

电光调制器自适应偏振控制系统设计与实现

李永倩,孟祥腾,安琪,吕安强,王跃,王宇

(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘要: 为了保持电光调制器(EOM)输入光偏振方向始终与其内部可传播模式偏振方向一致,使EOM获得良好的调制效果,提出了一种基于比例-积分-微分(PID)算法的EOM自适应偏振控制方法,理论分析并实验验证了该方法的可行性。实验结果表明,基于该方法设计的控制系统不仅能实时监测EOM输出光功率,而且能保持其输出光功率最大;与激光器和EOM输入端直接用保偏光纤连接时相比,PID偏振控制下EOM输出平均功率提高了3.08 dB,PD输出电压标准差由0.121 4降至 $1.237 5 \times 10^{-4}$,稳定控制状态下偏振态矫正时间在ms量级。

关键词: 电光调制器(EOM); 偏振态; PID; 自适应控制

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)06-1854-05

Design and implementation of electro-optic modulator adaptive polarization control system

Li Yongqian, Meng Xiangteng, An Qi, Lv Anqiang, Wang Yue, Wang Yu

(Department of Electronics and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to keep the input light polarization direction of electro-optic modulator(EOM) up with that of internal propagation mode in an EOM, and to obtain expected modulation effect, an adaptive control method based on proportional-integral-derivative (PID) algorithm was proposed. Theoretical analysis and experimental demonstration was conducted to verify the feasibility of the proposed method. The experimental results show that the control system designed by the method not only can real-time monitor the output optical power of EOM, but also can keep the output power maximum. Compared with the performance of EOM connected directly to a narrow band laser with a polarization maintaining fiber, the output average power of EOM under the polarization control based on PID is increased by 3.08 dB and the standard deviation of PD output voltage is reduced from 0.121 4 to $1.237 5 \times 10^{-4}$. And the correction time for the state of polarization is in the order of ms when the system is working in stable control state.

Key words: electro-optic modulator(EOM); state of polarization; PID; adaptive control

收稿日期:2014-10-21; 修订日期:2014-11-24

基金项目:国家自然科学基金(61377088);河北省自然科学基金(E2012502045)

作者简介:李永倩(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光通信与光传感技术及其在智能电网中应用方面的研究。

Email:liyq@ncepubd.edu.cn

0 引言

电光调制器(EOM)是激光外调制中最为有效的器件,广泛应用于高速光纤通信和分布式光纤传感系统中。目前使用较多的电光调制器是铌酸锂电光调制器,由于其对输入光的偏振态比较敏感,要使调制器的调制效果达到最佳,即输出光功率最大,须使输入光的偏振方向始终与EOM内部可传播模式偏振方向保持一致。在实际光纤通信和分布式光纤传感系统中,由于外界环境如温度和应力的变化,以及纤芯的不规则性都会引起光纤的不规则双折射,从而导致光纤中传输光的偏振态随机变化,如果不加以控制,将会降低EOM的调制效果,同时影响系统的稳定性。为了满足高速光纤通信及分布式光纤传感的要求,须对EOM输入光的偏振态进行控制,使其始终保持与EOM可传播模式偏振方向一致。EOM偏振控制系统主要由偏振控制器和控制算法组成。偏振控制器根据其作用方式分为多种,其中可旋波片型偏振控制器^[1]实现方法简单易行,但插入损耗大、对波长敏感,自动控制速度受限;光纤线圈型偏振控制器^[2]消除了可旋波片组合法插入损耗大的缺点,但由于光纤弯曲半径不能太小,故体积较大;机械挤压型偏振控制器体积较小,成本低,但不能实现偏振态的实时自动控制;电控挤压型偏振控制器不但体积小、插入损耗、偏振相关损耗及启动损耗低,反射小,而且具有控制速度快,对波长不敏感等优点。目前偏振控制系统多采用建立偏振器件的输入输出模型的矩阵处理算法^[3-4],一般需要偏振检测仪及较多硬件模块,成本高,且多用于高速相干光纤通信系统^[5]。文中提出采用PID算法^[6]获得电控挤压型偏振控制器各通道的控制电压,从而实现EOM输入光的自适应偏振控制,该方法具有自适应能力强、控制方便灵活、控制速度快等优点,能够满足分布式光纤传感系统EOM输入光偏振方向始终保持与其可传播模式一致的要求。

