

文章编号: 1007-6654(2014)02-0167-05

铌酸锂马赫-曾德尔调制器偏置工作点的一种锁定方法

王少锋, 王旭阳, 白增亮, 李永民[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 本文提出了一种锁定铌酸锂马赫-曾德尔调制器(MZM)偏置工作点的方法, 通过引入一个特殊的测试电压和校准马赫-曾德尔调制器的最大输出光强, 反馈信号受输入光功率的波动和探测器的暗噪声影响很小, 偏置锁定精度可以达到 $\pm 0.05^\circ$ (标准偏差)。这种方法可以锁定铌酸锂马赫-曾德尔调制器传递函数上的任意工作点, 且不需要加入额外的扰动信号, 可以应用于连续变量量子密钥分发等领域。

关键词: 连续变量量子密钥分发; 铌酸锂马赫-曾德尔调制器; 偏置控制

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20142002.0167

0 引言

铌酸锂马赫-曾德尔调制器(MZM)被广泛应用于高速光学通信系统中, 它具有驱动电压低, 带宽高, 啁啾可调, 线性度好, 工艺技术成熟等特点^[1,2]。在铌酸锂技术快速发展的过程中, 偏置点的漂移严重影响了 MZM 的性能, 引起了人们的广泛关注^[3]。由于环境的变化和器件的老化, 应力, 外电场等因素, MZM 的初始偏置点会随着时间缓慢地变化。这个缺点导致模拟链路中理想的最大斜率偏置工作点和数字链路中为了达到最佳消光比的偏置工作点变得难以控制, 最终导致调制信号质量变差, 眼图劣化, 传输系统误码率上升。为了优化调制信号和系统性能, 我们必须提供一个偏置电压以保证 MZM 工作在其传递函数上合适的工作点。正交点, 消光点, 最大通光点是 MZM 最常见的偏置工作点。然而在一些数字通信和微波光子学应用中, 为了优化性能, 需要使调制器偏置在其传递函数上的任意点^[4-6]。

为了减小偏置点漂移对系统性能的影响, 人们做了大量的研究, 提出了多种 MZM 偏置点的锁定方法。通过提高生产工艺, 包括选择合适的半导体材料, 减少杂质离子的含量等等, MZM 的偏置点漂移可以被有效地控制, 可是这种方法技术难度大, 成本高^[7]。基于 MZM 输入输出光功率比的反馈控制也是一种常见的 MZM 偏置点锁定方法^[8], 这种方法的反馈信号受 MZM 输入光功率的波动, 连接器的可重复性和光纤弯曲损耗引起的光路损耗变化影响很严重, 调制器偏置点锁定精度不高, 同时放置在 MZM 前后的两个探测器需要严格的校准, 且拥有很大的动态范围。但是这种方法不需要加入扰动信号, 可以锁定调制器传递函数上的任意偏置点。工程上常采用的是低频扰动信号的反馈控制方法^[9], 这种锁定方法不能锁定任意的偏置点, 只能锁定那些使低频扰动信号谐波出现零值的偏置点, 例如正交偏置点, 消光点, 最大通光点。最近, 有人提出了一种

收稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61378010; No. 61121064); 国家重大科学研究计划(No. 2010CB923101)

作者简介: 王少锋(1989—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究领域: 量子通信。E-mail: 354498497@qq.com

[†]通讯作者: 李永民, E-mail: yongmin@sxu.edu.cn

新的基于低频扰动信号的 MZM 偏置锁定方法, 其利用 MZM 输出的低频扰动信号的二次谐波分量和一次谐波分量的比值作为反馈参数, 可以锁定传递函数上任意的偏置点^[10]。

在一些特殊的应用当中, 例如连续变量量子密钥分发(CVQKD), 调制信号的频带会和扰动信号的频带交叉, 这会给系统引入额外噪声, CVQKD对额外噪声的变化非常敏感^[11], 因此基于扰动信号的偏置点锁定方法会降低密钥系统的安全性。为了消除这一影响, 本文提出了一种不需要扰动信号的 MZM 偏置点控制技术, 可以锁定调制器传递函数上的任意点, 同时反馈信号对由探测器暗噪声, 输入光功率的波动构成的系统噪声不敏感。实验上, 利用本文提出的锁定方法, 得到了约 $\pm 0.05^\circ$ (标准偏差) 的偏置点锁定精度。

1 理论分析

本文提出的偏置点锁定方法的详细理论推导如下。调制器的输出光功率 P_{out} 可以表示为

$$P_{out} = \frac{P_{in} T_D}{2} [\cos(\theta_0) + 1], \quad (1)$$

P_{in} 是调制器的输入光功率, T_D 是调制器的插入损耗, θ_0 是偏置相位。为了简化公式, 令 $P_{in} = 1$, $T_D = 1$, 方程(1)可以化简为

$$P_{out} = \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} (V_{test} - V_{max}(t)) \right] + 1 \right\}, \quad (2)$$

