V_{signal}}{V_{\pi signal}} + 1 \right), \quad (3)$$

输入输出呈线性关系,对应偏置点为最佳偏置点。调制器调制信号为交流信号,若对输出功率通过光电转换,并进行低通滤波,则转换电压  $y$  与偏置电压  $x$  可采用以下数学关系表示:

$$y = A \sin(kx + m) + b, \quad (4)$$

调制器处于线性工作区时,即  $\sin(kx+m)=0$ , 此处  $y$  的斜率为  $Ak$  或  $-Ak$ 。以正线性工作区 ( $dy/dx=Ak, k>0$ ) 为例,当工作点在  $\pi/2$  附近,记偏置电压  $x_0$  对应光电转换电压  $y_0$ , 则

$$y_0 = A \sin(kx_0 + m) + b, \quad (5)$$

$$Ak \approx \frac{y_0 - y}{x_0 - x}, \quad (6)$$

最佳偏置电压

$$x = x_0 - \frac{y_0 - y}{Ak} = \frac{\sin(kx_0 + m)}{k}, \quad (7)$$

可知,加压  $x_0$  时输出值  $y$ , 便可得到最佳偏置电压  $x$ 。当加压不在最佳偏置电压邻域时,上述关系改为迭代公式

$$x_{n+1} = x_n - \frac{y_n - y}{Ak} = x_n - \frac{\sin(kx_n + m)}{k}, \quad (8)$$

式中  $x_n, y_n$  为每一次施加偏置电压及对应光电转换电压。可以证明,迭代收敛。对应于不同迭代初值,求得结果可能不在同一点,但由于调制器传输函数的周期性,不同的求解结果均可使其处于最佳偏置点。当给定初始条件时,通过多次迭代便可逼近最佳偏置电压。同时,对输出电压进行实时反馈跟踪,当外界环境变化带来附加相位变化时,通过迭代关系可快速搜寻最佳偏置点。一般来说,附加相位是一个缓变过程,容易实现远快于附加相位变化的跟踪。使调制器始终处于最佳偏置点,且不会产生直接扫描最佳偏置点产生的电压跳变。

### 2.2 初始条件的获取

要完成自动偏置控制,需要获得的初始参数为:最佳偏置点输出电压  $y_z$ , 斜率  $Ak$ 。可以通过对调制器电压扫描来实现。以适合的电压步进量向调制器输入扫描电压,并检测输出光功率,获得输入输出曲线。若保证扫描电压总长度在2倍半波压与3倍半波压之间,则最输出大值与最小值对应输入电压差为半个周期。最佳偏置点的  $y$  值为  $(y_{max} + y_{min})/2$ 。斜率  $Ak = (y_{max} - y_{min})\pi/2(x_{max} - x_{min})$ 。

在实际搜寻的过程中,  $y_z$  和  $Ak$  的获取会发生偏差。一方面由于读取误差的影响,一方面还需考虑外界环境导致的参数改变。最佳偏置功率与调制器传输损耗有关,偏置斜率与半波电压相关。图1和图2分别为实验所用调制器在不同温度下测得的最大输出光功率和半波电压。可认为固有损耗偏差很小,考虑半波电压的测量本身容易产生较大误差,其偏差在可接受范围。

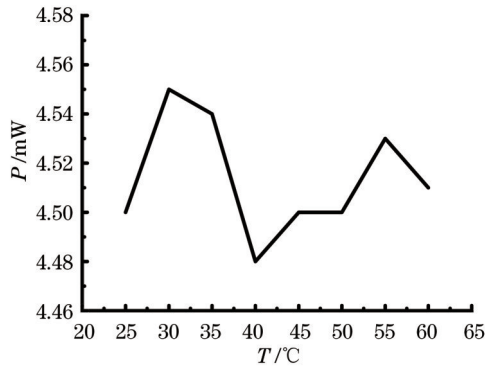


图1 调制器最大输出功率与环境温度关系

Fig.1 Relationship between the maximum output power of modulator and the environment temperature

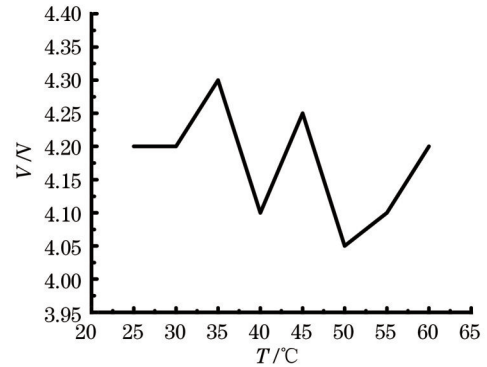


图2 调制器半波电压与环境温度关系

Fig.2 Relationship between the half wave voltage of modulator and the environment temperature

