

LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器任意偏置工作点锁定技术的研究

冯振华 付松年 唐 明 沈 平 刘德明

(华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 在传统 LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器偏置控制理论的基础上, 提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)算法和低频小信号扰动的谐波响应反馈控制方法, 实现了一种与调制器输入光功率及插入损耗无关、任意工作点可偏置并锁定的精密光电控制系统。利用比例-积分-微分(PID)控制方法, 实现了任意工作点偏移小于 0.5° 的控制精度, 实验结果亦证明该控制系统能够实现强度调制器任意工作点的偏置及锁定。这些结果对于将 LiNbO₃ 强度调制器稳定在最佳工作点并实现高速长距光纤通信系统是很有帮助的。

关键词 光通信; 微波光子学; 强度调制器; 偏置锁定

中图分类号 TN914 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1206002

Investigation on Agile Bias Control Technique for Arbitrary-Point Locking in Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulators

Feng Zhenhua Fu Songnian Tang Ming Shen Ping Liu Deming

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract After comparing the traditional LiNbO₃ Mach-Zehnder electro-optic modulator bias control techniques, a novel bias control method based on fast Fourier transformation (FFT) algorithm and the harmonic response feedback of a low frequency dither tone is proposed. Using this technique, a precise optoelectronics bias control system is realized to lock the modulator at an arbitrary point within its transfer function. This bias control technique is found to be independent on the optical input power and the insertion loss of modulator. Moreover, the proportion integration differentiation (PID) control method is used to optimize parameters and achieve a locking accuracy better than 0.5°. In addition, this bias control system is also verified experimentally to set and lock the modulator at an arbitrary bias point. Those results are helpful to stabilize the LiNbO₃ Mach-Zehnder modulator at the optimal operating point and achieve an ultra-high speed, long haul optical fiber communication system.

Key words optical communications; microwave photonics; intensity modulator; bias control

OCIS codes 060.4080; 060.5625; 350.4010; 250.4110

1 引 言

随着数据业务的迅猛发展, 对骨干传输网提出了更高的要求, 促使光纤通信系统向着更高速率、更长距离和更大容量发展。LiNbO₃ 马赫-曾德尔调制器(MZM)作为光纤通信系统的关键器件, 通过调

制激光某一参量(幅度或相位)随输入高速微波信号改变, 将电信号加载到激光载波上使之变成携带有用信息的光信号^[1,2]。目前由于 LiNbO₃ MZM 调制器工作性能稳定、调制速率高、线性度好、工艺技术成熟等优势, 已经广泛应用在高速数字光通信系统、

收稿日期: 2012-05-28; **收到修改稿日期**: 2012-07-19

基金项目: 国家 863 计划(2012AA011301)和国家 973 计划(2010CB328302)资助课题。

作者简介: 冯振华(1990—), 男, 本科生, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: huazafzh@163.com

导师简介: 付松年(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: songnian@mail.hust.edu.cn
(通信联系人)

微波光子链路、分布式光纤传感系统及光开关交换矩阵中。LiNbO₃ MZM 调制器使用时,需要给调制器加载一个偏置电压来保证其信号调制时可以工作在其传输函数合适的工作点上,从而优化调制信号、提高系统性能。例如正交点一般用于非归零(NRZ)编码调制,而最小功率传输点则用于产生相位调制信号。在分布式光纤布里渊传感系统中,必须锁定调制器的偏置电压以保持脉冲能量均匀、得到恒定的信噪比^[3]。在一些微波光子学应用中,为了优化射频(RF)增益、减小噪声指数、增大无毛刺动态范围(SFDR),需要偏置调制器于其传输函数曲线上的任意点^[4,5]。长时间工作时,一些内外界因素例如环境温度、外电场、应力等以及器件本身的缺陷都会对 LiNbO₃ MZM 调制器的稳定性产生影响,从而使器件偏置工作点发生漂移^[6],最终造成调制信号质量变差、眼图劣化、传输系统误码率上升,因此有必要监测调制器的偏置工作点漂移并予以锁定。