$V_{max}(t)$ 是 MZM 的最大通光电压, V_{test} 是本文提出的锁定方法中需要加入的测试电压, V_π 是调制器的半波电压。由上可以得出 $V_{max}(t)$ 为

$$V_{max}(t) = V_{test} - \frac{\arccos(2P_{out} - 1)}{\pi} V_\pi, \quad (3)$$

其中, $V_{test} \in [V_{max}, V_{min}]$, $V_{min}(t) = V_{max}(t) + V_\pi$ 。通过给 MZM 施加一个测试电压, 然后测量调制器的输出光功率 P_{out} , 那么调制器传递函数上任意目标相位点所对应的电压可以表示为

$$V_{target}(x, t) = V_{max}(t) + \frac{\arccos[2P(x) - 1]}{\pi} V_\pi, \quad (4)$$

$V_{target}(x, t)$ 是传递函数 $P(x)$ 上目标偏置相位为 x

时对应的电压值。把方程(3)代入方程(4)可以得出,

$$V_{target}(x, t) = V_{test} - \frac{\arccos(2P_{out} - 1)}{\pi} V_\pi + \frac{\arccos(2P(x) - 1)}{\pi} V_\pi. \quad (5)$$

实际上, MZM 输出光功率的探测总是存在各种噪声, 这些噪声主要包括两方面。一部分是探测器的电子学噪声 (ΔP_1), 另一部分来自调制器输入光功率的波动 (ΔP_2), 下面我们详细分析了不同测试电压下噪声对锁定精度的影响, 通过分析, 我们发现通过优化选择测试电压, 可以使系统噪声对锁定精度影响最小化, 从而提高锁定精度。

根据噪声传递原理和方程(5), 得出

$$\Delta V_{target} = \frac{\partial V_{target}}{\partial P_{out}} \Delta P_{out} = \frac{2V_\pi}{\pi \sqrt{1 - (2P_{out} - 1)^2}} \Delta P_{out}, \quad (6)$$

其中, $\Delta P_{out} = \sqrt{\langle (\Delta P_1)^2 \rangle + \langle (\Delta P_2)^2 \rangle}$ 。最终锁定精度 $\Delta\theta$ 可以表示为

$$\Delta\theta = \frac{\Delta V_{target}}{V_\pi} \pi = \frac{2}{\sqrt{1 - (2P_{out} - 1)^2}} \Delta P_{out}, \quad (7)$$

在我们的实验中, $V_\pi = 7.852 \text{ V}$, $\sqrt{\langle (\Delta P_1)^2 \rangle} = 0.00014$, $\sqrt{\langle (\Delta P_2)^2 \rangle} = 0.0025 P_{out}$ (探测带宽为 1 MHz)。根据方程(7), 图 1 给出了锁定精度 $\Delta\theta$ 随着由测试电压 V_{test} 引起的测试偏置相位 θ_0 变化而变化的函数曲线, 从图中可以看出, 当测试偏置相位接近 0° 或者 180° 时, 锁定精度变得很差, 当测试偏置相位在 150° 附近的时候, 锁定精度最高。这说明在这个特殊的测试偏置相位, 锁定精度受噪声影响最小。因此, 为了获得高精度的 MZM 传递函数上任意偏置点的锁定, 需要给调制器施加一个特殊的测试电压(在我们的实验中对约 150° 测试偏置相位), 然后测量调制器的输出光功率 P_{out} 并根据方程(5)计算出任意的目标偏置点对应的偏置电压, 理论上本文提出的锁定方法对任意目标偏置点的锁定精度是相同的, 都可以达到最佳测试电压对应的锁定精度。传统的基于 MZM 输入输出光功率比的反馈控制能

够达到的锁定精度也可用本文提出的模型来计算，其反馈信号取自于目标相位点对应的调制器输出光功率，这可以等效于在本文的方法中，测试电压引起的测试偏置相位点和待锁定的目标相位点是相同的，因此图 1 也可以描述传统的基于 MZM 输入输出光功率比的反馈控制在不同的目标相位点能够达到的锁定精度。

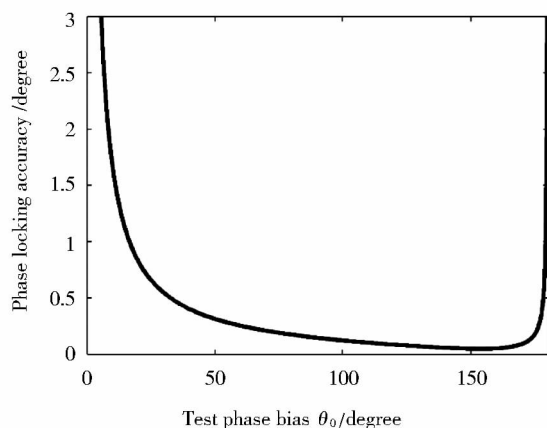


Fig. 1 The theoretical locking accuracy as a function of test phase bias θ_0 when the influence of noises is considered

