

大调制信号马赫-曾德尔调制器偏置电压控制技术

周鹏威¹ 李延安² 郭云峰¹ 孙志强¹ 庄 苗¹

¹中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

²北京安伟联创科技有限公司, 北京 100081

摘要 马赫-曾德尔调制器的工作特性随温度变化等环境因素影响严重,因此需要设计专用的偏置电压控制电路。利用扰动输入和谐波探测相结合的偏置电压控制方案是一种比较好的解决方案,但传统的控制架构在面对大调制信号输入时,往往会出现锁定严重漂移的现象。首先对谐波产生的机制进行了理论建模,然后对传统的谐波检测架构进行了分析,发现大信号调制下的以往谐波分量计算公式以不再适用,必须加以改进,因此在改进谐波计算公式的基础上,提出了一种新的可用于大信号调制下的偏置点控制技术,并研制了相应的驱动电路,对电路的偏置点控制测试结果发现,提出的方案偏置点的控制精度在1°以内,可以很好地满足大调制信号输入的应用需求。

关键词 光学器件; 马赫-曾德尔调制器; 偏置电压控制; 谐波; 大调制信号

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0905004

Mach-Zehnder Modulator Bias Controller for Large Modulation Signal

Zhou Pengwei¹ Li Ting'an² Guo Yunfeng¹ Sun Zhiqiang¹ Zhuang Zhuo¹

¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²Beijing Anwei Technology Co.Ltd, Beijing 100081, China

Abstract The operating characteristic of Mach-Zehnder modulator is influenced severely by environmental factors such as temperature changing. Therefore, a bias controller is required to stabilize the operating point automatically. Applying a dither signal and detecting its harmonic wave to measure the position of operating point is a useful method. However, when the amplitude of modulation signal is large, the prior art method fails to lock the bias point. The harmonic wave resulting from modulation transfer function has been simulated and analyzed. It is shown that previous harmonic wave calculation formulate will not be suitable when a large modulation signal inputs. Therefore, we have modified the calculation method and proposed a bias controller with new architecture to maintain the working point in large modulation signal condition. At last, we have developed corresponding circuit, and test result shows that our method can lock the working point within accuracy of 1°, which is quite useful in large modulation signal application.

Key words optical devices; Mach-Zehnder modulator; bias controller; harmonic wave; large modulation signal

OCIS codes 130.4110; 230.2090; 250.4110

1 引 言

光信号调制技术是现代光通信和光纤传感技术发展的基础,为了满足高速调制的需求,基于马赫-曾德尔调制器(MZM)的外调制方案近年来得到了广泛的应用。但由于温度、应力和外界电场等环境因素影响, MZM的传输函数曲线会发生漂移,这会影响调制信号的质量,导致传输系统误码率上升。为了保证 MZM的直流偏置点稳定性,提高 MZM自身稳定性和加入反馈控制回路是两种常用的方案^[1]。但提高 MZM稳定性需要对工艺、材料都加以改进,难度高、成本大;采用反馈控制是常用的偏置点稳定方案,有多种控制方案^[2-3]。采用低频扰动输入,提取谐波分量来测量偏置点位置的方案得到了广泛的关注,很多学者对这种方案从理论分析方面做了深入研究^[4],在工程上如英国 Photonic Systems、法国 Photoline 和美国 YYLabs 等公司都有相关

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

作者简介: 周鹏威(1984—),男,博士,讲师,主要从事光电探测、光纤通信方面的研究。E-mail: zhoupw@cjlu.edu.cn

产品面世。然而在实际应用过程中,发现以往的低频扰动理论分析都是在不加入调制信号或者调制信号很小的前提下进行的^[5],利用这种方案设计的控制回路在面对大信号输入时出现了最佳工作点锁定失效的现象,而大信号调制等情况在通信领域的二进制非归零码(OOK-NRZ)、差分相移键控(DPSK)等编码方式中非常常见,因此需要深入研究。本文将重新分析调制信号对谐波分量的影响,改进回路结构,对大调制信号输入条件下的偏置点控制具有重要的意义。

2 MZM 控制原理分析

MZM 基于马赫-曾德尔干涉原理,如图 1 所示。输入光由第一个 Y 分支分成两路光强和相位相等的光束,进入干涉仪上下两臂,干涉仪两臂上的外加电场引起两束光的相位差,在第二个 Y 分支处干涉后合成输出,出射光强度受两臂外加电场差值调制。假设 MZM 加载的电压为 V (由偏置电压和调制电压组成),则调制器输出的光强可以表示为

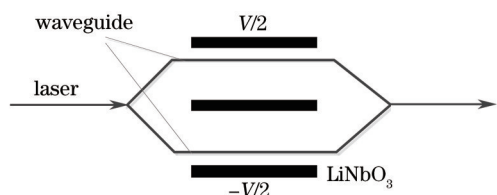
$$P = \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{V_{\pi}} V + \varphi \right) \right]. \quad (1)$$