为了减小调制器工作点漂移对通信系统性能的影响,人们开展了大量的研究工作,提出了各种调制器偏置点控制方法。例如选择合适的半导体材料,减少器件中各种杂质离子的含量,并采用特定的器件制作工艺优化器件的结构,从而有效抑制器件的工作点漂移^[6]。但此方法涉及 MZM 的制作工艺,过程复杂且成本高昂。此外,基于调制器输入和输出恒定的光功率比对其工作点漂移进行反馈控制也是一种常见的偏置控制手段^[7]。然而,反馈信号依赖于调制器输入光功率的波动和光路损耗的变化,现场应用中系统损耗会因为连接器的可重复性和光纤路由选择的不同而变化,造成工作点偏置控制精度较差。目前工程上常采用低频扰动信号的反馈控制方法来自动控制调制器偏置点,例如,在正交偏置点,低频扰动信号的二阶谐波响应将会减小到 0,而在最小偏置点处,基频响应将消失^[8]。但对于调制器传输函数上任意偏置点的锁定,这种技术将无能为力。最近,科研人员提出利用模拟信号处理手段分离各阶谐波分量,实现调制器任意工作点的偏置锁定,但其控制系统比较复杂,理论分析不全面^[9]。综上所述,目前常见的抑制调制器工作点漂移的方

法在实际应用中都存在一定的局限性。为此,本文提出了一种反馈信号与输入光功率无关、精度高并可实现调制器传输函数上任意工作点的偏置锁定方法。

2 光电控制系统理论模型

考虑理想调制器的传输函数可表示为

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_d}{2} [1 + \cos(\phi_{DC} + \phi_{RF})], \quad (1)$$

式中 T_d 为调制器的插入损耗, $\phi_{DC} = \pi \frac{V}{V_{\pi,DC}}$ 是调制器的直流(DC)偏压输入端所加电压 V 对应的偏置相位, $V_{\pi,DC}$ 为调制器的直流半波电压; $\phi_{RF} = \pi \frac{V_{RF}}{V_{\pi,RF}}$ 是射频信号调制引起的相移, $V_{\pi,RF}$ 为调制器射频信号半波电压。当 MZM 上不加射频信号时,在其直流偏压输入端加入一个恒定的直流电压和一个低频(LF)扰动信号,如图 1 所示。假设所加直流电压为 V ,低频扰动信号是频率为 ω ,幅度为 V_{LF} 的正弦信号,而此时 $\phi_{RF} = 0$,因此 $\phi_{DC} = \phi_0 + \phi_{LF}$,其中 $\phi_0 = \pi \frac{V_{DC}}{V_{\pi,DC}}$ 为直流偏置相移, $\phi_{LF} = \frac{\pi V_{LF} \sin(\omega t)}{V_{\pi,DC}}$ 为低频扰动信号引起的相移。从而调制器的输入光功率与输出光功率之间的关系为

$$P_{out} = \frac{T_d P_{in}}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\phi_0 + \frac{\pi V_{LF}}{V_{\pi,DC}} \sin(\omega t) \right] \right\}. \quad (2)$$

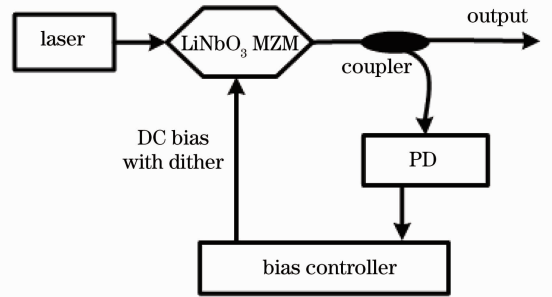


图 1 基于低频小信号扰动的 LiNbO₃ MZM 偏置控制原理图

Fig. 1 Schematic scheme of LiNbO₃ MZM bias control using a dither tone

为简化表达式,令 $\alpha = \frac{\pi V_{LF}}{V_{\pi,DC}}$,对(2)式用三角函数展开得到

$$P_{out} = \frac{T_d P_{in}}{2} \{ 1 + \cos \phi_0 \cos[\alpha \sin(\omega t)] - \sin \phi_0 \sin[\alpha \sin(\omega t)] \}. \quad (3)$$

