

doi:10.3788/gzxb20174610.1023002

马赫-曾德尔调制器任意偏置点稳定控制技术

郝崇正¹, 李洪祚¹, 孙权¹, 杨悦¹, 王大帅²

(1 长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130000)

(2 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130000)

摘 要:为实现马赫-曾德尔调制器(MZM)任意偏置工作点的稳定控制,提出了一种基于平均光功率斜率值和余切值的复合控制算法,实现了利用FPGA技术的工作点稳定控制.首先分析了MZM偏置点稳定控制的必要性,然后研究了控制算法的理论基础,并在Matlab平台上进行了数学仿真验证,最后搭建了MZM偏置工作点稳定控制系统.当激光器的输出光功率为5 dBm, MZM半波电压为4.2 V,插入损耗3 dB,输入脉冲为方波信号,1 Gbps和1 Mbps通信速率下,1小时内MZM输出光信号的平均功率波动小于 $\pm 5\%$.实验结果表明,该方案实现了MZM任意偏置工作点的稳定控制,有效的提高了MZM在光通信中的可靠性.

关键词:光学器件;马赫-曾德尔调制器;偏置点稳定控制;平均光功率;复合控制算法

中图分类号:TN761

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1023002-9

Stable Bias Control Technique for Any-point Locking in Mach-Zehnder Modulator

HAO Chong-zheng¹, LI Hong-zuo¹, SUN Quan¹, YANG Yue¹, WANG Da-shuai²

(1 School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000 China)

(2 Key Laboratory of Education Ministry Optoelectronics Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun 130000 China)

Abstract: A control algorithm to achieve working bias stability for Mach-Zehnder Modulator (MZM) is proposed. Its utilize first-order and cotangent value of Average Optical Power (AOP) with FPGA technique. Firstly, we describe the reason for stabilizing the MZM at the common point. Then, control theories for keeping the bias point at different working point are studied by numerical simulation. At last, arbitrary working point control system is built. Experiment results indicate that, the fluctuation of output average optical power is less than $\pm 5\%$ (within one hour) under the condition of 5 dBm laser output power (1 550 nm), 4.2 V half-wave voltage, 3 dB insertion loss and 1Gbps/1Mbps speed. The system has the ability to maintain the bias at any point in the optical power curve and improved the reliability of MZM in optical communication.

Key words: Optical devices; Mach-Zehnder modulator; Bias stability control; Average optical power; Compound control algorithm

OCIS Codes: 230.4110; 230.1150; 060.4510; 040.1880; 060.1660; 060.4080

0 引言

近年来,自由空间光通信技术(Free Space Optical, FSO)凭借其高速率、大带宽和安全性好的特点受到越来越多的关注^[1].在FSO中为了满足高速调制的需求,基于调制器的外调制方案得到了广泛的应用^[2].在

基金项目:国家自然科学基金(No.60977052)和国家高技术研究发展计划(No.2011AA7117046)资助

第一作者:郝崇正(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为空间激光通信技术. Email:perry_peace@163.com

导 师:李洪祚(1953-),男,教授,学士,主要研究方向为空间激光通信技术. Email:LiHongzuo@sohu.com

通讯作者:王大帅(1983-),男,助理研究员,博士,主要研究方向为空间光通信技术. Email:0204113@163.com

收稿日期:2017-07-10;录用日期:2017-08-22

<http://www.photon.ac.cn>

不同种类的调制器中,马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)的宽带宽、低电压和低啁啾特性使其得到越来越多的应用.然而,由于外加电场的改变、自然老化、制造工艺不完善、温度变化等因素都会引起调制器工作点的漂移^[3],进而导致调制输出光信号的失真和通信系统误码率(Bit Error Rate, BER)的上升.当前,偏置工作点稳定控制技术主要有两类,一类是基于外加低频率导频信号的谐波分析法^[4-8],一类是基于光功率比值的分析法^[9].H Kawakami 等人提出了一种外加低频率扰动信号的分析方法^[4],该方法对调制后的扰动信号进行基 2FFT 谐波分析,电路结构复杂,运算量大且只能将工作点稳定在传输响应曲线的 ±Quad、Peak 和 Null 点.K Sekine 等人提出了利用 MZM 输出和输入光功率的比值判定偏置工作点是否发生漂移^[9],该方法容易受到输入光功率波动和系统插入损耗的影响,控制精度较差.法国 Photoline、美国 Quantum Technology 和北京康冠等公司相继推出了偏置点控制器,然而这类产品主要是用于强度调制中的偏置点控制,不能满足不同调制格式的需求.同时,商用化产品体积较大、价格昂贵,无法应用于空间光通信系统.因此,研制一种高精度、多调制格式和小型化的 MZM 偏置工作点稳定控制系统具有重要的意义.

本文通过对 MZM 传输响应特性和工作点漂移现象的研究,提出了一种基于 FPGA 的平均光功率斜率值和余切值的复合反馈控制方案.通过动态监测 MZM 输出光信号的平均功率值,利用其斜率值和余切值判断偏置点漂移的大小和方向,通过在直流偏置端调整偏置电压,从而将偏置工作点稳定在传输响应曲线的任意位置.仿真和实验证明,该控制方案不受输入平均光功率、插入损耗以及调制驱动电压的影响,提高了 MZM 工作的稳定性.

1 马赫-曾德尔调制器工作原理分析

MZM 基于马赫-曾德尔干涉仪结构,由输入输出端的 Y 型分支和两个平行的光波导组成,如图 1. 光信号在输入端被 Y 型分支分为两束,分别进入上下两个光波导中传输,在输出端的 Y 分支处合为一束光信号输出^[10].通过在上下两个光波导上施加不同的电压使电光晶体的折射率发生改变,进而导致光信号的传播路径发生变化,两束光在输出端发生相长或相消干涉,引起相位的变化.其中,相移 180° 所需要的电压称为 MZM 的半波电压,记为 V_{π} .