$y_2$  获取的准确性影响线性工作点的准确性,一般只要能在最佳偏置点附近落在线性工作区,则可以满足要求。而斜率  $Ak$  的准确性则影响搜寻速率,误差较大时还会导致发散。若得到斜率为  $k'$ ,收敛条件为

$$\left| x_n - x \right| < \left| x_{n+1} - x \right| = \left| x_n - x - \frac{y_n - y}{Ak'} \right| = \left| (x_n - x) \left( 1 - \frac{k}{k'} \right) \right|, \quad (9)$$

即:

$$\left| 1 - \frac{k}{k'} \right| > 1, \quad (10)$$

记  $K = k'/k$ , 则有  $K > 0.5$ 。

以工作点偏离线性工作区最远的情况 ( $m = \pi/2$ ) 作为迭代起始条件,对迭代过程进行分析。图3为  $K > 0.5$  情况下不同取值的迭代过程。从图3可以看出,  $K > 0.5$  时,迭代均收敛,并且  $K$  越接近1,搜寻速度越快,  $K < 1$  时输出产生震荡,并逐渐稳定。实际搜寻过程中,可采用值应多次搜寻取平均的方法提高准确性。

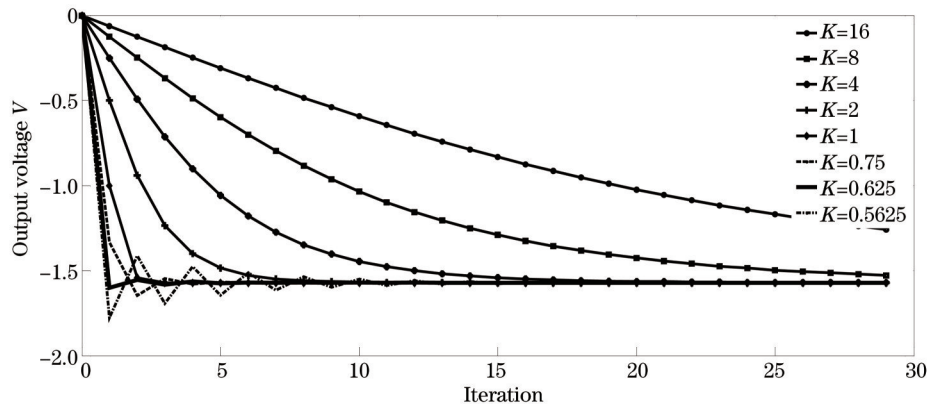


图3 不同K值对应施加直流偏置电压与迭代次数关系

Fig.3 Relationships between direct current bias and times of iteration with different K

### 3 自动偏置控制的实现

图4和图5分别为基于上述算法的反馈控制系统结构示意和实物图。整个系统按顺序包含光电转换、低通滤波、可编程芯片、直流放大、低通滤波等模块。电路调试过程中,需要对输出功率范围进行预估,保证光电转换输出电压在系统参考电压以内。同时设计合适的运算放大器放大倍数,使输出电压大于调制器半波电压的二倍,保证输出电压范围内光功率可变化一个周期。运放后端外加低通滤波,一方面去除过程带来的高频噪声,一方面防止输出电压跳变时干扰调制信号。

系统运行过程中不断取得反馈电压与基准电压比较,通过增量调整输出电压。由于反馈控制的实时性与精确性,当工作点漂移导致采样电压产生微小变化时便可被探测补偿。因此系统除在初始稳定过程和计算所得输出电压超过实际电压范围时,调制器输出功率不会产生跳变,对调制信号不产生干扰。

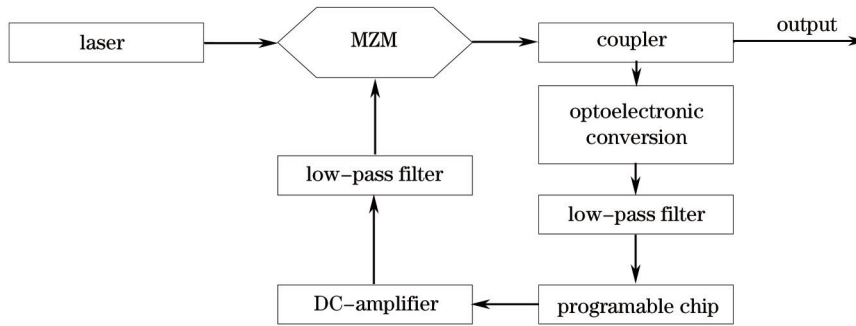


图4 反馈控制系统结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the feedback control system

