

文章编号: 0253-2239(2005)04-449-5

# 基于模拟退火算法的偏振控制器波片相移特性研究\*

李伟文<sup>1</sup> 章献民<sup>1\*</sup> 陈抗生<sup>1</sup> 邹英寅<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027  
<sup>2</sup> Boston Applied Technologies, Inc. Woburn, MA 01801, USA)

**摘要:** 按晶体波片的快轴与水平方向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$  顺序排列构造四波片偏振控制器。固定各波片的快慢轴, 利用模拟退火算法进行反馈控制, 通过改变各波片的相位得到所需的偏振态。仿真结果说明, 利用模拟退火算法进行负反馈控制, 其收敛速度较快, 收敛后光强波动小于 2%; 该控制器能在各波片相移范围限制在  $0 \sim 2\pi$  情况下实现偏振态的无端控制。为消除可能出现的复位死角, 在模拟退火算法基础上加入强制无端复位方法, 复位过程稳定。控制过程中该控制器各波片的相移步长可变, 但寻优过程中最大步长不超过  $3.36^\circ$ , 强制复位过程中最大步长不超过  $18^\circ$ , 因此控制电压的变化平缓。

**关键词:** 光纤通信技术; 偏振控制器; 模拟退火算法; 无端复位; 波片相移

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## A Study for Phase-Shift Characteristics of Polarization Controller Based on Simulated Annealing Algorithm

Li Weiwen<sup>1</sup> Zhang Xianmin<sup>1</sup> Chen Kangsheng<sup>1</sup> Zou Yingyin<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027  
<sup>2</sup> Boston Applied Technologies, Inc. Woburn, MA 01801, USA)

**Abstract:** A four-wave-plate electrooptic polarization controller (PC) is constructed with their fast axes oriented alternately at  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  with respect to horizontal. The simulated annealing feedback controlling algorithm is applied to the controlling process to get the desired output polarization state. Simulating results show that this polarization controller is endless and the plate phase range can be limited within  $0$  to  $2\pi$ . Using this controlling algorithm the controller can converge rapidly and the fluctuation of light intensity is less than 2%. To ensure the endless property of the controller a coercing reset method is introduced and here the reset process is stable. In searching the optimal value, the phase shift step of plates is variable but less than the maximum step of  $3.36^\circ$  while the step is fixed in  $18^\circ$  for the coercing reset.

**Key words:** optical communication technology; polarization controller; simulated annealing algorithm; endless reset; wave plate phase shift

## 1 引 言

光纤通信中偏振态的控制是当前一个活跃的研究领域<sup>[1]</sup>, 它主要在两方面展开: 偏振控制器件和偏振控制算法。偏振控制器件多是由多块波片构成, 根据其工作原理基本可分为两类: 可变延迟波片和延迟固定可旋转波片<sup>[2]</sup>。延迟固定可旋转波片的相对相位延迟是固定不变的, 通过其快慢轴的旋转达

到控制偏振态的目的, 又可分为机械控制和外加电场的闭环控制, 但前者不易实现无端的偏振控制, 后者控制方法复杂<sup>[3~7]</sup>。相位延迟可变偏振控制器按构成材料不同也可分为许多类型, 如挤压光纤, 液晶,  $\text{LiNbO}_3$  波导, 电光晶体等<sup>[8~13]</sup>。

延迟可变偏振控制器控制算法是使任意输入偏振态能在期望方向得到稳定输出并在波片到达相移

\* 浙江省科技计划重点项目(2004C21G2010007)资助课题。

作者简介: 李伟文(1968~), 男, 浙江缙云人, 浙江大学信息与电子工程系博士生, 主要从事光纤通信器件与系统研究。

\*\* 通信联系人。E-mail: zhangxm@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-04-21; 收到修改稿日期: 2004-09-23

极限时能无端回复。目前偏振态稳定性控制算法多是利用梯度法寻优,但它对有多驻点的全局收敛性不敏感,需要多阶求导变换汉斯(Hesse)矩阵才能跳出鞍点,增加了控制的复杂性,同时在波片相移到达极限时需要另外的复位算法。本文提出了模拟退火控制算法,利用其全局收敛性保证了控制过程的稳定,在波片达到极限能利用其随机扰动性得到回复,克服了梯度法的缺点;为消除可能出现的死角,还可在算法中加入强制复位,保证控制器的无端性。

