

# 马赫-曾德尔电光调制器工作点自动控制

樊理文 孟洲 孙乔 孙世林

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 为实现马赫-曾德尔(MZ)电光强度调制器(EOIM)工作点的实时控制,提出一种基于虚拟仪器技术的工作点自动控制方案。采用闭环反馈控制系统,引入微扰动信号,通过“扫描—鉴相补偿”的方法,可以使自动控制工作点长时间锁定于传输曲线的最低点。当激光器输出功率为 6 mW,控制 EOIM 在 1 h 内稳定于最低点,实验测得 EOIM 输出平均光功率 1.198  $\mu$ W,标准差 0.123  $\mu$ W,波动小于 0.43  $\mu$ W;在 EOIM 最低点外加电脉冲信号进行调制时,产生消光比均值达 25.71 dB 的光脉冲。输出脉冲消光比与未加控制时相比提高 9.94 dB,波动小于 0.5 dB,大大提高了 MZ 电光调制器的工作稳定性。

**关键词** 光学器件;工作点自动控制;虚拟仪器;马赫-曾德尔电光调制器

**中图分类号** TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905001

## Operating Points Control for Mach-Zehnder Electro-Optic Modulator

Fan Liwen Meng Zhou Sun Qiao Sun Shilin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** A practical method based on virtual instrument technique in order to realize operating points automatic control for Mach-Zehnder (MZ) electro-optic intensity modulators (EOIM) is proposed. Operating point at the minimum of the transmission curve can be automatically controlled steadily by means of “sweep—phase discrimination and compensation” in a closed loop feedback system. When the output power of the laser is 6 mW, EOIM is controlled steadily at minimum point for an hour. The average optical output power of the EOIM is 1.198  $\mu$ W, standard deviation is 0.123  $\mu$ W and fluctuation is less than 0.43  $\mu$ W at minimum point with control. When the additional electronic pulse signal is modulated at minimum point of EOIM, light pulse with mean extinction ratio (ER) of 25.71 dB is produced. Under pulse modulation, the output pulse ER is 9.94 dB higher than that in the condition without control, and fluctuation is less than 0.5 dB/h. Which improves working stability of MZ electro-optic modulator greatly.

**Key words** optical devices; operating points control; virtual instrument; Mach-Zehnder electro-optic modulator

**OCIS codes** 230.2090; 230.7370; 130.3120; 130.3730; 130.4110

## 1 引言

随着现代光纤通信及光纤传感技术的飞速发展,高速率、宽带宽、超大信息容量的光学调制成为光纤通信及光纤传感中不可或缺的一部分<sup>[1-3]</sup>。铌酸锂波导的马赫-曾德尔(MZ)电光强度调制器(EOIM)以其传播损耗小、驱动电压低、调制带宽宽、调制频率啁啾小以及波长依赖性小等优点,广泛应用在光纤通信、光纤传感、波分复用和激光扩频等诸多方面<sup>[4-6]</sup>。但由于其内部波导结构的原因,

EOIM 工作点会随外界环境等因素的变化而发生漂移,对其工作特性造成极大的影响<sup>[7-8]</sup>,严重制约其应用。因此,解决 MZ 型电光调制器工作点控制问题对其应用有着极其重要的意义<sup>[9-14]</sup>。

本文通过分析研究 EOIM 的传输特性曲线及工作点漂移现象,提出了一种“扫描—鉴相补偿”的工作点反馈控制方案,能够自动控制工作点于传输曲线的最低点并长时间锁定,实现了高消光比光脉冲输出,大大提高了 EOIM 的工作稳定性。

**收稿日期**: 2014-02-15; **收到修改稿日期**: 2014-03-15

**作者简介**: 樊理文(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 75419932@qq.com

**导师简介**: 孟洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤器件、光纤传感以及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhoumeng6806@163.com

## 2 EOIM 工作原理分析

EOIM 内部波导结构如图 1 所示,在一块铌酸锂波导材料的衬底上利用钛扩散技术制作出一个 MZ 干涉仪,入射光在第一个 Y 分支分为功率相等的两部分,分别通过干涉仪的两臂,之后在第二个 Y 分支发生干涉,合成一束光再输出。