设输入光信号 $E_{in}(t) = |E_0| e^{j\omega t}$, ω 为波长,由图 1 知,调制输出信号为

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} E_{in}(t) \left[e^{j\pi \left(\frac{u_1(t)}{V_{\pi 1}} + \frac{V_{d1}}{V_{\pi DC1}} \right)} + e^{j\pi \left(\frac{u_2(t)}{V_{\pi 2}} + \frac{V_{d2}}{V_{\pi DC2}} \right)} \right] = E_{in}(t) \cos \left[\frac{\pi}{2V_{\pi}} (u_1(t) + v_{d1}) - (u_2(t) + v_{d2}) \right] \cdot e^{j\frac{\pi}{2V_{\pi}} [(u_1(t) + v_{d1}) + (u_2(t) + v_{d2})]} \quad (1)$$

式中 $V_{\pi 1}$ 、 $V_{\pi 2}$ 分别为使 MZM 光波导相移 180° 所需的电压,通常 $V_{\pi 1} = V_{\pi 2} = V_{\pi DC1} = V_{\pi DC2} = V_{\pi}$, $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 分别为上下两臂驱动调制电压, V_{d1} 和 V_{d2} 分别为上下两臂的直流偏置电压.令 $V_1(t) = u_1(t) + V_{d1}$, $V_2(t) = u_2(t) + V_{d2}$, 其中 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 为两个调制臂的输入电压,则由式(1)可知输出光信号的功率为

$$P_{out}(t) = E_{out}(t) E_{out}^*(t) = P_{in}(t) \cos^2 \left[\frac{\pi}{2V_{\pi}} \left[\frac{V_1(t) - V_2(t)}{2} \right] \right] = \frac{1}{2} P_{in}(t) \left[1 + \cos \frac{\pi}{V_{\pi}} (V_1(t) - V_2(t)) \right] \quad (2)$$

若调制电压为 0,通过改变两臂之间的直流偏置电压可得到 MZM 的传输特性曲线.根据不同的调制格式, MZM 的偏置工作点位于传输特性曲线的不同位置,以保证最佳的传输效果.然而,受到各种内在和外在因素的影响, MZM 的偏置工作点会发生漂移,导致输出光信号产生失真.因此,在实际工程应用中实时监测和保持偏置工作点的长期稳定,对于通信系统具有重要的意义.

2 偏置工作点控制原理及仿真

2.1 偏置工作点控制数学模型

工作在推挽状态的 MZM,输出光功率为^[11-16]

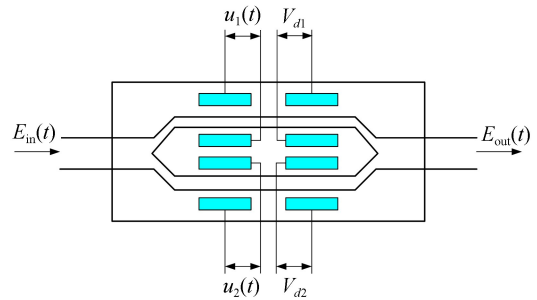


图 1 马赫-曾德尔调制器结构示意图
Fig.1 Internal structure of Mach-Zehnder modulator

$$P_o(t) = \frac{kP_i}{2} \left(1 + \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] \right) \quad (3)$$

$P_o(t)$ 为输出光功率, $P_i(t)$ 为输入光功率, k 为系统插入损耗, V_π 为调制器的半波电压, $V_s(t)$ 为输入调制脉冲信号, V_B 为输入偏置电压。

经过时间 T 后,调制器输出的平均光功率为

$$\{P_o(t)\} = \frac{kP_i}{2} \left(1 + \frac{1}{T} \int_0^T \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt \right) \quad (4)$$

式(4)对 V_B 求偏导,可得平均光功率的一阶导数,即平均光功率的斜率值

$$d_1 = \frac{\partial \{P_o(t)\}}{\partial V_B} = -\frac{kP_i}{2} \frac{\pi}{V_\pi} \frac{1}{T} \int_0^T \sin \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt \quad (5)$$

式(5)对 V_B 求偏导,可得平均光功率的二阶导数

$$d_2 = \frac{\partial^2 \{P_o(t)\}}{\partial V_B^2} = -\frac{kP_i}{2} \left(\frac{\pi}{V_\pi} \right)^2 \frac{1}{T} \int_0^T \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt \quad (6)$$

由式(5)和式(6)知,平均光功率的余切值为

$$R = \frac{\frac{\partial^2 \{P_o(t)\}}{\partial V_B^2}}{\frac{\partial \{P_o(t)\}}{\partial V_B}} = \frac{\pi \int_0^T \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt}{\int_0^T \sin \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt} = \frac{\pi}{V_\pi} \int_0^T \cot \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_s(t) + V_B) \right] dt \quad (7)$$

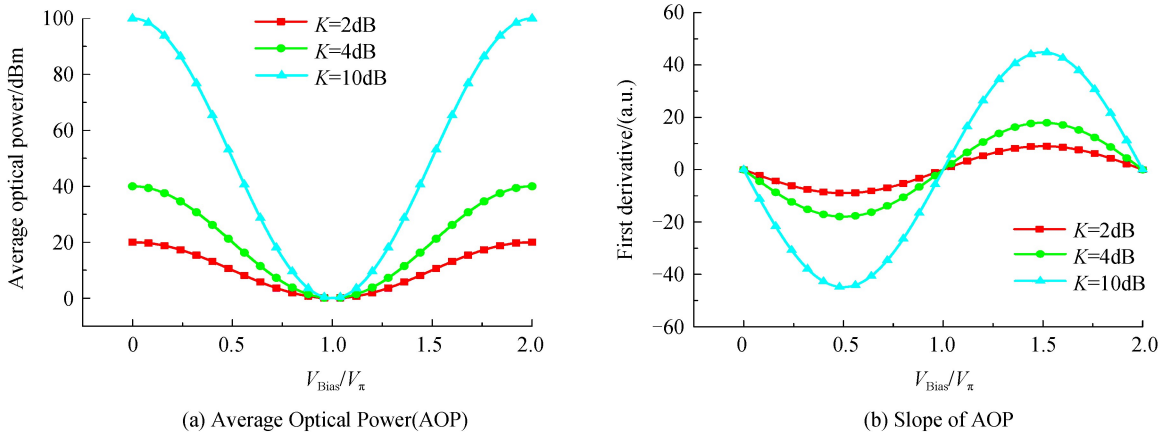
基于光功率比值的直接监测控制方案中,选用输出光功率值作为系统监测变量,由式(4)知,系统输出光功率受输入光功率 P_i 、调制脉冲信号 $V_s(t)$ 和系统插入损耗 k 的影响,在应用中,导致测量误差较大,控制精度低。由式(7)知,平均光功率余切值不受系统插入损耗 k 和输入光功率 P_i 的影响,因此可以作为偏置工作点精确控制的监测变量。