图 1 MZM 内部结构

Fig.1 Internal structure of MZM

(1)式就是 MZM 调制器的传输函数,近似一条余弦曲线。其中, P_{in} 是输入 MZM 内部的光功率; V_{π} 表示 MZM 的半波电压,该值和 MZM 的自身特性有关,可以认为是定值; φ 为 MZM 的初始相位,该值容易受到环境的影响,从而表现出传递函数曲线的整体漂移。如图 2 所示,假设 MZM 的直流偏置工作点设置在 Quad+ 点,当调制电输入信号以 Quad+ 点为中心变化时,被调制输出的光信号也能反映按照和调制信号对应的规律变化,实现信息的加载。但当传输函数曲线的相位受环境的变化产生漂移时,假设加载的直流偏置电压不变,则由于调制信号没有围绕最佳工作点变化,会使得输出信号的对比度下降,也即信号传输的误码率上升。为了解决该问题,常采用反馈控制电路来监测直流偏置点的偏移,然后实时改变输入到调制器的直流电压,实现最佳工作点锁定。

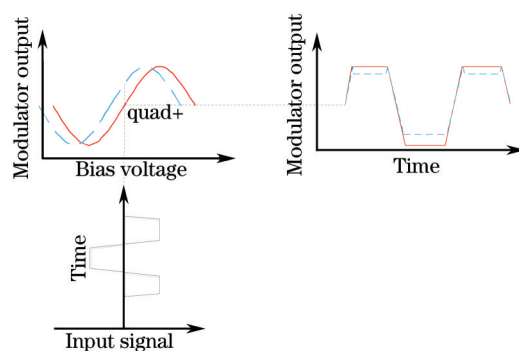


图 2 MZM 工作点漂移对调制信号的影响

Fig.2 Modulation distortion due to modulator transfer function shift

常用的反馈控制电路通常基于抖动信号的方式,如图 3 所示。首先,一个低频的扰动信号和直流电压相加后输入到 MZM 的直流偏置口。当 MZM 稳定在调制曲线中间线性 Quad 点时,不考虑调制信号输入时,调制器出射光信号中抖动信号基波频率分量幅值为 0;当 MZM 稳定在调制曲线最低/最高点时,出射光信号中抖动信号二次谐波频率分量为 0。即反馈电路通过闭环控制,使抖动基波频率分量为 0,使得工作点稳定在 Quad 点;通过闭环控制,使抖动二次谐波分量为 0,把工作点锁定在最低/最高点。

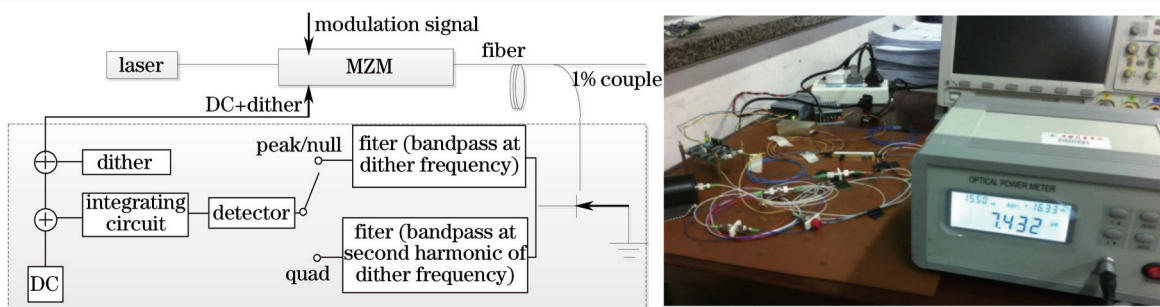


图3 基于抖动信号的偏置点控制原理

Fig.3 Modulator bias controller based on dither signal

利用该原理,设计制作了相关的电路,并完成了相应的测试,发现在不加调制信号、光脉冲调制或调制信号峰峰值小于 $0.5V_{\pi}$ 时,电路都能够很好地锁定。表1给出了不加载调制信号下,不同工作点的绝对光功率漂移情况,可见电路具有很好的稳定性,且能够达到 27 dB 以上的消光比。

表1 偏压控制电路的功率稳定性

Table 1 Power stability of designed modulator bias controller

Bias point	Power @ 0 min	Power shift @ 5 min
Null	7.432 μ w	0.311 μ w
Peak	4.365 mw	0.111 mw
Quad+	2.164 mw	0.072 mw
Quad-	2.174 mw	0.046 mw