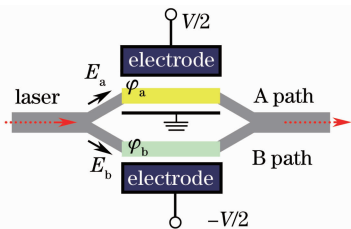


图 1 MZ 电光调制器内部波导结构

Fig. 1 Internal waveguide structure of MZ electro-optic modulator

如图 1 所示,EOIM 的 A、B 光路可看做两个相位调制器,外加电场的线性电光效应引起光波导介质的折射率变化,分别对两个支路进行相位调制,最终干涉形成强度调制。假设电极加载的调制电压  $V = V_{DC} + V_m \sin(\omega_m t)$ ,其中  $V_{DC}$  和  $V_m$  分别为直流偏置电压和调制信号幅度, $\omega_m$  为调制信号角频率,则 EOIM 传输曲线方程为

$$P = \frac{1}{2} E_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[ \pi \frac{V_{DC}}{V_\pi} + \pi \frac{V_m}{V_\pi} \sin(\omega_m t) + \sigma \right] \right\}, \quad (1)$$

式中  $V_\pi$  为调制器半波电压, $\sigma$  表示 MZ 干涉仪两臂之间存在的随机相移。 $\sigma$  易受外界环境影响而产生慢漂,导致其输出特性曲线发生漂移,改变器件工作点的位置,导致输出光脉冲的消光比下降。如图 2 所示,对于幅值为  $V_p$  的电脉冲调制信号,工作点位于输出曲线的最低点时,输出脉冲 1 消光比最高。当传输曲线发生漂移时,会造成脉冲峰值功率下降或基底的抬高,最终都会导致输出脉冲消光比的下降

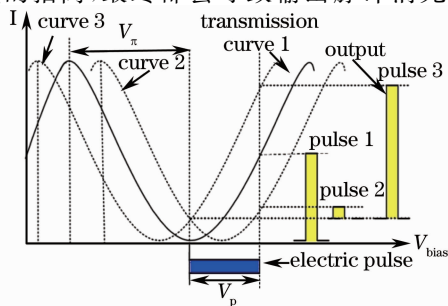


图 2 EOIM 传输曲线漂移对输出脉冲消光比的影响

Fig. 2 Influence of the drift of EOIM transmission curves on extinction ratio of output pulse

降,如图中脉冲 2 和脉冲 3 所示。因此,为得到稳定的高消光比脉冲输出,需要对 EOIM 的直流偏置进行实时控制,稳定其工作点位于传输曲线的最低点。

## 3 工作点自动控制原理及方案

提出的方案是基于反馈控制系统,通过“扫描—鉴相补偿”的方式对工作点进行实时控制,系统框图如图 3 所示。首先,扫描当前状态下 EOIM 的输出曲线,得到最低点对应的直流偏置,并加载于 EOIM 上。然后,在直流偏置端引入微扰动信号,通过鉴相实时判断工作点漂移的方向和大小。最后,控制信号源做相应的电压补偿,稳定工作点的位置。

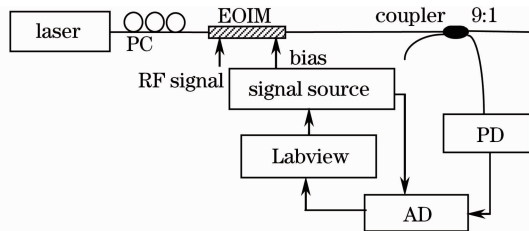


图 3 反馈式工作点自动控制系统框图

Fig. 3 Configuration of operating points feedback control system

如图 3 所示,系统采用单模激光器,经偏振控制器(PC)进入 EOIM,输出端接入一个 9:1 的耦合器,分出 10% 的光经光电转换进入数字采集卡(AD),最后将数据输入 Labview 平台分析处理。具体控制原理如下:由(1)式分析可知,在不加调制信号条件下,直流偏置电压与输出功率成余弦曲线关系。首先,在偏置端加入锯齿波电压信号,扫描当前状态下 EOIM 输出曲线,通过采集卡同步采集输出光强信号和锯齿波电压信号,得到该 EOIM 输出的峰值点和谷底点光功率  $P_{max}$ 、 $P_{min}$ ,以及对应的最高和最低点直流偏置电压  $V_{max}$ 、 $V_{min}$ 。然后在 EOIM 直流偏置端输入信号  $V = V_{DC} + V(t)$ , $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$  为微扰动信号,同时也作为锁相放大的参考信号。此时 EOIM 输出为

$$P_0 = \frac{P_i}{2} \left\{ 1 + \cos \left\{ \frac{\pi}{V_\pi} [V_{DC} + V(t) + V_m(t)] \right\} \right\}, \quad (2)$$