图 1 考虑噪声影响的情况下，不同测试偏置相位 θ_0 下的锁定精度 $\Delta\theta$ 曲线

2 结果和讨论

在我们的实验中，使用的是商业化的铌酸锂 MZM(photline 公司)。我们测量了实验室环境下不采用偏置锁定时，一小时内 MZM 偏置点的漂移情况，结果表明一小时内偏置点单调递减了 4.437° ，平均每分钟漂移 0.074° 。可见一分钟内偏置点的漂移是很小的，因此我们的控制周期选择为一分钟。

MZM 偏置点锁定方法的原理图可以用图 2 来描述。在初始化过程中参数 V_π, P_{in}, T_D 和 V_{test} (对应当前传递函数上约 150° 偏置点) 被仔细校准，然后通过 MZM 的直流偏置端给调制器施加当前时刻对应锁定精度最高的测试电压 V_{test} ，MZM 输出的光信号通过分束器输入到探测器中，以此作为锁定的反馈信号，采集装置把探测器输出的电压传输到微处理器，然后通过方程

(5) 计算出调制器当前传递函数上任意点的电压值。最后通过调制器的偏置输入端将合适的偏置电压提供给 MZM。由于偏置工作点是随着时间一直变化的，所以需要周期性的进行锁定。实验中，偏置点锁定的响应时间大约是 10 ms，锁定周期是 1 分钟。

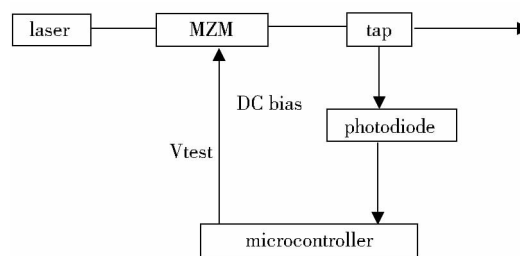


Fig. 2 The schematic of the bias control setup

图 2 偏置控制的原理图

每次锁定过程中，施加的 V_{test} 都是对应当前传递函数上约 150° 相位的电压。第 $(n+1)$ 次的测试电压 V_{test}^{n+1} 可以通过如下公式来计算，

$$V_{test}^{n+1} = V_{test}^n - \frac{\arccos(2P_{out}^n - 1)}{\pi} V_\pi + \frac{\arccos(2P(150^\circ) - 1)}{\pi} V_\pi \quad (8)$$

V_{test}^n, P_{out}^n 是第 n 次锁定的参数。为了克服调制器输入光功率的缓慢漂移，每次锁定中，通过给调制器施加一个电压 V_{max}^{n+1} 来校准 MZM 输出的最大光强，

$$V_{max}^{n+1} = V_{test}^n - \frac{\arccos(2P_{out}^n - 1)}{\pi} V_\pi \quad (9)$$

在 CVQKD 系统中，通常采用数据帧的结构来传递信号，数据帧由测试脉冲，信号脉冲组成，本文提出的 MZM 偏置点锁定方法和这种数据结构相兼容，测试脉冲中的一部分可以用来锁定调制器的偏置点。

图 3 给出了不同目标相位偏置点锁定精度的实验数据和理论曲线，我们选择了八个典型的偏置点， $15^\circ, 20^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 175^\circ, 177^\circ$ 。虚线是传统的基于 MZM 输入输出光功率比的反馈控制的理论曲线，圆圈是其实验结果，实线是本文提出的锁定方法的理论曲线，星号是相应的实验结果。可以看出实验数据和理论曲线基本吻合，本文

提出的方法在任意目标相位点的锁定精度基本相同(从 $\pm 0.05^\circ$ 到 $\pm 0.09^\circ$)。图 4 给出了利用提出的锁定方法,在 15° 目标偏置点 90 分钟内的锁定情况,测量结果表明锁定精度可以达到 $\pm 0.09^\circ$ (标准差)。