2.2 偏置工作点控制原理仿真

以偏置电压与半波电压的比值为横轴,利用 Matlab 软件对公式(4)~(7)进行仿真,分别讨论输入光功率 P_i 、插入损耗 K 和调制驱动电压峰峰值 V_{pp} 变化时,平均光功率、平均光功率斜率值、平均光功率二阶导数和平均光功率余切值的变化情况。系统初始参数为:调制驱动信号为频率 1 MHz 峰峰值为 7 V 的方波,输入光功率为 10 dBm,插入损耗 $K=2$ dB,半波电压 $V_\pi=3.5$ V,积分时间 $T=1$ s。仿真结果如图 2~4 所示。

由图 2(a)~(c)知,当插入损耗发生变化时,平均光功率、平均光功率斜率值和平均光功率二阶导数的幅值都发生变化,但单调性和单调区间不发生改变。平均光功率在 $V_{Bias}=V_\pi$ 处取得最小值;平均光功率的斜率值在 $V_{Bias}=0.5V_\pi$ 处取得最小值,在 $V_{Bias}=1.5V_\pi$ 处取得最大值;平均光功率的二阶导数在 $V_{Bias}=V_\pi$ 处取得最大值。

当输入光功率发生改变时,由图 3(a)~(c)知,平均光功率、平均光功率斜率值和平均光功率二阶导数在对应区间内与插入损耗改变时具有相同的变化趋势,只是幅值受输入光功率的影响而不同。