式中  $V(t)$  为一低频小幅度信号,调制度小于调制信号的 1%,频率也远低于调制信号,不影响 EOIM 正常的调制输出,可进行实时控制; $V_m(t) = V_m \sin(\omega_m t)$  为调制信号,不参与锁相过程,因此在以下分析中略去。工作点稳定在最低点, $\pi \frac{V_{DC}}{V_\pi} = \pi$ ,

将上式做归一化处理  $P = 2P_0/P_i$ ，则

$$P = \{1 + \cos[\pi + V(t) + \varphi]\}, \quad (3)$$

其中相移  $\varphi$  表示工作点相对于最低点的漂移，将(3)式展开得

$$P = 1 - \cos[V(t) + \varphi] = 1 - \cos[V(t)]\cos\varphi + \sin[V(t)]\sin\varphi, \quad (4)$$

将上式用泰勒级数展开，保留到3阶，得

$$\begin{aligned} P &= 1 - \cos\varphi \left[1 - \frac{1}{2!}V(t)^2\right] + \sin\varphi \left[V(t) - \frac{1}{3!}V(t)^3\right] = \\ &= 1 - \cos\varphi + \sin\varphi V_0 \sin\omega t + \frac{1}{2}\cos\varphi V_0^2 \sin^2\omega t - \frac{1}{6}\sin\varphi V_0^3 \sin^3\omega t = \\ &= 1 + \left(\frac{1}{4}V_0^2 - 1\right)\cos\varphi + \left(V_0 - \frac{1}{8}V_0^3\right)\sin\varphi \sin\omega t - \frac{1}{4}V_0^2 \cos\varphi \cos 2\omega t + \frac{1}{24}V_0^3 \sin\varphi \sin 3\omega t, \end{aligned} \quad (5)$$

其中一次谐波  $P^{(1)} = (V_0 - \frac{1}{8}V_0^3)\sin\varphi \sin\omega t$ ，二次谐波  $P^{(2)} = -\frac{1}{4}V_0^2 \cos\varphi \cos 2\omega t$ 。取扰动信号幅值  $V_0 = 0.5$  V，仿真得到一次及二次谐波与漂移  $\varphi$  的关系。

由图4可知，当漂移  $\varphi$  在  $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$  内时，一次谐波分量随漂移  $\varphi$  单调递增， $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$  时分别取最大最小值，且在零漂移点两侧符号相反。由于前一步已通过扫描将工作点定位于最低点附近，短时间内工作点漂移  $\varphi$  仍在  $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$  的单调区间内，因此可通过检测一次谐波分量的大小和方向判断漂移的情况。将EOIM的输出  $P$  与直流偏置端输入信号  $V$  隔直后相乘。由于EOIM的输出中只有一阶谐波信号  $P^{(1)}$  与参考信号  $V$  同频，故两信号隔直相乘后运用积化和差公式简化为

$$\begin{aligned} \left(V_0 - \frac{1}{8}V_0^3\right)\sin\varphi \sin(\omega t) \times V_0 \sin(\omega t) = \\ M \sin\varphi \times \left\{-\frac{1}{2}[\cos(2\omega t) - 1]\right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

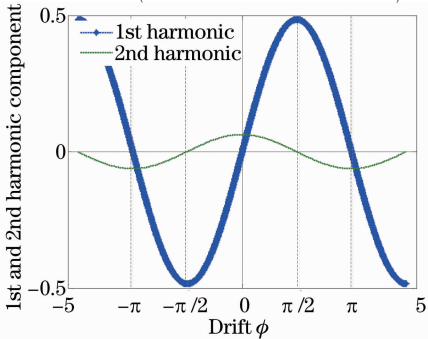


图4 一次、二次谐波分量与漂移的关系

Fig. 4 Relationship between first order, second order harmonic component and drift