1 设计原理

1.1 偏振控制原理

电控挤压型偏振控制器(PC)主要由四个通道单元和驱动电路构成,其结构如图1所示。图中四个通

道单元对应四块挤压器,它们的快轴固定且与水平参考方向的夹角分别成45°、0°、45°、0°;V₁、V₂、V₃、V₄分别为驱动器施加于四块挤压器上的控制电压。

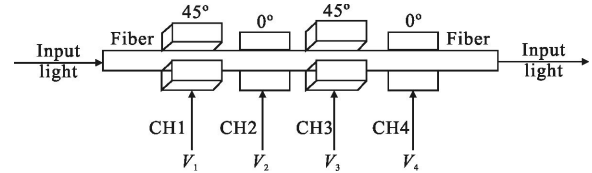


图1 偏振控制器内部通道结构示意图

Fig.1 Structure diagram of PC internal channels

输入光的偏振态可由琼斯矩阵表示为:

$$E_i = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ e^{i\delta}\sin\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:θ为偏振光与水平参考方向的夹角;δ为两个垂直方向光矢量间的相位差。挤压器对输入光偏振态的作用可用二阶琼斯矩阵J表示:

$$J = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\psi/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\psi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:φ为挤压器快轴与水平参考方向的夹角;ψ为挤压器挤压光纤而产生的相对相位延迟量。输入光E_i经n块挤压器后,输出光的琼斯矢量可表示为:

$$E_o = J_n \cdots J_2 \cdot J_1 \cdot E_i \quad (3)$$

因此,任意给定的输入偏振光E_i经相对相位延迟确定的挤压器后,其输出偏振态也就确定,可用琼斯矢量表示为:

$$E_o = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

其在x轴、y轴上的光功率分别为:

$$P_x = E_x E_x^* \quad P_y = E_y E_y^* \quad (5)$$

总功率P不变,为:

$$P = P_x + P_y \quad (6)$$

设PC输出光偏振方向即EOM输入光的偏振方向与EOM可传播模式偏振方向夹角为α(0≤α<π),则根据马吕斯定律,有EOM输出光功率为:

$$P_o = P \cos^2 \alpha \left[1 + \cos \left(\pi \frac{U_s + U_b}{U_\pi} \right) \right] \quad (7)$$

式中:U_s、U_b分别为信号电压和偏置电压;U_π为电光调制器的半波电压。因此,当U_s、U_b及U_π为固定值时,EOM输出光功率取决于α,α等于0表明EOM输入光的偏振方向与其可传播模式偏振方向一致,EOM输出光功率最大。

由于 α 为各挤压器挤压光纤产生的相对相位延迟量的函数，故可通过改变外加电场改变挤压器上的作用力，进而改变传输光的相对相位延迟来实现对偏振态的控制。

1.2 设计思路

EOM 自适应偏振控制系统由被控对象、检测装置、控制器和执行机构组成，如图 2 所示。

要使 EOM 输入光的偏振方向与其可传播模式偏振方向一致，就要给定一个与 EOM 可传播模式偏振方向一致的目标偏振态。EOM 输出光经光电检测器(PD)后输出电压值为：

$$V_{pv} = \beta P_o \tag{8}$$

式中： β 为光电检测器输入功率与输出电压的比例系数，因此可将光电检测器输出电压等效为被控对象，将其最大值作为期望值，用计算机对作为检测装置的光电检测器的输出电压(被控对象)进行巡回检测，并将检测结果与期望值进行比较，采用 PID 算法进行控制运算，然后将计算结果输出到作为执行装置的偏振控制器的各个挤压器上，从而实现对被控对象 EOM 输入光偏振方向的控制。