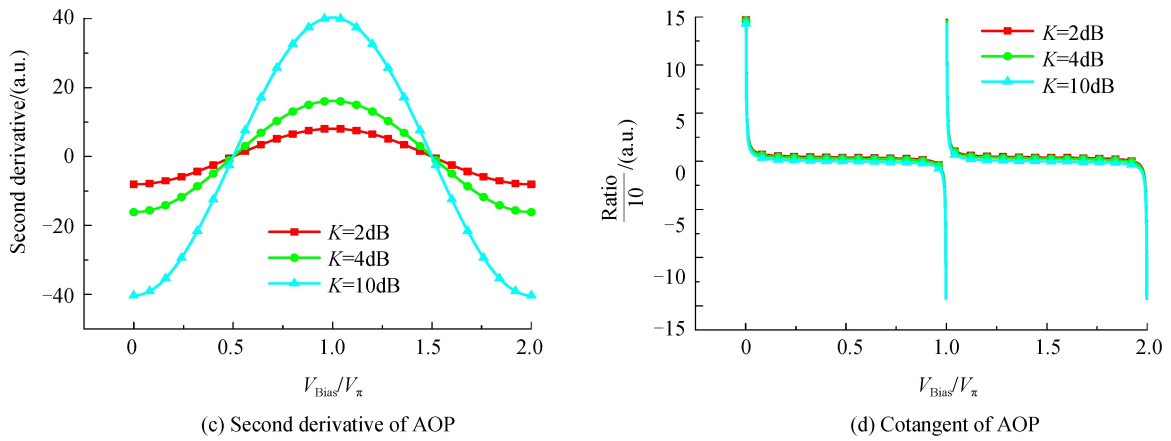


图 2 插入损耗改变的系统仿真

Fig.2 System simulation of the insertion loss variation

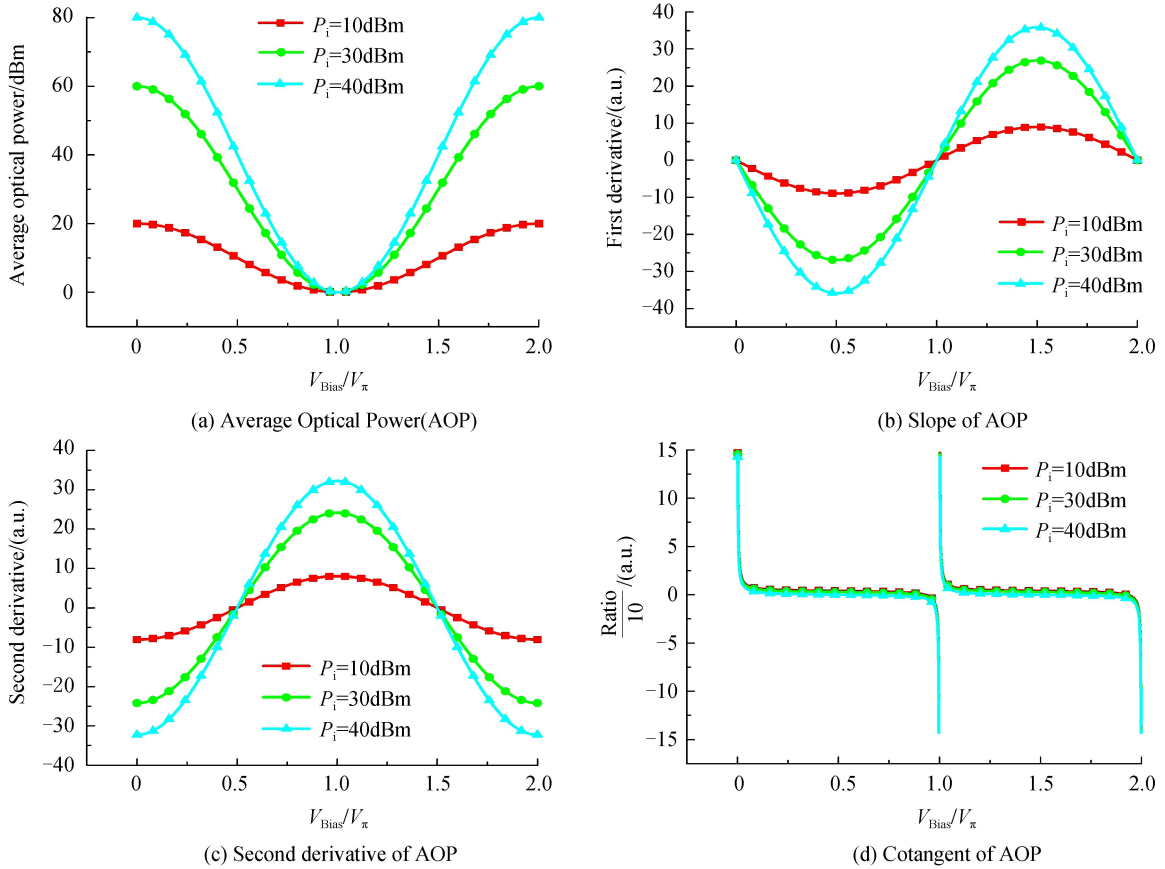


图 3 输入光功率改变的系统仿真

Fig.3 System simulation of the input optical power variation

由图 4(a)~(c)知, $V_{pp} = mV_{\pi}$ ($m=1, 3, \dots$) 时, 平均光功率及其斜率值和二阶导数的幅值和单调区间与 $V_{pp} = (m+1)V_{\pi}$ ($m=1, 3, \dots$) 具有相反的变化趋势, 但斜率值和二阶导数的零点位置未发生改变. 图 2~4 可知, 尽管插入损耗, 输入光功率和驱动电压峰值发生改变时, 平均光功率、平均光功率斜率值和平均光功率二阶导数的幅值和单调区间会发生改变, 但平均光功率的余切值在对应区间内的单调性不发生变化. 平均光功率的余切值在 $(0, 1)V_{\pi}$ 和 $(1, 2)V_{\pi}$ 内均具有相同的单调性, 但 $V_{Bias} = V_{\pi}$ 是平均光功率余切值的渐近线, 无法判断此时偏置工作点是否发生漂移. 由图 2~4 的 (b) 可知, 当 $V_{Bias} = V_{\pi}$ 时, 平均光功率的斜率值为 0, 因此, 可以利用平均光功率的斜率值判断 $V_{Bias} = V_{\pi}$ 时的工作点位置. 综上, 当 $V_{Bias} \neq mV_{\pi}$ ($m=1, 3, \dots$) 时, 利用平均光功率的余切值作为偏置工作点的监测变量; 当 $V_{Bias} = mV_{\pi}$ ($m=1, 3, \dots$) 时, 平均光功率的斜率值可以判断偏置工作点是否发生漂移. 由仿真结果知, 该控制方法可以排除插入损耗、输入光功率和驱动电压变化时对系统产生的干扰.

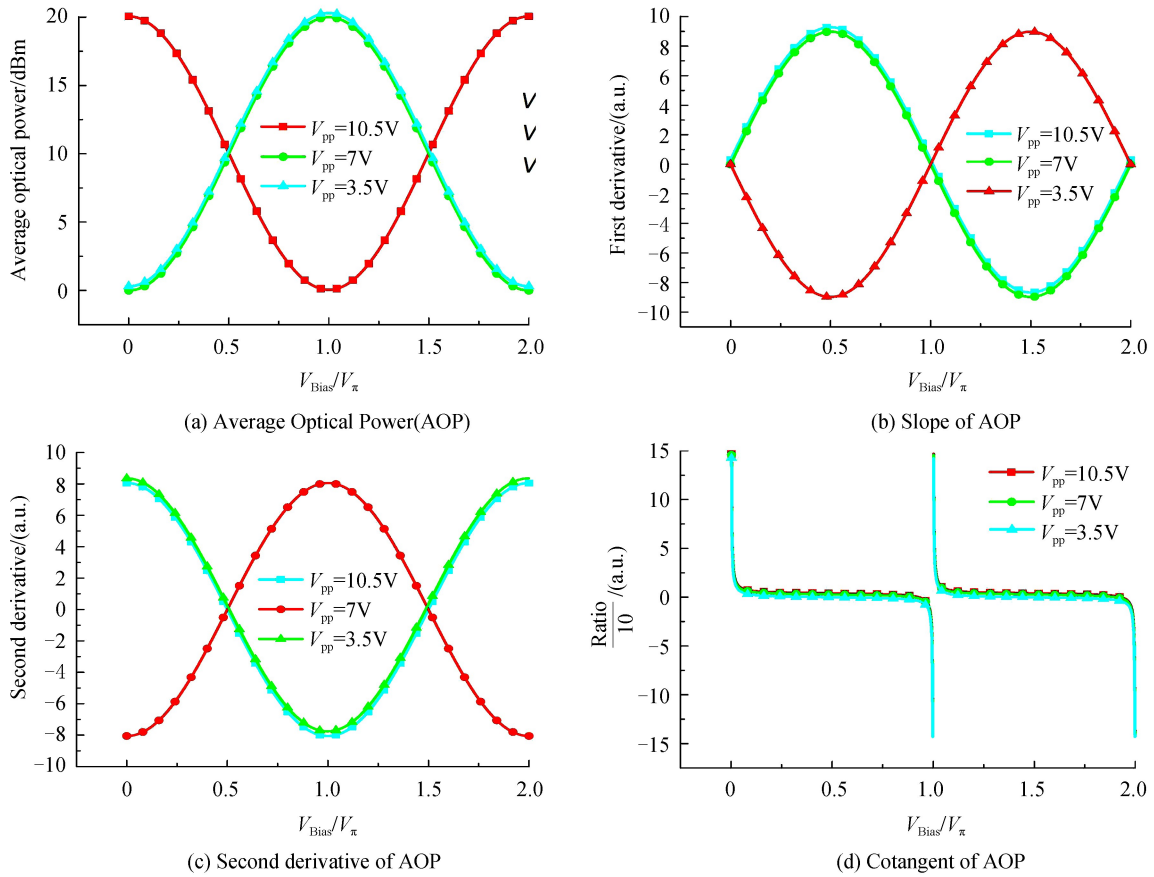


图 4 驱动电压峰峰值改变的系统仿真

Fig.4 System simulation of the peak-peak drive power variation

3 实验和结果分析

3.1 偏置工作点稳定控制方案

设计的 MZM 偏置工作点控制系统如图 5.在调制器脉冲输入端(RF)输入调制驱动信号,根据调制格式确定偏置工作点对应的偏置电压.MZM 输出的光信号通过 9:1 的光耦合器进入偏置控制单元,光电探测器将光信号转化为电信号,之后由 FPGA 进行 AD 和 DA 转换.当 $V_{Bias} \neq mV_{\pi}$ ($m=1,3,\dots$) 时, FPGA 读取光电探测器输出电压值 V_{g1} ,MZM 的 Bias 端增加偏置电压 ΔV 后, FPGA 再次读取光电探测器输出电压值 V_{g2} ,根据两次采集电压值计算平均光功率斜率值 d_{11} ,之后在 MZM 的 Bias 端再次增加偏置电压 ΔV 并计算平均光功率斜率值 d_{13} ,由 d_{11} 和 d_{13} 计算平均光功率二阶导数 d_2 ,由 d_{11} 和 d_2 计算初始余切值 R_1 ;重复以上