式中  $M = V_0^2 - \frac{1}{8}V_0^4$  为常数，低通滤波后得到直流量  $Z$ ：

$$Z = \frac{M}{2}\sin\varphi. \quad (7)$$

输出信号与调制信号如图5所示。

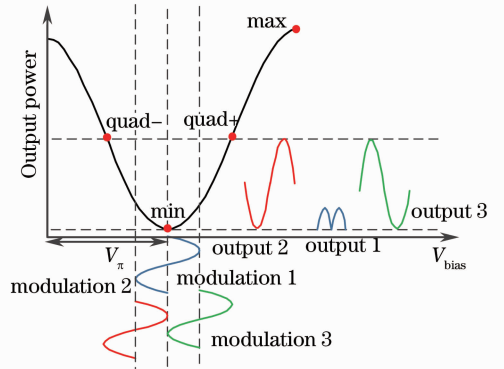


图5 EOIM输出信号与调制信号示意图

Fig. 5 Relationship between EOIM output signal and modulation signal

如图5所示，工作点右移时， $\varphi > 0$ ，直流量  $Z \geq 0$ ，减小直流偏置电压回到最低点。工作点左移时， $\varphi < 0$ ，直流量  $Z \leq 0$ ，增大直流偏置电压回到最低点。通过监测输出直流量  $Z$  的符号和大小判断工作点的漂移情况，控制信号源做出相应电压调整，稳定工作点于最低点。由于工作点已定位于最低点，且EOIM工作点漂移缓慢，只需微调不断逼近最低点即可。因此采用固定步进电压补偿的方式对直流偏置进行调整。对于电压步进值的选取往往视实际情况而定，小的步进取值能够保证更高的控制精度，但会增加系统的调整时间，不适合工作点漂移较快的场合，实验条件下选取步进值为10 mV。

选择Labview平台的虚拟仪器技术对控制过程进行编程，由于其具有精确高效、开发简易、实时性强等优点，且具备信号调理与数据采集、数据分析

处理和结果显示三大功能模块,非常适用于实时监控和控制,完全满足本控制系统要求,达到实时监控 EOIM 工作点的目的。控制程序的流程图如图 6 所示。

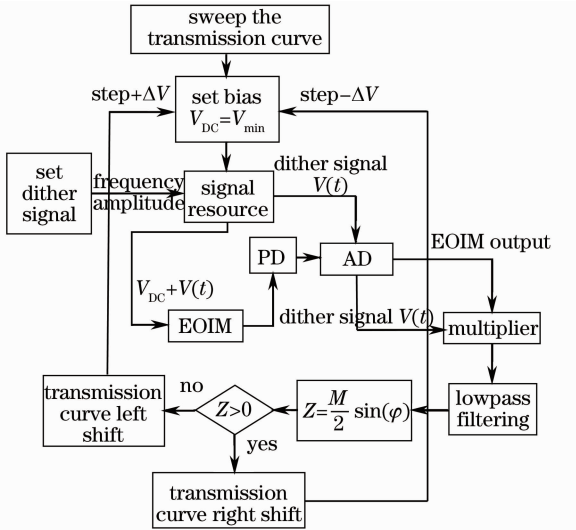


图 6 EOIM 工作点控制程序流程图

Fig. 6 Flowchart of EOIM operating points control program

### 4 实验结果及讨论

实验选用北京康冠公司 KG-AM 系列的1550 nm 高速电光强度调制器,直流偏置半波电压6 V。RIO 单模激光器,输出功率 6 mW; Tektronix 3252 信号源, FEMTO 低噪声窄带宽光电探测器, PCI 6251 数字采集卡, New Focus Model 1811 低噪声光电探测器, Tektronix DPO 7000 示波器。微扰动信号频率 500 Hz,幅值 50 mV,步进电压 10 mV,最低点直流偏置  $V_{min}$  由扫描程序得到,并以微扰动信号偏置的形式由信号源的同一通道输出。