基于 PID 算法的 EOM 自适应偏振控制系统原理框图如图 2 所示。PD 将 EOM 输出光功率转换为电压，经数据采集卡采集并由 PID 算法处理后得到一个输出指令，输出指令通过改变 PC 通道电压 $u(t)$ ，实现对 EOM 输入光偏振方向的调节。通过不断的反馈调节，最终实现保持 EOM 输入光偏振方向与其可传播模式偏振方向一致的目的。

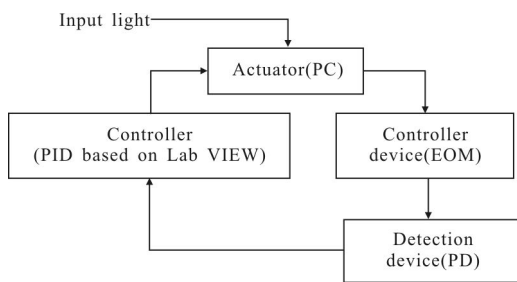


图 2 基于 PID 算法的 EOM 自适应偏振控制系统原理框图
Fig.2 Principle diagram of EOM adaptive polarization control system based on PID algorithm

图 2 中 PID 输出控制电压可由下式计算：

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{9}$$

式中： K_p 、 T_i 、 T_d 分别为比例、积分、微分系数。

$$e(t) = V_{sp}(t) - V_{pv}(t) \tag{10}$$

式中： V_{sp} 为设定的 PD 输出电压期望值。PID 利用整定好的 K_p 、 T_i 、 T_d 系数，通过反馈计算实现对 EOM 输入光的自适应偏振控制。

2 实验验证

基于 PID 算法的 EOM 自适应偏振控制系统框图如图 3 所示。光电调制器可通过偏压控制器(MBC)偏置在其传输特性的峰点、谷点、正/负线性区中点。首先将 EOM 偏置在峰点，对 EOM 输入光进行自适应偏振控制。

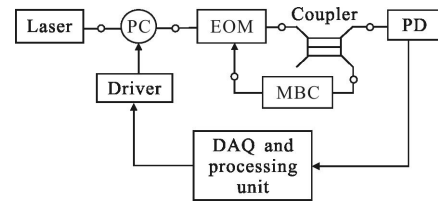


图 3 EOM 自适应偏振控制系统框图

Fig.3 Adaptive polarization control system of EOM

2.1 期望值的确定

PID 算法需设定一个 PD 输出电压期望值。由于 EOM 输入光偏振态不确定，要使其偏振方向与 EOM 可传播模式偏振方向一致即 PD 输出电压最大，理论上至少使用 3 个挤压器级联才能将偏振态遍布整个邦加球^[7]，但所需时间过长。文中先将 PC 的 1、2 通道级联，再加将 2、3 通道级联^[8]，最后把这两种级联方式所遍历的偏振态取并集便可遍历整个邦加球。故需分以上两种级联情况寻找 PD 输出电压最大值。

实验测得四个挤压器挤压光纤致传输光相对相位延迟变化为 0~2 时对应的外加控制电压分别为 0~54 V、0~58 V、0~54 V、0~58 V，故在图 3 系统中，利用最大值搜索程序，使 1、2 通道外加电压分别以 1 V 为步进值从 0 V 变化至 59 V，采集 60×60 组 PD 输出电压 V_{pv} 来搜索期望值 V_{sp} 。PD 实际输出电压值 V_{pv} 在不同控制电压组合时的变化曲线如图 4 所示。