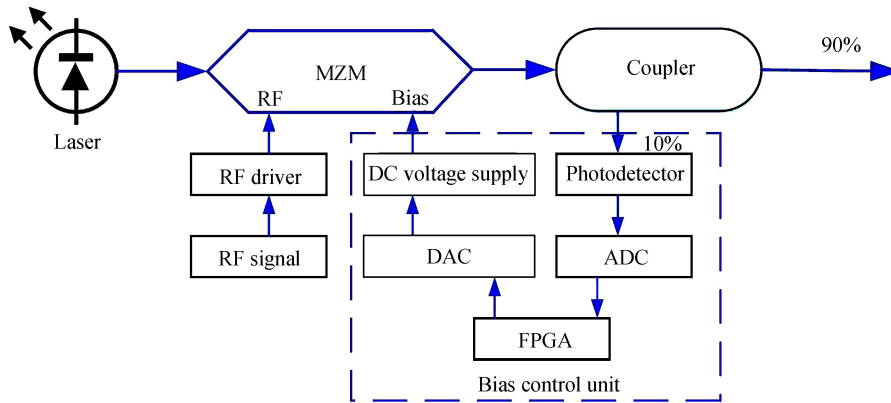


图 5 马赫-曾德尔调制器偏置工作点控制框图

Fig.5 Schematic diagram of working bias point for Mach-Zehnder modulator

步骤得到 R_2 , 当 $R_2 > R_1$ 时说明工作点左移, FPGA 根据区间范围输出补偿电压并经过 DA 转换和放大输入到 MZM 偏置电压输入端, 直至 $R_1 = R_2$ ($R_2 < R_1$ 时补偿方式与此相反). 当 $V_{\text{Bias}} = mV_{\pi}$ ($m = 1, 3, \dots$) 时, FPGA 只需计算平均光功率的斜率值, 通过比较此时平均光功率斜率值 d_{12} 与 0 的大小关系, 判断偏置工作点是否发生漂移, 若工作点出现漂移, 调整偏置电压直至 $d_{12} = 0$.

偏置工作点控制流程图如图 6 所示. 其中, V_{g1} 为设置完偏置电压 V_{Bias} 后, FPGA 初始采集的电压值, V_{g2} 为电光调制器偏置电压输入端施加 $V_{\text{Bias}} + \Delta V$ 电压后在输出端采集的电压值, V_{g3} 为计算完平均光功率斜率值且 $V_{\text{Bias}} = mV_{\pi}$ ($m = 1, 3, \dots$) 时输出端采集的电压值, V_{g4} 为电光调制器偏置电压输入端施加 $V_{\text{Bias}} + 2\Delta V$ 电压后在输出端采集的电压值, V_{g5} 为计算完余切初始值 R_1 后采集的电压值, V_{g6} 为电光调制器偏置电压输入端再次施加 $V_{\text{Bias}} + \Delta V$ 后在输出端采集的电压值 (此时若电光调制器的传输响应曲线发生改变, $V_{\text{Bias}} + \Delta V$ 在新的传输响应曲线上对应的采集电压值与原传输响应曲线对应的采集电压值不同即: $V_2 \neq V_6$).