但当调制信号峰峰值为 V_{π} 时,控制电路出现了明显的失锁现象。以 Quad+点锁定为例,当调制输入信号是占空比为 30%,峰峰值为 V_{π} 的方波信号时,如果锁定良好,那么调制器输出的光信号应该是具有很高消光比的方波信号。但实际上,把调制器输出的光信号通过高速光电探测器转换为电信号,在示波器上观察到的波形如图4所示,通过测量上下信号电平,可计算其对应的消光比为: $10 \log_{10}(163 \text{ mV}/75 \text{ mV})=3 \text{ dB}$ 。可见,基于上述框图的偏压控制电路在面对大信号调制方式时,没有实现无法稳定的工作。因此,需要对该现象进行深入的分析。

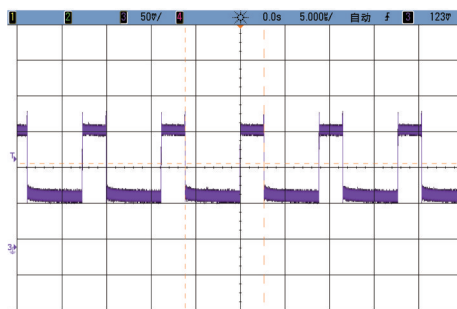


图4 大信号调制下的偏置点失锁

Fig.4 Bias control fail at Quad with large modulation signal

3 抖动信号谐波分量计算

假设加入的扰动信号值 $V_d(t) = \frac{V_d V_{\pi}}{\pi} \cos \omega_d t$, 调制信号输入为 $V_m(t)$, 偏置电压大小为 V_b , 则根据 MZM 传输函数公式,有调制器输出光功率为

$$P = \frac{1}{2} P_{in} \left\{ 1 + \cos \left[V_d \cos \omega_d t + \frac{V_m(t) + V_b}{V_{\pi}} \pi + \varphi \right] \right\}. \quad (2)$$

当不考虑外加调制信号,即 $V_m(t)$ 为 0 时,令 $\varphi_1 = \frac{V_b}{V_{\pi}} \pi + \varphi$, 可把上述公式用泰勒级数展开并等效成:

$$P = \frac{1}{2} P_{in} [1 + \cos(V_d \cos \omega_d t + \varphi_i)] = \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \cos \varphi_i \left(1 - \frac{1}{4} V_d^2 \right) - \left(V_d - \frac{1}{12} V_d^3 \right) \sin \varphi_i \cos \omega_d t + \frac{1}{4} V_d^2 \cos \varphi_i \cos 2\omega_d t + \dots \right] \quad (3)$$

可见输出光信号波形中,与抖动信号的一次谐波频率对应分量和二次谐波分量分别为:

$$V_{1st} = -\frac{P_{in}}{2} \left(V_d - \frac{1}{12} V_d^3 \right) \sin \varphi_i \cos \omega_d t, \quad V_{2nd} = \frac{1}{8} V_d^2 P_{in} \cos \varphi_i \cos 2\omega_d t. \quad (4)$$

经过分析,当 $\varphi_i = 0, \pi$ 时, $V_{1st} = 0, V_{2nd} = \max$, 即把工作点在相位为 $0, \pi$, 即传输函数曲线的最高或最低点时,抖动信号的基波频率分量为 0,二次谐波分量幅值最大;当 $\varphi_i = \pm \frac{\pi}{2}$ 时, $V_{1st} = \max, V_{2nd} = 0$, 即把工作点定在相位为 $\pm \frac{\pi}{2}$, 即传输函数曲线的中间线性点时,抖动信号的基波频率分量最大,二次谐波分量幅值为 0。图 3 所示原理的控制电路,就是根据这个理论,实现了工作点的控制。

但是,回顾上述的推导过程,可以看出,(4)式是在不考虑外加调制信号的前提下满足的,当有外加调制信号时,特别是当外加调制信号比较大时,该公式需要重新分析。以把控制点设置在 Quad+ 为例,此时, $\varphi_i = \frac{\pi}{2}$ 。如果加入的 $V_m(t)$ 信号是一个峰峰值为 V_π 的方波信号,则(2)式需要变成:

$$P = \begin{cases} \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \cos \left(V_d \cos \omega_d t + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdots V_m(t) = \frac{\pi}{2} \\ \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \cos \left(V_d \cos \omega_d t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdots V_m(t) = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

从(2)式中可以发现,在控制点稳定在 Quad+ 点,方波信号是正半周期时,调制器此时工作的相位为 $\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} = \pi$, 刚好等效于无调制信号输入情况下,工作点控制在传输函数曲线的最高点的情况;当方波信号是负半周期时,此时工作点的相位为 $\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = 0$, 刚好等效于无调制信号输入时,工作点控制在传输函数曲线最低点的情况。在这两种情况下,调制器输出信号的抖动信号基波频率分量为 0,二次谐波分量幅值最大。而图 3 所示原理的控制电路,是根据调制器输出光信号中的抖动信号二次谐波分量是否为 0,来确定是否稳定在 Quad+ 点时。而当输入信号峰峰值为 V_π 的方波信号时,即使实际上 MZM 已偏置在 Quad+ 点,但光信号输出的二次谐波分量其实为最大,并不为 0,因此图 3 所示的偏置电路方案会认为 Quad+ 点锁定错误,导致锁定失败。图 4 所示的方波无法锁定就来自于这个原因。