对图 4 曲线寻峰得 PD 输出电压最大值为 6.900 13 V，此采集点处对应 1 通道和 2 通道的控制电压分别为 11 V 和 15 V。

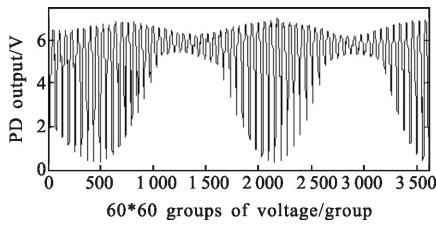


图 4 1、2 通道级联时 PD 输出电压变化曲线
Fig.4 PD output when channel 1 and 2 cascaded

采用同样方法使 PC 的 2、3 通道级联并采集 V_{pv} 来搜索 V_{sp} , 得出图 5 所示曲线。

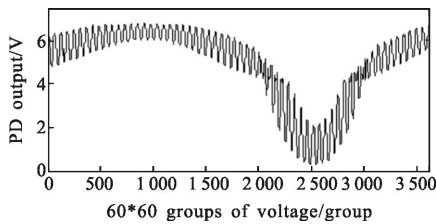


图 5 2、3 通道级联时 PD 输出电压变化曲线
Fig.5 PD output when channel 2 and 3 cascaded

对图 5 曲线寻峰得 PD 输出电压最大值为 6.777 72 V, 此采集点处对应 2、3 通道控制电压分别为 16 V 和 40 V。

综上, 得期望值 $V_{sp}=6.900\ 13\ V$, 即 PD 输出达到此期望值时, 表明 EOM 输入光偏振方向与其可传播模式偏振方向一致。

2.2 基于 PID 算法的 EOM 自适应偏振控制

由 3.1 可知, 目标偏振态存在于 1、2 通道级联条件下, 故采用 1、2 通道级联来实现 EOM 输入光的自适应偏振控制, 其实验系统如图 3 所示。将 $V_{sp}=6.900\ 13\ V$ 作为 1、2 通道的 PID 期望值, 将 11 V 和 15 V 分别作为 1、2 通道的初始控制电压有助于提高初始控制过程的收敛速度。启动计算机 PID 程序, 通过对 PID 参数进行整定, 获得两通道参数 CH1 PID gains、CH2 PID gains。为了便于观察此偏振控制系统的控制效果, 设置了包括最大期望值在内的三个期望值梯度(6.900 13 V、5.900 13 V、4.900 13 V), 系统运行后所得 PD 实际输出电压 V_{pv} 随所设置 V_{sp} 的变化曲线如图 6 所示。

图 6 中, 启动 PID 偏振控制程序后, 经 1.2 s 的程序启动响应时间, PD 输出电压实际值接近最大期望值, 表明此时 EOM 输入光偏振方向与 EOM 可传

播模式偏振方向一致。当改变 V_{sp} 时, V_{pv} 随所设 V_{sp} 值的变化曲线表明, 该控制算法可以实现一定范围内控制 EOM 输出光功率至期望光功率, 且响应速度较快。稳定控制下偏振态的矫正均在 0.098 s 内完成, 响应速度较快。

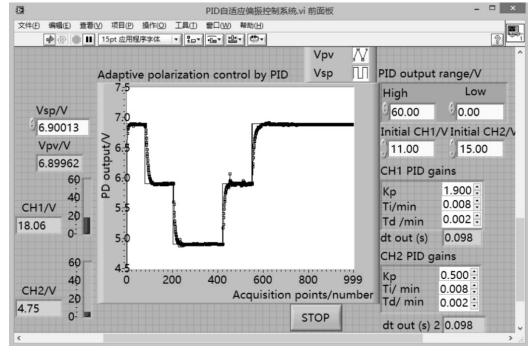


图 6 EOM 偏置在峰点时 PD 输出电压随期望值的变化曲线
Fig.6 Change curve of PD output voltage with the expected value when EOM biases at peak point

为了进一步验证该偏振控制系统提高 EOM 输出信号幅度和稳定性的效果, 将 EOM 在 PID 偏振控制与激光器保偏输出端直接接 EOM 保偏光纤输入端时 PD 输出电压进行了对比, 如图 7 所示。