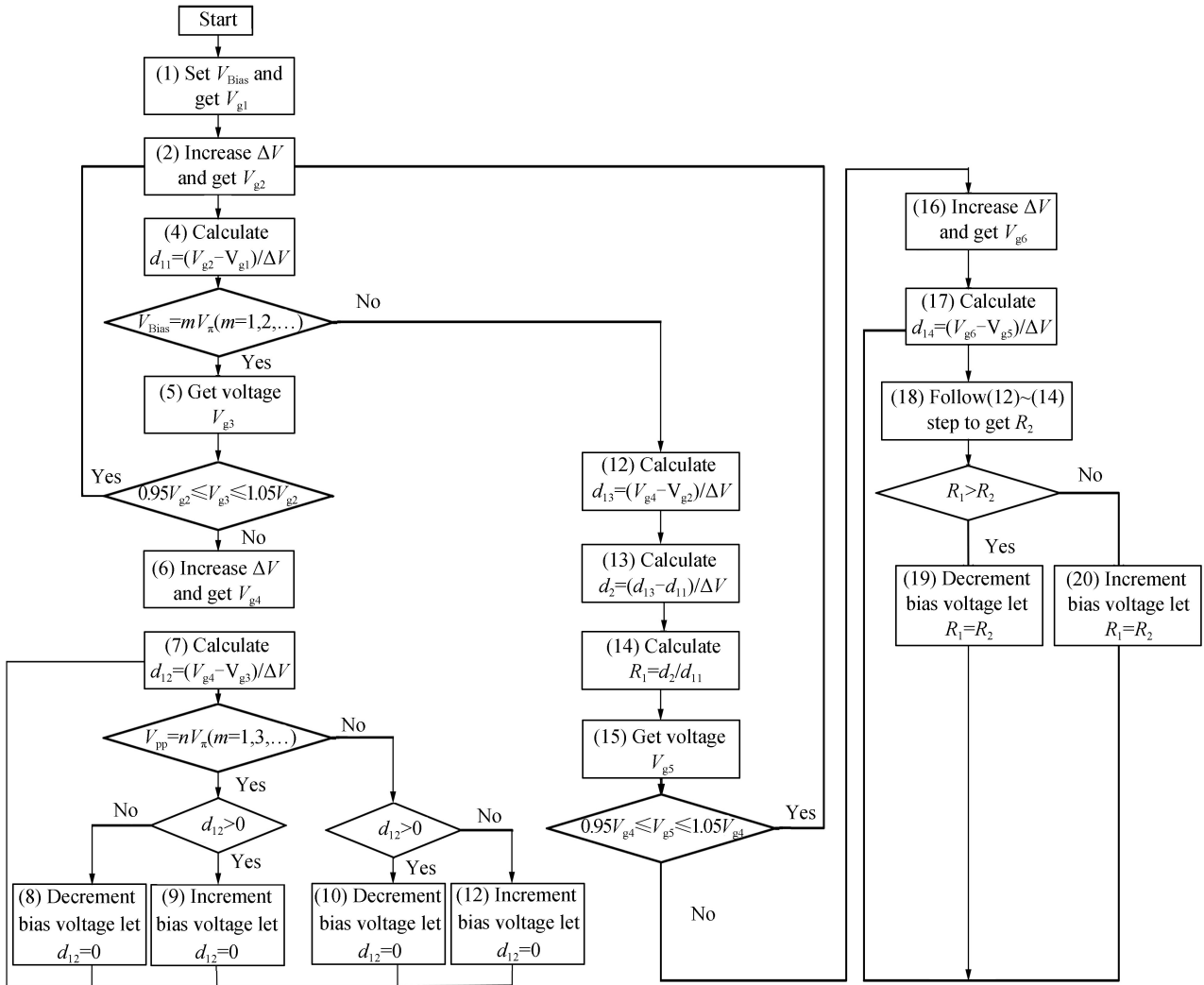


图 6 马赫-曾德尔调制器偏置工作点控制流程图

Fig.6 The flow chart to lock working bias point for Mach-Zehnder Modulator

因为系统无法避免噪声的干扰和取样延时的影响, 为了达到良好的控制效果, 需要给采集的数据设置合理的波动范围. 根据实际系统的参数和多次实验结果分析, 将数据波动范围设定为 $(0.95V_{g2} \leq V_{g3} \leq 1.05V_{g2})V$ 和 $(0.95V_{g5} \leq V_{g6} \leq 1.05V_{g5})V$, 当数据在此范围内波动时控制单元认为偏置工作点未发生偏移, 反之发生偏移. 此外, 偏置电压增量 ΔV 的设定对于端口的采样也很重要. 实验中测定 ADC 的分辨率为 $0.04V$, 且 AD 的输入端口存在较大的噪声扰动, 最大扰动噪声大于 $0.16V$, 平均值大于 $0.06V$. 由图 7(b) 可知, 未使用滤波算法的采样值波动较大, 无法识别电压的微小变化; 图 7(a) 使用均值限幅滤波算法后, 端口的采样稳定性有较大的提高. 在 SignalTap 仿真中可以发现, $\Delta V = 0.05V$, FPGA 采样时钟为 $50M$, 端口滤波之后 AD 采样的波动范围可以长期控制在 $0.04V$ 之内.

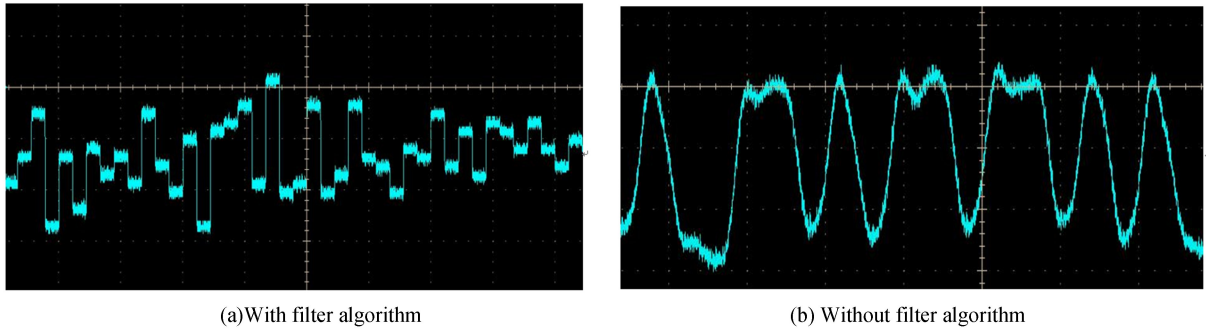


图7 AD端口采样波形图

Fig.7 The wave diagram in AD sample port

由图2~4的(d)仿真结果可知,R随偏置点位置变化的范围约为2个单位,直接测量R值的难度较大.利用FPGA进行定点小数运算,AD采样时保留小数点后2位有效数字,算法中计算平均光功率斜率值和二阶导保留小数点后3位有效数字,计算余切值保留4位有效数字.尽管R值的变化很小,但算法中采用端口滤波和定点小数运算可以提高对R控制的灵敏度.

3.2 实验结果分析

实验光源选用RIO单模激光器,波长1550nm,输出功率5mW;电光调制器选用EOSpace公司的MA-18-P-P-FC,半波电压4.2V;信号源采用Tektronix公司的DTG 5274(2.7Gb/s);示波器选用Tektronix DPO70404(25Gb/s);光功率计选用THORLABS公司的S146C,光电探测器使用自主研发的1550nm光电探测模块,ADC和DAC选用ADI公司的8位AD9280和AD9708.实验中分别测量了在偏置电压 $V_{Bias}=1.9V$ 、调制脉冲信号峰峰值 $V_{pp}=0.5V$,驱动放大器为15dB时,1Mbps和1Gbps通信速率下偏置点控制系统的输出光平均功率、眼图和解调波形.

首先测试了通信速率为1Mbps下未使用偏置工作点控制时,MZM输出平均光功率的变化.由图8(a)点线可知,在1小时内偏置工作点不断发生漂移且输出平均光功率也逐渐改变.在第20minute时,输出平均光功率由3.57dBm骤变为4.96dBm,测试时间内输出的平均光功率由开始的3.44dBm变为最终的5.14dBm,波动为1.7dBm.使用偏置点控制系统后,由图8(a)三角线可知,在1小时内偏置点发生较小的漂移,输出平均光功率波动为0.21dBm.1Gbps通信速率下,未使用偏置工作点控制时,输出平均光功率从4.5dBm变为4.93dBm,由图8(b)菱形线可知,1小时内输出平均光功率具有2个较大的抖动区间,分别为4.6dBm~4.75dBm和4.8dBm~5.0dBm,1小时内输出光功率波动为0.43dBm.由图8(b)三角线可知,使用偏置工作点控制后,输出平均光功率波动仅为0.24dBm.由以上测试数据可知,在不同的通信速率下,使用偏置工作点控制,系统的输出平均光功率具有较好的稳定性.