在小扰动条件下 $\alpha < 1$,利用泰勒级数展开至四阶

$$P_{\text{out}} = \frac{T_d P_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 + \cos \phi_0 \left[1 - \frac{\alpha^2 \sin^2(\omega t)}{2} + \frac{\alpha^4 \sin^4(\omega t)}{24} \right] - \sin \phi_0 \left[\alpha \sin(\omega t) - \frac{\alpha^3 \sin^3(\omega t)}{6} \right] \right\}, \quad (4)$$

进一步整理得

$$P_{\text{out}} = \frac{T_d P_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 + \cos \phi_0 \left[1 - \frac{\alpha^2}{4} + \frac{\alpha^4}{64} + \left(\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^4}{48} \right) \cos(2\omega t) + \frac{\alpha^4}{92} \cos(4\omega t) \right] - \sin \phi_0 \left[\left(\alpha - \frac{\alpha^3}{8} \right) \sin(\omega t) + \frac{\alpha^3}{24} \sin(3\omega t) \right] \right\}. \quad (5)$$

若扰动信号的幅度 V_{LF} 为 0.5 V, 由于 $\alpha^5 = 0.001$, 5 阶以上分量已经相当微弱, 可以忽略不计。由于调制器 3 个常用工作点 (quadrature 点, null 点和 max 点) 对应的直流偏置相位角分别为 90° , 180° 和 0° , (4) 式中相应的正弦或余弦函数总有一项为 0, 因此 (5) 式由于泰勒级数展开导致的截断误差也相应减小。最终, 经光电转换后的一阶和二阶谐波分量幅度及其比值为

$$I_{1\text{st}} = \eta \frac{T_d P_{\text{in}}}{2} \sin \phi_0 \left(\alpha - \frac{\alpha^3}{8} \right),$$

$$I_{2\text{nd}} = \eta \frac{T_d P_{\text{in}}}{2} \cos \phi_0 \left(\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^4}{48} \right),$$

$$R = \frac{I_{2\text{nd}}}{I_{1\text{st}}} = \frac{\cos \phi_0 \left(\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\alpha^4}{48} \right)}{\sin \phi_0 \left(\alpha - \frac{\alpha^3}{8} \right)} = \cot \phi_0 \frac{\left(\frac{\alpha}{4} - \frac{\alpha^3}{48} \right)}{\left(1 - \frac{\alpha^2}{8} \right)}, \quad (6)$$

式中 η 为光电探测器 (PD) 的响应度, 单位为 A/W。由上式可知, 各阶谐波的幅度均与输入光功率和调制光路的插入损耗有关, 但基波和二次谐波的比值则与输入光功率以及光路的插入损耗无关。假定光电探测器响应度为 0.9 A/W, 正弦扰动信号的幅度为 0.5 V, 频率为 1 kHz, 调制器的直流半波电压为 $V_{\pi, \text{DC}} = 6$ V, MZM 插入损耗为 2.8 dB, 输入光功率为 10 dBm。扰动信号经电光调制后的基波、二次谐波响应的幅度 $I_{1\text{st}}$ 、 $I_{2\text{nd}}$ 及其比例 R 与 MZM 直流偏置相移 ϕ_0 之间的函数关系如图 2 所示。

可以看出, 二阶谐波和基波的幅度比值 R 是直流偏置相移 ϕ_0 的余切函数, 单调递减, 对相位角变化比较敏感, 可以选择作为可靠、精确的自动偏置控制系统的反馈信号。只要在调制器传输函数上设定一个偏置点 (唯一对应一个比值 R_0), 通过监测调制器输出的低频振动信号谐波响应的实际比值 R' 并与设定值 R_0 比较, 得到误差信号。只要误差不为 0, 偏置控制器就不断进行反馈控制减小误差, 直到误差消除并锁定工作点。这样就可以实现调制器任意工作点偏置的控制和锁定。理论上亦可以采用三、四次谐波分量的比值来实现调制器的偏置点反