## 2 偏振控制器分析

电光晶体偏振控制器是利用电光晶体加上一定偏压后呈现出的晶体双折射特性。垂直入射的任意偏振光经过双折射晶体时,分解成两束传播方向相同,但传播速度不同、偏振方向相互垂直的线偏振光(e光和o光),这两个垂直方向分别对应于晶体的快轴和慢轴,并产生附加相位差 $\psi$

$$\psi = 2\pi(L/\lambda)(n_o - n_e), \quad (1)$$

式中 $n_e$ 和 $n_o$ 分别为e光和o光的折射率,它们随外加电场的变化而发生改变, $L$ 为光路方向电光材料的长度。

根据庞加莱球理论,每一个偏振态对应于庞加莱球表面上的一点,快轴与参考水平方向成 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 的双折射晶体,其相位差分别对应于绕庞加莱球的 $x$ 、 $y$ 轴的旋转量,通过改变其相位差,可把一输入的偏振态转换成另一输出偏振态,因此电光晶体偏振控制器可由多个 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 波片交错排列构成。由于电光晶体的相位差是有一定范围的,用于偏振态控制时不应超出该限制,这就需要重置复位,为保证复位过程中输出偏振态的稳定,可引入另外波片以消除重置引起的波动,这就是无端复位问题。

在电光晶体偏振控制器中,每个波片所需的相位差是由一种反馈控制算法来确定的。可用光强作为反馈控制信号,通过反馈控制使期望输出的偏振方向的光强最大,或与其垂直方向的光强最小。图1为四波片电光晶体无端偏振控制器示意图。

任一偏振光都可用琼斯矢量<sup>[13]</sup>来表示,其归一化形式为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \exp(i\delta) \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\theta$ 为偏振光与水平参考方向的夹角, $\delta$ 为两个垂直方向光矢量分量间的位相差。由电光材料构成的作为偏振控制器件的波片,可用2阶琼斯矩阵 $\mathbf{J}$ 表示,矩阵中的元素由具体波片给定,其形式如下:

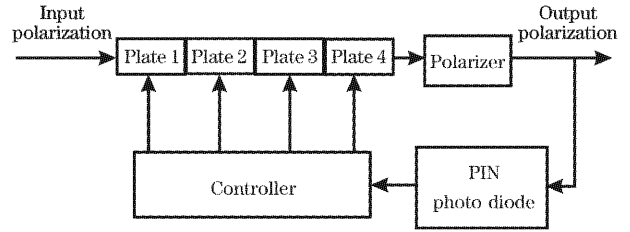


图1 电光晶体无端偏振控制器示意图

Fig. 1 Schematic of electrooptic crystal endless polarization controller

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(i\psi/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\psi/2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\phi$ 为波片快轴与水平参考方向的夹角, $\psi$ 为波片的相对相位延迟量。

如果输入偏振光 $\mathbf{E}_1$ 相继通过多个波片,则输出光的琼斯矢量 $\mathbf{E}_2$ 为

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{J}_n * \dots * \mathbf{J}_3 * \mathbf{J}_2 * \mathbf{J}_1 * \mathbf{E}_1 = \mathbf{J}_{\text{total}} * \mathbf{E}_1, \quad (4)$$

这样任一输入偏振光,通过多个位置和相对相位延迟已确定的波片,其输出偏振态也是确定的,可用琼斯矢量表示为

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其在 $x$ 、 $y$ 轴方向的光强分别为

$$\mathbf{I}_x = E_x E_x^*, \quad \mathbf{I}_y = E_y E_y^*, \quad (6)$$

式中 $E_x^*$ 、 $E_y^*$ 分别为 $E_x$ 、 $E_y$ 的复共轭。可见 $\mathbf{I}_x$ 、 $\mathbf{I}_y$ 都是各波片相对相位延迟的函数,通过多个波片的相位组合可得到某一期望方向的输出线偏振态,这时该方向的光强应为最大,在不考虑光在波片等光路中的损耗时,其值应等于输入偏振光的光强,而与之正交方向的光强应为零。因此在数学上就是使在期望的偏振方向上光强这一目标函数最大的优化问题,基于此,本文提出了用模拟退火法<sup>[14]</sup>实现反馈控制的控制算法。

在由各波片相对相位延迟值所构成的解空间,某一输出偏振方向的光强具有许多鞍点,因此模拟退火法不失为一种较好的优化方法。在模拟退火法中,关键控制参量有初温,温度更新函数,状态产生函数。理论上,初始温度应取足够大,但为得到足够小的温度控制终值,必然要增加循环次数,导致过长的处理时间,因此要折衷考虑两者进行初温的选择。