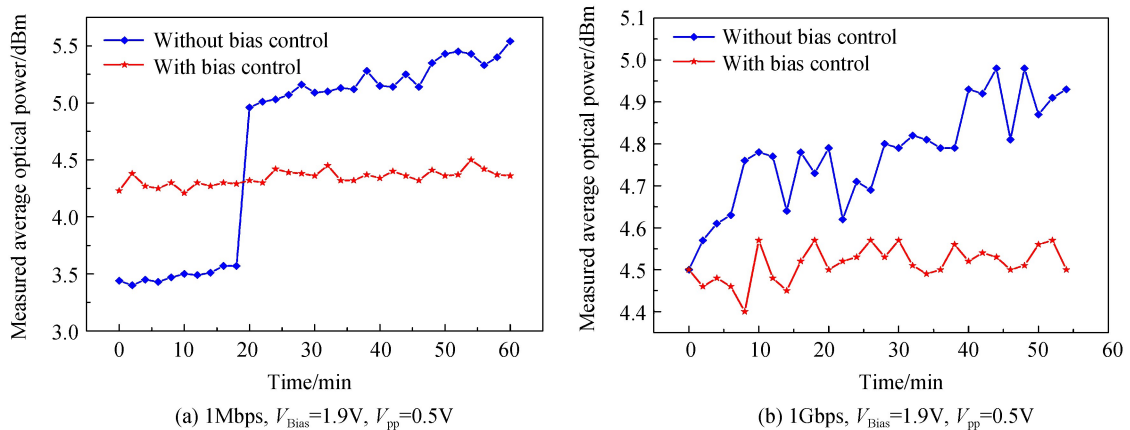
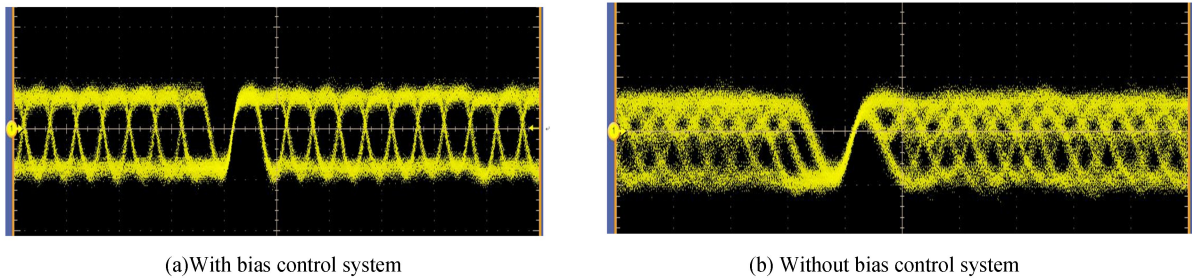


图8 偏置工作点稳定控制系统平均光功率测试结果

Fig.8 The test result of AOP for working bias control system

当MZM的偏置电压为1.9V时,偏置工作点位于传输响应曲线的正交点,此时进行OOK调制,MZM输出光信号功率约为4.5dBm.1Gbps通信速率下调制信号的眼图如图9所示.图9(a)为使用偏置工作点控

制的眼图,由图可知,眼睛张开度适中,码间串扰较小;眼图线迹清晰,噪声干扰小.不使用偏置工作点控制时的眼图如图 9(b)所示,由图可知,此时眼睛张开度较小,线迹模糊,噪声干扰大,眼图不端正,误码率高.由系统测试眼图可知,使用偏置工作点控制,能够改善由于偏置工作点漂移造成的通信质量恶化的现象.



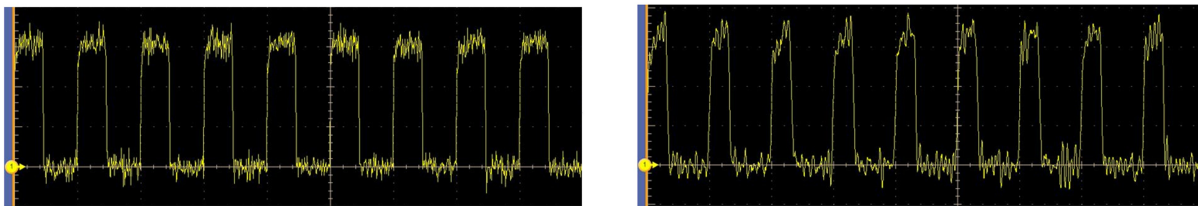
(a)With bias control system

(b) Without bias control system

图 9 通信速率 1 Gbps 偏置工作点稳定控制系统测试眼图

Fig.9 The eye diagram of working bias control system with 10 Gbps

通信速率为 1 Gbps 时,测试了偏置工作点控制系统对解调输出波形的影响.调制驱动信号为方波,偏置电压设置为 1.9 V,MZM 输出光信号功率约为 4.5 dBm.耦合器输出的光信号使用光电探测器进行解调,光电探测器的输出波形如图 10 所示.由图 10(a)可知,使用偏置工作点稳定控制系统输出的波形是占空比为 1:1 的方波,受耦合器接口损耗和探测器精度的影响,在高电平和低电平持续时间内,均发生小范围的信号抖动.由图 10(b)可知,未使用偏置工作点控制系统输出波形的占空比不对称,在高电平持续时间内出现脉冲尖峰,低电平持续时间内的信号抖动也明显增强.由于 MZM 的偏置工作点出现漂移,导致调制输出光信号的失真,造成光电探测器解调信号出现畸变.