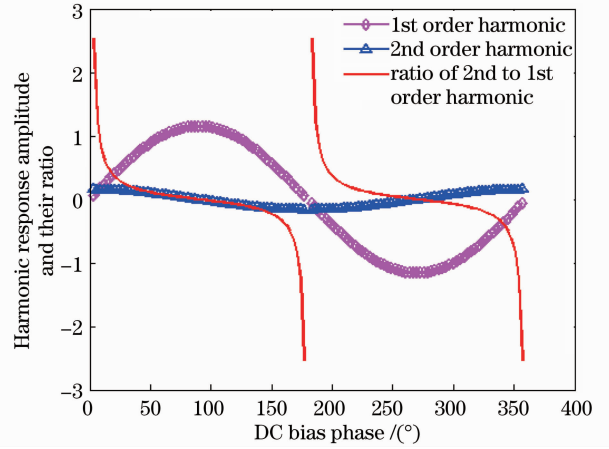


图 2 基波幅度、二次谐波幅度及其比值与直流偏置相位关系

Fig. 2 Dependence of the first-order and second-order harmonic responses after optoelectrical conversion and their ratio on DC bias phase

馈控制, 但高阶谐波分量较微弱, 不利于信号提取检测, 因此本方案采用基波和二次谐波比值作为调制器偏置控制系统的反馈信号。另一方面, 若直流偏置相位角从 30° 变化到 330° , 基波和二次谐波的比值只在 ± 0.2 数值区间变化。由于反馈信号随直流偏置相位角单调变化, 通过高精度模数转换和数字信号处理技术, 能够实现调制器任意工作点的偏置锁定功能。

3 结果与讨论

在理论分析的基础上, 设计了 LiNbO₃ MZM 任意偏置工作点的锁定系统, 如图 3 所示。在调制器直流偏压上叠加一个低频扰动信号, 再将 MZM 输出端的二次谐波信号和基波信号的比值作为反馈参数以实现自动偏置电压的控制和锁定。首先用蒙特卡罗方法模拟了调制器工作点漂移现象, 所有工作点的漂移问题给调制器带来的影响可理论归结为在调制器的传输函数中引入一个随机的相位差, 即在 (2) 式中直流偏置相移 ϕ_0 上附加了一个时变的相位 δ 。 δ 称为调制器的随机相移, 它描述了调制器工

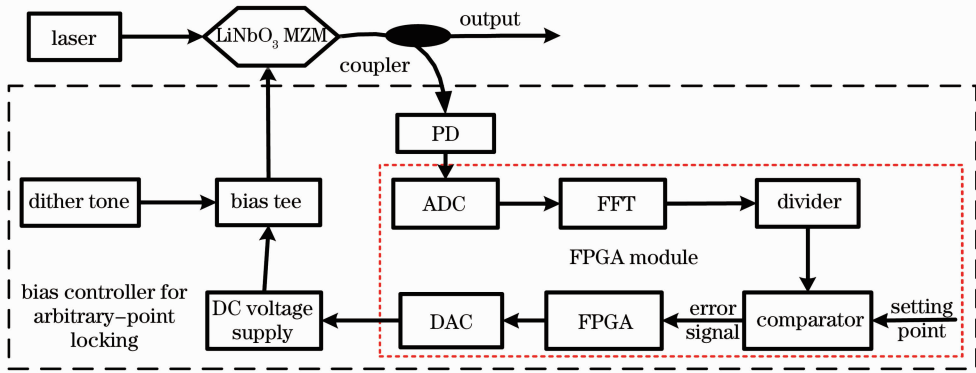


图 3 调制器任意工作点偏置控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of arbitrary-point locking system for MZM bias control

作点漂移的物理本质。光电转换后,工作点漂移后的电信号经过模数转换,利用现场可编程门阵列(FPGA)完成快速傅里叶变换(FFT),提取各谐波频率分量的幅度。在控制单元中,采用比例-积分-微分(PID)控制算法,最终达到锁定偏置工作点的目的。利用调制器工作点漂移的模型及数字信号处理算法,通过 Matlab 软件仿真调制器在不同工作点处的反馈控制情况。仿真过程中假设调制器半波电压 $V_{\pi,DC} = 6\text{ V}$,低频扰动信号幅度为 0.5 V ,频率为 1 kHz ,模数转换器(ADC)采样频率为 8 kHz ,FFT 长度为 512 点。由图 4(a)~(c)可以看到,在调制