4 方案改进和研究结果

为了解决上述问题,提出了一种新的结构,如图 5 所示。该电路方案主要用于 Quad 点稳定,根据输入调制电压的大小来选择不同的频率分量,来判断 MZM 调制器的稳定状态。

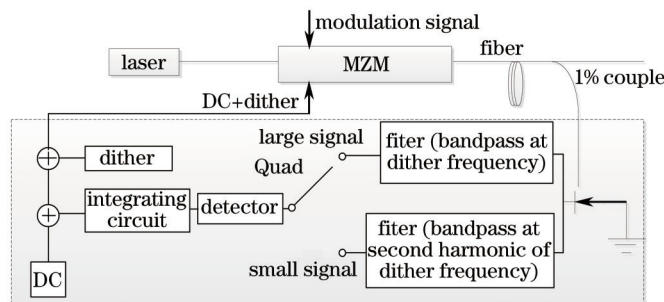


图 5 基于抖动信号的偏置点控制改进方案

Fig.5 Improved modulator bias controller based on dither signal

对比图 3 中 Quad 点的稳定方案,可以发现,改进的电路中面对较小的调制信号输入时,还是判断抖动信号频率的二次谐波分量是否为 0,来判断是否稳定在 Quad 点;但面对较大的调制信号输入时,改进方案转而选择判断抖动信号频率的基波分量是否为零,来判断偏置是否稳定在 Quad 点。根据该方案重新设计了电路,图 6 给出了稳定在 Quad 点时,调制信号是峰峰值为 V_π 的占空比 30% 的信号输入时的波形。通过测量上下电平,计算得到该方波信号对应的消光比为: $10 \log_{10}(195 \text{ mV}/0.3 \text{ mV})=28 \text{ dB}$ 。通过分析,该电路 Quad 点的

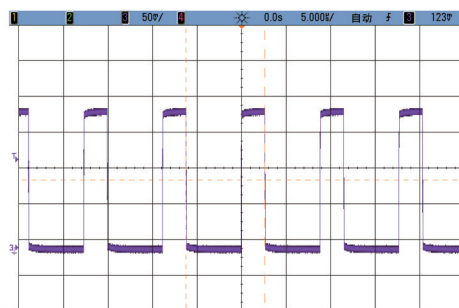


图6 大信号调制的Quad点稳定

Fig.6 Working point stabilized at Quad with large modulation signal

稳定精度在 1° 以内,而且改动成本小,实现方便,对实际工程应用有很好的指导意义。

5 结 论

根据传统的基于抖动信号输入的MZM工作点控制方法,研制成功了MZM偏压控制电路,达到了27 dB以上的消光比。但通过实验发现,传统的抖动控制方案在面对大调制信号输入时,存在无法锁定的情况。根据分析发现,传统方案忽视了大信号调制与小信号调制下,根据谐波分量进行工作点稳定判断的判决条件出现了反转,因此重新提出了新的偏压控制方案,并用该方案成功的将大信号调制下的30%占空比方波稳定在了Quad点。实验证明了该方案能够有效提高大信号输入状态下的偏置点控制精度,对实际应用有很好的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Fan Liwen, Meng Zhou, Sun Qiao, *et al.*. Operating points control for Mach-Zehnder electro-optic modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905001.
樊理文, 孟洲, 孙乔, 等. 马赫-曾德尔电光调制器工作点自动控制[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905001.
- 2 Wen He, Ge Yihong, Jiang Huan, *et al.*. Monitoring bias offset drift of Mach-Zehnder modulator based on coherent hybrid scheme [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 2035-2041.
闻和, 葛逸宏, 姜欢, 等. 基于相干自混频原理的马赫-曾德尔调制器偏置点的监测[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2035-2041.
- 3 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, 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.
- 4 Feng Zhenhua, Fu Songnian, Tang Ming, *et al.*. Investigation on agile bias control technique for arbitrary-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206002.
冯振华, 付松年, 唐明, 等. LiNbO3马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206002.
- 5 Zou Hui, Hu Yi, Tian Jun, *et al.*. MZ external modulator optimum bias point stabilization control[J]. Optical Communications Research, 2008, 34(3): 30-32.
邹晖, 胡毅, 田军, 等. MZ外调制器最佳偏置点稳定控制[J]. 光通信研究, 2008, 34(3): 30-32.

栏目编辑: 韩峰