在 EOIM 直流偏置端加入频率为 1 kHz,

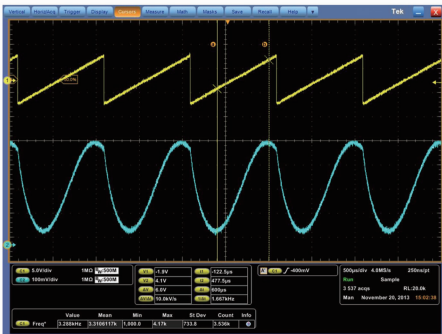


图 7 扫描 EOIM 的传输曲线

Fig. 7 Transmission curve of sweeping EOIM

-5 V~5 V 的锯齿波信号对其输出曲线进行扫描,得到 EOIM 输出曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,由于扫描锯齿波信号峰峰值  $V_{Ramp} = 10 \text{ V}$ ,  $V_{\pi} < V_{Ramp} < 2V_{\pi}$ , 因此扫描只能得到其部分传输曲线,大于半个周期小于一个周期。但仍然能得到 EOIM 的峰值点和谷底点对应的电压值  $V_{max}$ 、 $V_{min}$ ,并由二者之差可粗略得到该 EOIM 的半波电压  $V_{\pi} = 6 \text{ V}$ 。

扫描后自动控制 EOIM 位于输出曲线的最低点  $V_{bias} = V_{min}$ ,在相同实验条件下,监测 1 h 内未加工作点控制和施工作点控制的光功率漂移情况,如图 8 所示。

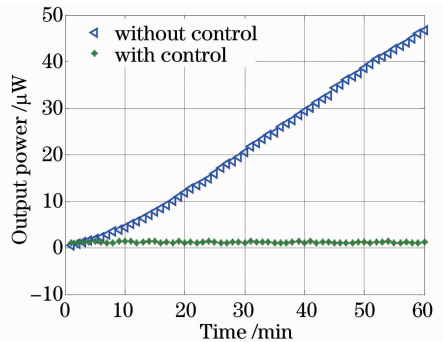


图 8 未加工作点自动控制与加控制光功率漂移情况对比

Fig. 8 Contrast of the optical power drift without and with operating points control

由图 8 可知,未加控制时,工作点逐渐偏离传输曲线的最低点,造成 EOIM 输出光功率的增大,由初始的  $0.8 \mu\text{W}$  增大到  $46.7 \mu\text{W}$ ,波动近  $46 \mu\text{W}$ 。当引入工作点控制后,1 h 内 EOIM 输出功率平均值  $1.198 \mu\text{W}$ ,标准差  $0.123 \mu\text{W}$ ,波动  $0.43 \mu\text{W}$ ,可见施加控制后工作点基本锁定在传输曲线的最低点处。在 EOIM 工作于最低点的前提下,加载脉宽 50 ns、幅值 6 V 的电脉冲调制信号,监测其输出脉冲的形状,如图 9 所示。

由图 9 可知,不工作点控制,1 h 后脉冲峰值明显下降,基底有所抬高,最终导致消光比由 25.59 dB 降至 15.77 dB,降幅 9.82 dB。施工作点控制后,脉冲峰值功率及基底基本保持不变,消光比基本稳定在 25.46 dB~25.95 dB 之间,均值 25.71 dB,波动 0.49 dB。与不加控制的情况相比消光比,提高 9.94 dB,可见引入工作点控制后 EOIM 连续运行条件下输出脉冲质量明显提高。