器随机漂移影响下,其设定的工作点都会随时间变化,从而影响调制器输出光功率的稳定性和调制信号质量。采用基于 FFT 算法和低频小信号扰动谐波响应反馈的自动偏置控制方案,在调制器 3 个常用偏置点都可以得到优异的稳定效果。当 MZM 的随机相位漂移达到 $\pm 15^\circ$ 时,经偏置控制后调制器的工作点对应的相位偏差小于 0.3° ,考虑到 MZM 调制器的半波电压 $V_{\pi,DC} = 6\text{ V}$,换算后,对应的直流偏置电压的控制精度优于 10 mV 。事实上,这种方案不仅可以在 3 个常用的偏置点处起到良好的控制作用,对调制器传输函数曲线上的任意点的偏置都可以

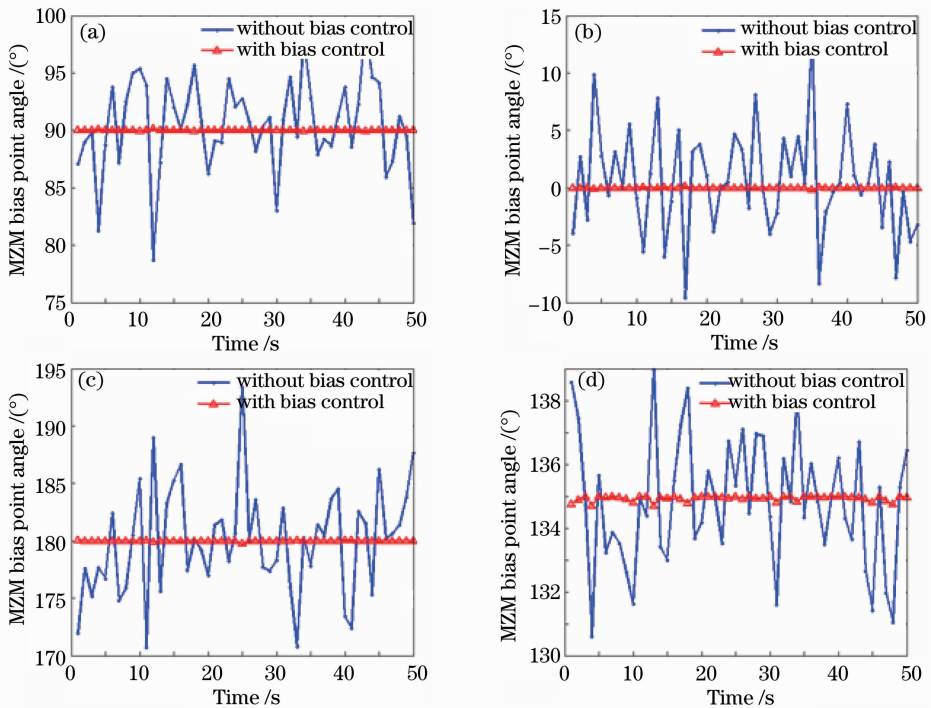
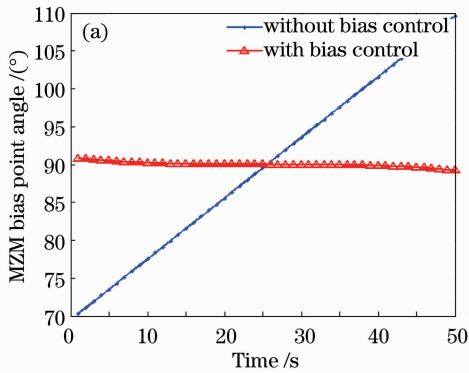


图 4 调制器在不同工作点处偏置控制效果仿真结果。(a) Quadrature 点; (b) max 点; (c) null 点; (d) 任意偏置点 (135°)

Fig. 4 Simulation results for MZM bias control at different operating points. (a) Quadrature point; (b) maximum point; (c) null point; (d) arbitrary point (135°)