在模拟退火算法中,一个常用的温度更新函数是

$$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

其中  $\alpha$  是一个常数,一般在  $0.5 \sim 0.99$  间取值。状态产生函数用于在一个状态点邻域产生随机扰动,为寻优提供候选解。对于相移范围在  $0 \sim 2\pi$  的波片,相当于其解空间是有限的,故采用如下状态接受函数:

$$x_{i+1} = \begin{cases} x_i + 0.01r(2\pi - x_i), & x_i \leq 0 \\ x_i + 0.01r \cdot c \cdot x_i, & 0 < x_i < 2\pi \\ x_i + 0.01r(0 - x_i), & x_i \geq 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

式中  $r$  为  $0 \sim 1$  间随机数,  $c$  为随机  $-1$  和  $+1$ ,在偏振控制器中,  $x_i$  相当于各波片的延迟量。由状态接受函数可见,在邻域最大搜索步长为  $3.36^\circ$ ,因此在搜索过程中引起的波动不大。由于输入的是连续信号,后一个搜索点依赖于前一次搜索结果,这样每个

最佳值搜索的循环次数可大大减少,从而也提高了控制器响应速度。

### 3 仿真结果

对四波片基于模拟退火算法偏振控制器的控制过程进行仿真实验,实验中每个最佳值搜索的循环次数取为 6 次,同时取初温  $T_0 = 1$ ,温度更新函数为  $T_{k+1} = 0.9T_k$ 。

#### 3.1 控制过程波片相移变化

由四个电光晶体波片构成无端偏振控制器,波片 1、2、3、4 的快轴与水平参考方向分别成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ ,要求经过偏振控制后在水平方向的输出光强趋于 0。1000 个采样点的具体仿真结果如图 2、图 3 所示。

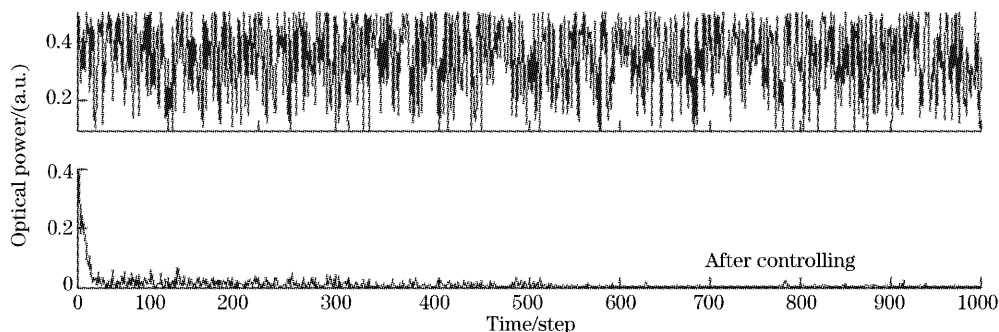


图 2 四波片偏振控制器控制前后水平方向光强的变化

Fig. 2 Horizontal intensity of output polarization light from four-wave-plate PC before and after controlling

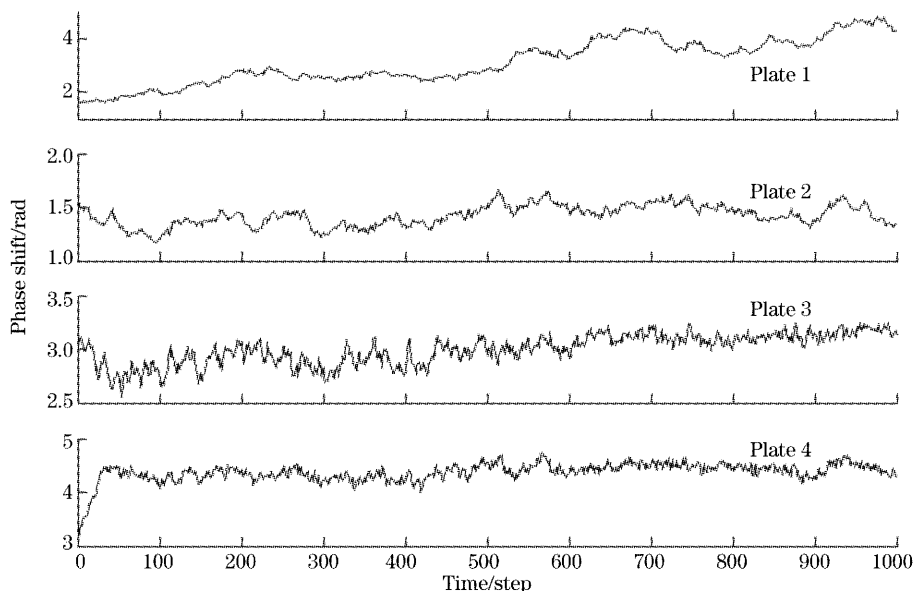


图 3 四波片偏振控制器控制过程中各波片的相移变化

Fig. 3 Phase-shift of every plate in four-wave-plate PC

图 2 两曲线分别为任意输入偏振光经过四波片电光晶体偏振控制器控制作用前后在水平方向输出光强的变化情形。由图可知,在水平方向光强能较好地收敛于零值,保证了输出偏振光为垂直方向的线偏振光;收敛后输出的偏振态稳定,其光强波动小于 2%。