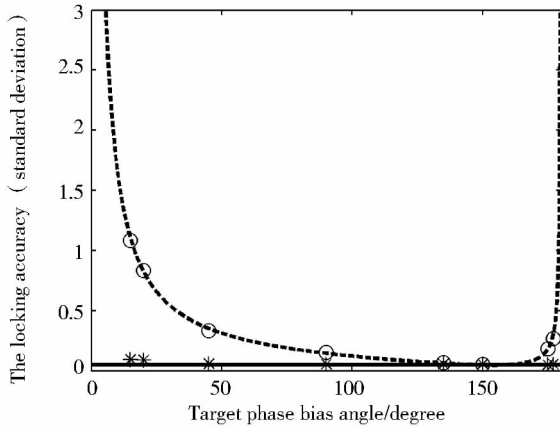


Fig. 3 Comparison of the experimental locking accuracy between our technique (asterisk) and the conventional technique (circle). The solid line and dotted line is the theoretical fittings
图 3 本文提出的方法(星号)和传统方法(空心圆圈)的实验锁定精度比较,实线、虚线是理论上各自的锁定精度

3 总结

本文提出并实验实现了一种无扰动信号的 MZM 传递函数上任意位置偏置点的锁定方法。

参考文献:

[1] LIG L, YUP K L. Optical intensity modulators for digital and analog applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**:2010-2030.
 [2] XING Y F, LOU C Y. A novel scheme to generate 40-GHz CSRZ pulse trains using a 10-GHz dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(1):010602.
 [3] WOOTENE L, KISSAK M, YI-YANA, *et al.* A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems [J]. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2000, **6**:69-82.
 [4] DEVENPORT J, KARIMA. Optimization of an externally modulated RF photonic link [J]. *Fiber and Integrated Opt*, 2008, **27**:7-14.
 [5] Nichols T, WILLIAMS K J, ESMANR D. Optimizing the ultrawide-band photonic link [J]. *IEEE Trans Microw Theory Technol*, 1997, **45**:1384-1389.
 [6] FISHERMAND A. Design and performance of externally modulated 1.5 μm laser transmitter in the presence of chromatic dispersion [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**:624-632.

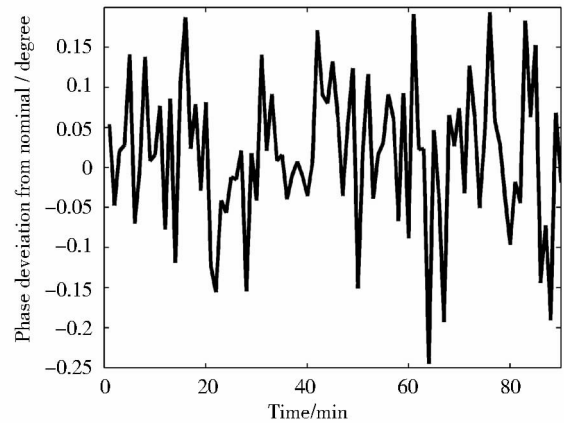


Fig. 4 Bias control accuracy at target phase bias of 15 degrees during 90 minutes

图 4 15° 目标偏置点在 90 分钟内的锁定情况

通过周期性的校准 MZM 输出光强的最大值,反馈信号受输入光功率的缓慢变化和光路损耗变化影响很小。通过给调制器施加一个特殊的测试电压,锁定精度受调制器输入光功率的波动和探测器的暗噪声影响非常小。我们在八个相位点: 15° 、 20° 、 45° 、 90° 、 135° 、 150° 、 175° 、 177° 获得了约 $\pm 0.05^\circ$ 的锁定精度。本文提出的锁定方法可以直接应用于 CVQKD 系统中,也可以应用到其他需要高精度任意位置的锁定,但不能加入扰动信号的领域。

- [7] SALVESTRINI P, GUILBERT L, *et al.* Analysis and control of the DC drift in LiNbO₃-based Mach-Zehnder modulators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**:1522-1534.
- [8] THOMAS L K. Optical Fiber Telecommunications III B [M]. USA: 1997.
- [9] ACKERMANE, COXC. Trade-offs between the noise figure and dynamic range of an analog optical link [J]. *Proceedings of Photonic Systems for Antenna Applications Conference*, 2000.
- [10] 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**:1703-1706.
- [11] LODWYCK J, GRANGIER P, *et al.* Controlling excess noise in fiber-optics continuous-variable quantum key distribution [J]. *Phys Rev A*, 2005, **72**:050303.

A Bias Control Technique for Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulators

WANG Shao-feng, WANG Xu-yang, BAI Zeng-liang, LI Yong-min

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We propose a dither-free bias control technique for lithium niobate Mach-Zehnder modulators (MZM) which can be used in continuous-variable quantum key distribution. Due to the introduction of a specific test phase bias and calibration of MZM maximum output optical power, the feedback signal was insensitive to the system's noises including the input optical power fluctuations and the dark noise of photodetector. The technique can be used to lock any arbitrary position along the MZM transfer function with a locking accuracy around ± 0.05 degrees (standard deviation).

Key words: continuous-variable quantum key distribution; lithium niobate Mach-Zehnder modulators; bias control