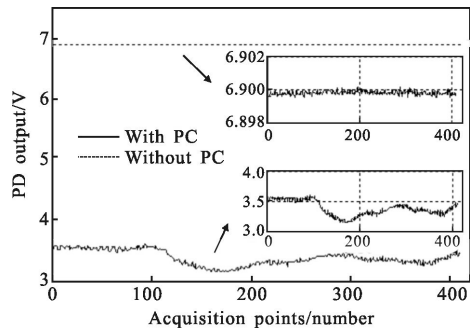


图 7 偏振控制和无偏振控制下 PD 输出
Fig.7 PD output with and without PC

从图 7 可以看出, 不加偏振控制时, PD 输出电压在 3.14 V 和 3.71 V 之间波动, 标准差为 0.121 4; 在 PID 自适应偏振控制下 PD 输出电压在 6.898 97 V 和 6.900 13 V 之间以极小幅度波动, 标准差为 $1.237\ 5 \times 10^{-4}$, 该输出电压的极小波动主要产生于 MBC 不是将 EOM 偏置在理想的峰点, 而是偏置在包括峰点在内的一个小区间。不加偏振控制时, PD 输出电压均值为 3.384 73 V, 对应于 EOM 输出光功率为 0.75 dBm; 在 PID 偏振控制下 PD 输出电压均

值为 6.89980V, 对应于 EOM 输出光功率为 3.83 dBm, 相对无偏振控制时提高了 3.08 dB。

上述实验结果表明, 采用文中提出的基于 PID 算法的 EOM 自适应偏振控制方法, 不仅提高了 EOM 的输出光功率, 而且提高了其输出光功率的稳定性。

EOM 偏置在谷点、线性区中点时的 PID 自适应偏振控制效果和偏置在峰点时效果基本相同, 在此不再赘述。

3 结 论

文中设计了基于 PID 算法的 EOM 输入光自适应偏振控制方案, 理论分析并搭建了软/硬件实验平台, 通过使 EOM 分别偏置在传输特性的峰点、谷点及线性区中点, 验证了所设计的系统的可靠性。结果表明, 该方法能够实时自动监测 EOM 输出光功率大小, 通过自适应反馈控制能快速使输入光偏振方向与 EOM 可传播模式偏振方向一致且保持稳定; 通过预先确定目标点存在于何种级联方式下, 缩小了控制算法的搜索范围, 相对提高了系统的响应速度。该方法的应用将有助于提高光纤通信与分布式光纤传感系统工作的稳定性。

参考文献:

- [1] Laurent Dupont, Rong Weifeng, Jeanclaude Vivalda. Endless polarization control using two rotatable wave plates with variable birefringence [J]. *Optics Communications*, 2005, 252: 1-6.
- [2] Jia Bo, Hu Li. All coil-fiber polarizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(9): 842-846. (in Chinese)
- 贾波, 胡力. 线圈型全光纤偏振器的研究 [J]. *光子学报*, 1998, 27(9): 842-846.
- [3] Li Zhengyong, Wu Chongqing, Yang Shuangshou, et al. Analysis of generalized principal state of polarization and piezoelectric polarization control system [C]//SPIE, 2007, 6781: 678120-1-8.
- [4] Katsuhiko Hirabayashi, Chikara Amano. Feed-forward continuous and complete polarization control with PLZT rotatable-variable waveplate and inline polarimeter [J]. *IEEE Lightwave Technology*, 2003, 21(9): 1920-1932.
- [5] Li Tie, Ke Xizheng, Chen Juan, et al. Polarization control in the coherent optical detection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3069-3074. (in Chinese)
- 李铁, 柯熙政, 谌娟, 等. 相干光检测系统中的偏振控制 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3069-3074.
- [6] Jeffrey Snoddy, Yun Li, Fabien Ravet, et al. Stabilization of electro-optic modulator bias voltage drift using a lock-in amplifier and a proportional-integral-derivative controller in a distributed Brillouin sensor system [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(9): 1482-5.
- [7] Zhang Xiaoguang, Duan Gaoyan, Xi Lixia. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarizations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1173-1176. (in Chinese)
- 张晓光, 段高燕, 席丽霞. 偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1173-1176.
- [8] Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, et al. Research on polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506001-1-6. (in Chinese)
- 张启业, 朱勇, 苏洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506001-1-6.