(a) With bias control system

(b) Without bias control system

图 10 通信速率 1 Gbps 偏置工作点稳定控制系统光电探测器输出波形图

Fig.10 The wave diagram in detector of working bias control system with 10 Gbps

使用输出平均光功率的波动可以衡量偏置工作点控制系统的有效性.为了进一步评估系统的控制精度、稳定性和波动,对实验数据进行计算.表 1 中计算了 1 Mbps 和 1Gbps 通信速率下,MZM 输出平均光功率(Average)、方差(Variance)、正向和反向波动率(Fluctuation).由表 1 可知,在 1Mbps 和 1Gbps 不同的通信速率下,未使用偏置工作点控制时,系统输出平均光功率最大波动 -17% ,使用偏置工作点控制系统可以将输出平均光功率的波动控制在 $\pm 5\%$ 以内.1Mbps 通信速率下,使用偏置工作点控制比不使用偏置工作点控制的方差减少了一个数量级.

表 1 偏置点控制系统波动计算

Table1 The fluctuation of bias control system

Type	Average/dBm	Variance	Positive fluctuation/(%)	Negative fluctuation/(%)
1 Mbps without bias control	4.66	0.822	18.9	-17
1Gbps without bias control	4.75	0.097	3.79	-5.3
1Mbps with bias control	4.34	0.064	4.69	-4.2
1Gbps with bias control	4.52	0.047	2.65	-2.7

相比于谐波分析法和光功率比值法,基于平均光功率复合算法的偏置点控制系统可以将偏置点稳定在传输响应曲线的任意位置,因此可以满足不同的调制格式需求(美国 Quantum Technology 公司的 3101A 偏置点控制器只可以应用于强度调制);1 Gbps 通信速率下,输出光功率波动的方差为 0.047,正向最大波动 2.65%,反向最大波动 2.7%,波动可以控制在 $\pm 5\%$ 以内;硬件设备体积小(体积: $202 \times 90 \times 55 \text{ mm}^3$);算法简单提高了运算速度;具有显示和按键输入的友好人机接口.

综上,基于平均光功率斜率值和余切值的复合反馈控制系统的优点如表 2 所示.

表 2 多种控制方案性能比较

Table2 The performances of different bias control schemes

Control scheme	Modulation format	Bias position	Control precision	Calculation	System structure
Dither analysis	Intensity	Quad and extreme	Moderate	Complex	Complex
Optical power ratio	Intensity	Quad	Low	Simple	Complex
Complex feedback	Intensity and phase	Arbitrary	Better	Moderate	Simple

4 结论

分析和阐述了马赫-曾德尔调制器偏置工作点发生漂移时对光通信质量的影响,并在此基础上提出了一种基于平均光功率斜率值和余切值的复合偏置点控制方案.利用 Matlab 进行了理论仿真,同时搭建了基于 FPGA 的偏置工作点控制系统.实验结果表明:该偏置工作点控制系统在 1Mbps 和 1Gbps 通信速率下均可以将输出平均光功率的波动控制在 $\pm 5\%$ 之内,且眼图质量较好.相比于导频谐波控制法和光功率直接控制法,该方案具有系统结构简单、控制精度好、体积小和可靠性强的优点.该控制方案可以将偏置工作点稳定在传输响应曲线的任意位置,可广泛应用于进行强度和相位调制的外调制光通信系统.

参考文献

- [1] JIANG Hui-lin, TONG Shou-feng, ZHANG Li-zhong, *et al.* The technologies and systems of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 35-52.
姜会林,佟首峰,张立中等.空间激光通信技术与系统[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [2] ZHOU Peng-wei, LI Yan-an, GUO Yun-feng, *et al.* Mach-Zehnder modulator bias control for large modulation signal [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2015, 42(9): 0905004.
周鹏威,李延安,郭云峰,等.大调制信号马赫-曾德尔调制器偏置电压控制技术[J].中国激光,2015,42(9): 0905004.
- [3] YANG Zhi-gao. The stability working point study of integrated optics modulator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011: 1-9.
杨志高.集成光学调制器工作点稳定性研究[D].成都:电子科技大学,2011: 1-9.
- [4] KAWAKAMI H, YOSHIDA E, MIYAMOTO Y. Auto bias control technique based on asymmetric bias dithering for optical QPSK Modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 962-968.
- [5] SHI Pei-ming, SONG Yu, LI Ze-kun, *et al.* A novel frequency sextupling scheme for optical mm-wave generation utilizing an integrated dual-parallel Mach-Zehnder Modulator[J]. *Optics Communications*, 2010, 283: 3667-3672.
- [6] YANG Yong-wei. Research on optical bias control system of DSP-Based electro-optic modulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 13-18.
- [7] 杨永维.基于 DSP 的电光调制器最佳偏置点控制系统研究[D].长春:长春理工大学,2016: 13-18.
- [8] WANG Li-li, KOWALCYZK 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.
- [9] SEKINE K, HASEGAWA C. A novel bias control technique for MZ modulator with monitoring power of backward light for advanced modulation formats[C]. Conference on Optical Fiber Communication, 2007: 1-3.
- [10] PAK S C, KHURGIN J B, SHPANTZER I. Closed-loop bias control of optical quadrature modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(21): 2209-2211.
- [11] COX C, ACKERMAN E. Modulator bias control: US, 73690B1[P]. 2008-05-06.
- [12] DOTOODEH M, BEAULIEU Y, HARLEY J, *et al.* Modulator bias and optical power control of optical complex E-filed modulators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(15): 2235-2248.
- [13] TAO Jin-jing. Researches on several key technologies for high-speed coherent optical communication system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014: 32-72.
陶金晶.高速相干光通信系统中关键技术的研究[D].北京:北京邮电大学,2015: 32-72.
- [14] ZHANG Cai-xia, ZHANG Zhen-wei, XU Ben, *et al.* A novel circuit design for bias controlling of Mach-Zehnder electro-optic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, 24(8): 1461-1466.
张彩霞,张震伟,徐贲等.马赫-曾德尔电光调制器多工作点偏压控制技术[J].光电子激光,2013,24(8):1461-1466.
- [15] ZHOU Feng, JIN Xiao-feng. All-fiber graphene electro-absorption modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2117-2125.
周锋,金晓峰.全光纤结构的石墨烯电吸收调制器[J].光学精密工程,2016,24(9): 2117-2125.
- [16] GNAUCK A H, WINZER P J. Optical phase-shift-keyed transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 115-130.