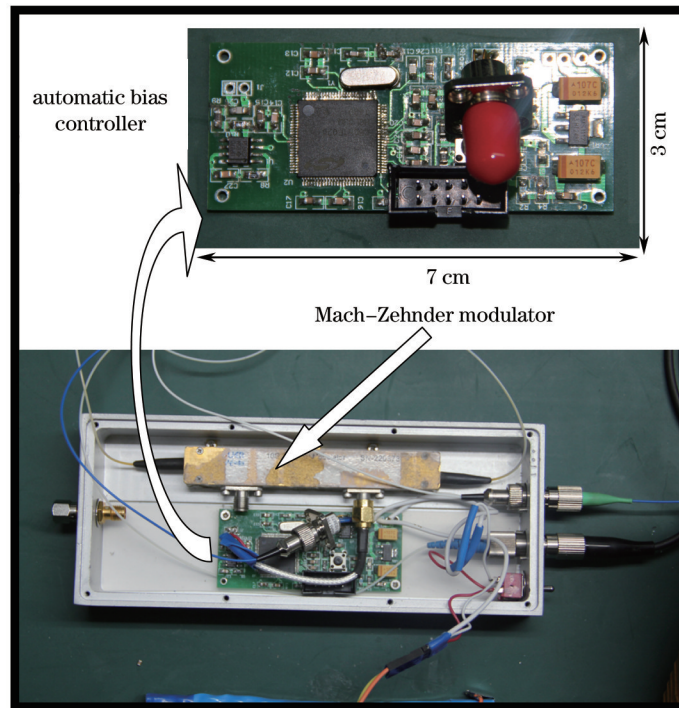


图5 反馈控制系统结构实物图

Fig.5 Picture of the feedback control system

#### 4 结果与讨论

最佳偏置点锁定稳定过程如图6所示,反应上电后光电转换电压随时间变化关系。从运行到稳定的过程经历三个阶段:第I阶段为上电扫描获取初值阶段;第II阶段功率输出发生紊乱,可能是由于突然改变电

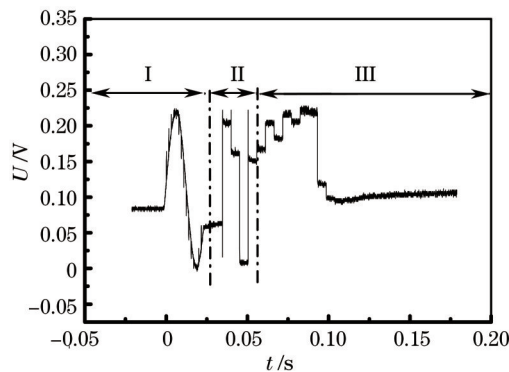


图6 最佳偏置点锁定过程

Fig.6 Best bias locking process

压时调制器电极聚集电荷未及时消散,带来附加相位漂移致使锁定紊乱;第III阶段为正常最佳偏置点锁定过程。从系统上电到调制器输出功率稳定总耗时不到0.2s,且能保持持续稳定的功率输出,完全达到调制器使用需求。

在室内条件下,调制器工作点漂移较为缓慢,需要借助高低温箱模拟剧烈环境变化,进行偏置温控实验。闭环控制时和自然状态下输出功率随温度变化曲线如图7。可以看出,自然状态下调制器工作点发生了严重漂移,信号传输会发生严重失真。加上闭环控制系统后输出一直稳定在最佳偏置点对应的功率。在实验中,高低温箱内部温度平均变化率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,不同温度时调制器的输出功率以及抖动百分比如图8所示。结果表明,调制器偏置控制下功率抖动小于1.5%。

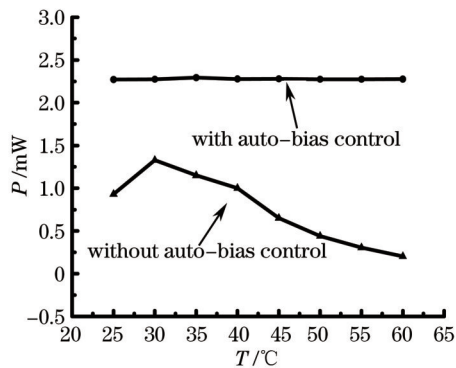


图7 自动偏置控制状态和自然状态下调制器输出功率对比  
Fig.7 Output power of modulator with auto-bias control and without auto-bias control