控制并锁定,如图 4(d)所示,在 135°工作点处偏置控制误差小于 0.5°。理论仿真可以得出以下结论: 1) 当强度调制器的相位漂移线性增加的时候,经反馈控制后仍然可以将调制器锁定于预设工作点,如图 5(a)所示。但是,当 MZM 工作点漂移过大时(超过±20°),该方法很难将调制器锁定于预设工作点。由于整个偏置控制系统是个非线性控制系统,当 MZM 工作点相位漂移过大时,检测到的误差信号将导致偏置控制算法的精度下降,如图 5(b)所示。2) 优化输入扰动信号的相关参数,如扰动频率



和扰动幅度,可减小控制偏差、提高控制精度,特别是对于一些非常用工作点(如 45°、135°)处偏置的锁定。例如当低频扰动信号的幅度取为 0.8 V,扰动频率为 1 kHz 时,调制器任意工作点反馈控制精度较高。3) 输入扰动信号参数固定时,非常用点的偏置控制精度要低于 3 个常用工作点(quadrature 点, null 点和 max 点)的偏置控制精度。因为在任意点处,理论推导中只取了四阶泰勒近似,引入的截断误差使系统的控制精度降低。

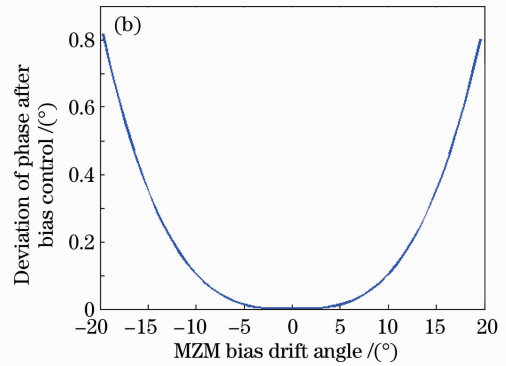


图 5 调制器偏置反馈控制的性能极限。(a) Quadrature 点漂移幅度为±20°时偏置控制; (b) 调制器偏置工作点控制精度与偏置漂移幅度的关系曲线

Fig. 5 Simulation results for performance limitation of MZM bias control. (a) Quadrature point in case of the drift amplitude varying from -20° to $+20^\circ$; (b) bias control resolution as a function of the phase drift amplitude

在理论仿真的基础上,通过实验证实了该方案的可行性。实验中使用的调制器是 Photline 公司的 40 Gb/s 强度调制器(MX-LN-40),激光器的输出波长为 1547.476 nm,低频扰动信号的幅度为 0.8 V,频率为 1 kHz(仿真优化的结果),耦合器分光比为 95:5,探测器的响应度为 40 mA/W,数模、模数转换分别采用 Analog Devices 公司的 14 位精度的模数转换芯片(AD9248,采样速率达 65 MS/s)和 14 位精度的数模

转换芯片(AD9767,转换速率为 125 MS/s)。核心控制器选择了 Altera 公司的 Cyclone IV E 系列的 FPGA(EP4CE115F29C7),它具有强大的逻辑控制能力和数据处理性能。首先测量了 MX-LN-40 调制器的传输函数,如图 6(a)所示,可以看到其半波电压约为 5.8 V,调制消光比大于 30 dB。然后选择偏置在 MX-LN-40 调制器传输函数的 quadrature 工作点,并连续监测调制器的偏压数据,经换算后可

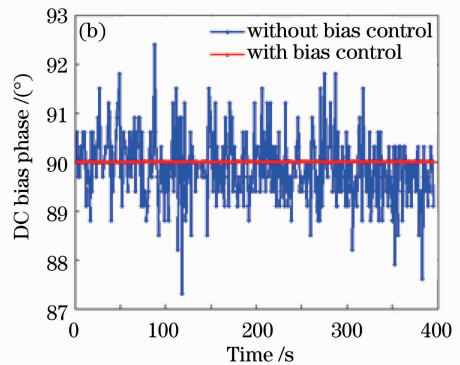
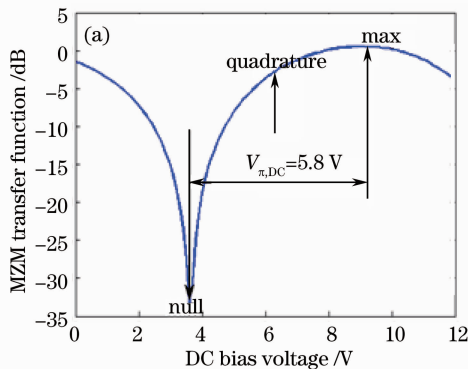