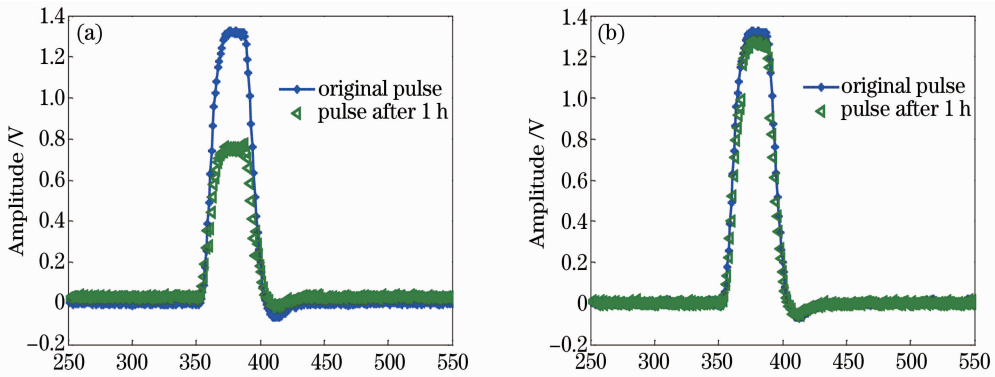


图9 (a)未加与(b)施加工作点控制一小时后脉冲形状对比

Fig. 9 Contrast of the pulse shape (a) without and (b) with control in an hour

## 5 结 论

提出了一种基于虚拟仪器技术的 EOIM 工作点自动控制方法,采用闭环反馈控制系统,引入微扰动信号,通过“扫描——鉴相补偿”的方法将工作点迅速定位并锁定于传输曲线的最低点,系统简单、控制精度高、实时性好、可靠性强。当激光器输出功率为 6 mW 时,控制 EOIM 在 1 h 内稳定于最低点,实验测得输出功率平均值  $1.198 \mu\text{W}$ ,标准差  $0.123 \mu\text{W}$ ,波动小于  $0.43 \mu\text{W}$ 。脉冲调制时产生消光比均值达 25.71 dB 的光脉冲,运行 1 h 后消光比与未加控制的情况相比提高 9.94 dB,消光比波动小于 0.5 dB。实验证明了该控制技术能够有效提高 EOIM 长时间连续工作条件下的工作稳定性,对 MZ 型电光调制器的实际工程应用具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- Zhang Xuping, Zhang Kai, Wang Shun. Performance and control of electro-optic modulator for the distributed Brillouin sensing system[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(1): 15–20.
- 张旭莘, 张 凯, 王 顺. 布里渊光时域反射计中电光调制器的调制特性与控制[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 15–20.
- Kiuchi H, Kawanishi T, Yamada M, *et al.*. High extinction ratio Mach-Zehnder modulator applied to a highly stable optical signal generator[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2007, 55(9): 1964–1972.
- Wang Weidong, Wu Boyu, Li Dejie, *et al.*. Ti:LiNbO<sub>3</sub> M-Z intensity modulator for long haul, high bit rate optical fiber communication system [J]. Journal of China Institute of Communications, 1994, 15(6): 52–57.
- 王卫东, 吴伯瑜, 李德杰, 等. 适于长距离、高速率光纤通信系统的 Ti:LiNbO<sub>3</sub> M-Z 型强度调制器[J]. 通信学报, 1994, 15(6): 52–57.
- 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.
- Chen Fushen. Integrated Electronic-Optical Modulation Theory and Telechology[M]. Beijing: National Defence Press, 1995. 56–60.

- 陈福深. 集成电光调制理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 56–60.
- Gan Xiaoyong. Key Research About High Speed Lithium Niobate Waveguide Electro-Optic Modulator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2004. 1–6.
- 甘小勇. 高速铌酸锂波导电光调制器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004. 1–6.
- Zou Shumin, Shao Yufeng, Zheng Xi, *et al.*. Study on generation of all optical orthogonal frequency division multiplexing signals based multi-tones modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706004.
- 邹书敏, 邵宇丰, 郑 曦, 等. 基于多边带调制产生全光正交频分复用信号的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706004.
- Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(4): 901–905.
- 周慧娟, 孟 洲, 廖 毅. 铌酸锂波导电光调制器的移频特性 [J]. 中国激光, 2009, 36(4): 901–905.
- J Snoddy, Y Li, F Ravet, *et al.*. Stabilization of electro-optic modulator bias voltage drift using a lock-in amplifier and a proportional-integral-derivative controller in distributed Brillouin sensor system[J]. Applied Optics, 2007, 46(9): 1482–1485.
- Zou Hui, Hu Yi, Tian Jun, *et al.*. MZ external modulator optimum bias point stabilization control [J]. Optical Communications Research, 2008, 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, 3: 30–32.
- Yinan Chen, Xiaoqing Zhang, Dong Li, *et al.*. A control system design for the optimal bias point of external modulator[C]. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009, 3-950–3-954.
- 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. LiNbO<sub>3</sub> 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.
- 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.
- 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. 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.

栏目编辑: 韩 峰