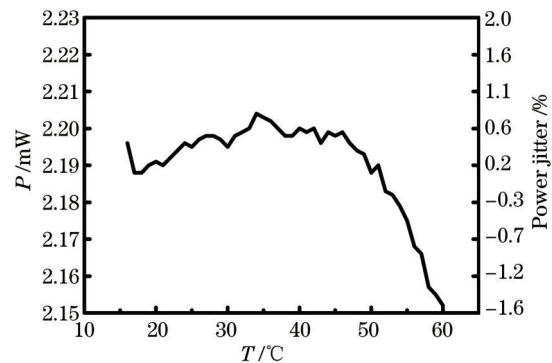


图8 不同温度时调制器的输出功率以及抖动百分比  
Fig.8 Output power and power jitter of modulator with different temperatures

## 5 结 论

通过对调制器输入输出光功率的数学关系的分析,提出一种锁定最佳偏置点的迭代算法。并搭建整个回路,实现了光功率的稳定输出。通过扫描获取初值的方式,克服了对光路固有损耗的依赖性。通过了变温环境实验验证。环境温度变化率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,被测调制器功率抖动小于1.5%。系统结构简单,响应速度快,适用于恶劣环境下模拟电压信号的传输。

## 参 考 文 献

- 1 M Chacinski, U Werstergren. 100 GHz electro-optical modulator chip [C]. 16<sup>th</sup> Opto-Electronics Commun Conference, 2011. 59-60.
- 2 Meier, T Kostrzewa, C Petermann, *et al.*. Integrated optical e-field probes with segmented modulator electrodes [J]. J Lightwave Technol, 1994, 12(8): 1497-1503.
- 3 Zhang Jiahong, Chen Fushen, Li Wanjun. Influence of frequency characteristics by piezoelectric effect on LiNbO<sub>3</sub> integrated optical waveguide electric field sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105006.  
张家洪, 陈福深, 李万军. 压电效应对LiNbO<sub>3</sub>集成光波导电场传感器频率特性的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105006.
- 4 Li Jinyang, Yao Yanqing, Wu Jianjie, *et al.*. Theoretical analysis and preliminary fabrication of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0223001.  
李金洋, 要彦清, 吴建杰, 等. 钛扩散铌酸锂脊形波导理论分析与初步制备[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0223001.
- 5 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505008.  
毕卫红, 申远, 刘强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505008.
- 6 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006005.  
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1006005.

- 7 Song Yuan, Jin Guoliang, Liang Binming. Physical mechanism of the refractive index change in the LiNbO<sub>3</sub> waveguides [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2001, 12(10): 1025-1028.  
宋媛, 金国良, 梁斌明. 铌酸锂波导中折射率改变的物理机制研究[J]. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1025-1028.
- 8 S Aisawa, H Miyao, N Takachio, *et al.*. DC drift compensation method using low frequency perturbation for LiNbO<sub>3</sub> intensity modulator[C]. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 1997. 123-124.
- 9 Q Jiang, M Kavehrad. A subcarrier-multiplexed coherent FSK system using a Mach-Zehnder modulator with automatic bias control[J]. Photon Technol Lett, 1993, 5(8): 941-943.
- 10 B Onillon, B Benazet, O Llopis. Advanced microwave optical for LO distribution in satellite payloads[C]. International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2006. 1-4.
- 11 Zou Hui, Hu Yi, Tian Jun, *et al.*. Stabilization control of the optimal bias point of M-Z external modulator [J]. Study on Optical Communications, 2008, 34(3): 30-32.  
邹晖, 胡毅, 田军, 等. M-Z外调制器最佳偏置点稳定控制[J]. 光通信研究, 2008, 34(3): 30-32.
- 12 Li Xuan, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. An automatic bias control method applied to all bias points of electro-optic modulator [J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 473-477.  
李轩, 赵尚弘, 李勇军, 等. 任意偏置点的电光调制器自动偏置控制方法[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 473-477.
- 13 R Zeng, B Wang, Q Yu, *et al.*. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement [J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 312-319.
- 14 Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulator [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1005004.  
袁燕, 秦毅. 基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1005004.

栏目编辑: 韩峰