图 6 MX-LN-40 MZM 的实验结果。(a) 传输函数曲线; (b) quadrature 点处直流偏置漂移曲线及偏置锁定结果

Fig. 6 Experimental results with MX-LN-40 MZM. (a) Transfer function; (b) bias fluctuations at quadrature point and the experimental results of bias control

以得到 MX-LN-40 调制器对应的相位漂移。发现调制器工作点的最佳偏置电压确实是随时间变化的,并且这种变化是缓慢的,幅度也较小,如图 6(b)所示。利用所设计的偏置锁定控制系统,实现了调制器工作点(quadrature 点)的偏置和锁定。如果定义调制器偏置控制精度为经偏置控制后的工作点对应的相位与所设定的工作点所对应的相位差值绝对值的最大值,则本方法在调制器的 quadrature 工作点可以获得优于 0.005° 的控制精度。当扰动信号参数确定时,调制器不同工作点的偏置控制精度是不一样的。在 3 个常用工作点(quadrature 点, max 点, null 点),实验上得到优于 0.01° 的控制精度;而在其他工作点,只能得到优于 0.5° 的控制精度,这一结论与理论仿真结果相符。因此,文中所提出的基于 FFT 算法和低频小信号抖动谐波响应的调制器工作点控制方案是实际可行的。

4 结 论

分析并比较了传统的调制器偏置控制原理,并在此基础上提出了一种新的基于 FFT 算法和低频小信号扰动谐波响应的调制器偏置控制方案。理论分析和实验结果证明,该反馈控制方法可实现调制器传输函数任意工作点的偏置控制和锁定,并且这种控制方法与输入光功率和光路损耗无关,控制偏差小于 0.5° ,当调制器的半波电压为 6 V 时,对应直流偏压误差小于 20 mV。这种高精度调制器自动偏置控制系统可广泛用于高速光通信传输系统、微波光子学或分布式光纤传感系统。

参 考 文 献

- 1 Cai Borong, Tan Zhifei, Sun Shouyao. Integrated Optics [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1990
蔡伯荣, 谭志飞, 孙守瑶. 集成光学[M]. 成都:电子科技大学出版社, 1990
- 2 Zhao Cezhou. Semiconductor Guided-Wave Optical Devices Theory and Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998
赵策洲. 半导体导波光学器件理论及技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998
- 3 Wang Xiao, Zhang Xueliang, Hu Zhangliang *et al.*. Experimental research on interferometric fiber-optic sensing system with polarization diversity receiver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1566~1570
王 潇, 张学亮, 胡正良 等. 干涉型光纤传感系统偏振分集接收实验研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1566~1570
- 4 Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulators [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
- 5 E. I. Ackerman, W. K. Burns, G. E. Betts *et al.*. RF-over-fiber links with very low noise figure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(15): 2441~2448
- 6 J. P. Salvestrini, L. Guilbert, M. Fontana *et al.*. Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based Mach-Zehnder modulators[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(10): 1522~1534
- 7 F. Heismann, S. K. Korotky, J. J. Veselka. Lithium Niobate Integrated Optics: Selected Contemporary Devices and System Applications [M]. New York: Academic, 1997
- 8 E. Ackerman, C. Cox. Trade-offs between the noise figure and dynamic range of an analog optical link [C]. Proc. Photonic Systems for Antenna Applications Conf., 2000. 18~23
- 9 L. L. Wang, Tony Kowalczyk. A versatile bias control technique for any-point locking in lithium niobate Mach-Zehnder modulators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(11): 1703~1706

栏目编辑: 王晓球