图 3 各曲线分别为四波片偏振控制器起控制作用时波片 1、2、3、4 的相位跟随变化情形,多次实验表明它们的相位变化范围都没有超过  $2\pi$ ,在到达极限附近时能自动回复;波片的相位变化相对平缓,使控制器所需的电场变化幅度不会很大,因此收敛过程中输出光强只有很小的波动,这也是四波片控制器收敛后稳定的原因。

### 3.2 强制无端复位过程波片相移变化

为进一步确保偏振控制器的无端性,可在控制算法中加入强制复位方法,它是对 Noe 复位方法的改进<sup>[7~9]</sup>。经过实验和分析发现,在四波片控制器中,波片 4 只是使偏振态在水平本征态附近发生扰动,不会超出波片相移范围;波片 2 要求复位的可能性较小;而对于波片 1、3 需要经常性复位,并且有可能同时到达极限。在多波片同时控制的基于模拟退火法偏振控制器中,要求复位的是一些特殊输入偏振态,即本征态,并且至少有两个波片相移同时处于  $\pi$  的整数倍,对于任意输入而不存在这种特殊态的偏振光并不会产生复位要求。要求复位时相应波片所处位置有以下几种可能的情形:

1) 当波片 1 要求复位时,波片 3 也同时反向达到极限,这时可先使第二块波片相移变到 0 或  $2\pi$ ,然后使波片 1、3 同时回到  $\pi$ ,最后使波片 2 回到初值;

2) 只有波片 3 要求复位,这时波 2 或 1 至少有一个处于  $\pi$  附近,可先令波片 2 到达  $\pi$ ,然后波片 1、3 同向移动  $\pi/2$ , $\pi/2$  的相移是为了在复位过程中使波片 1 仍在控制范围内;

3) 只有波片 1 产生复位要求,此时波片 2 或 3 至少有一个处于  $\pi$  位置,其复位过程同波片 3 的情况。由于波片 1、3 复位过程中同时要改变波片 2,故波片 2 很少超出限制范围,如需要复位,可先使波片 1、3 反向移动使波片 3 到达  $\pi$ ,然后使波片 2 改变  $\pi$ 。上述复位过程中可以采用较小步长,实现慢复位;复位的实现是基于至少有两波片同时处于  $\pi$  整数倍的事实。具体仿真结果如图 4、图 5、图 6 所示,最大复位步长为  $18^\circ$ 。

图 4、图 5、图 6 分别为四波片偏振控制器在强制复位过程中波片 1、2、3 的相移变化。波片 4 只在

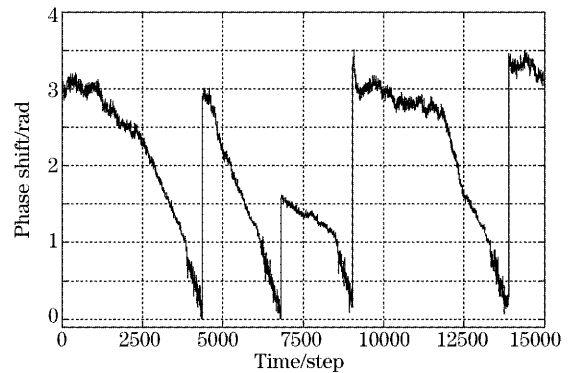


图 4 强制复位时波片 1 的相移变化

Fig. 4 Phase delay of wave plate 1 for endless reset

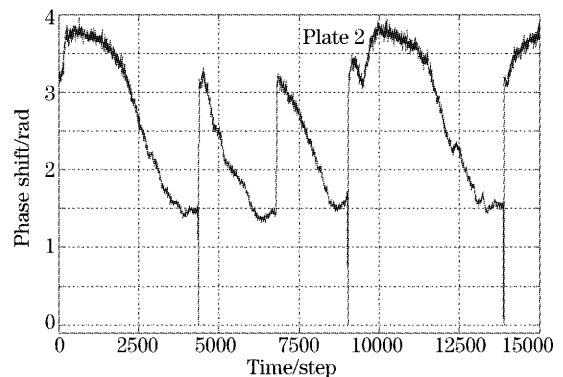


图 5 强制复位时波片 2 的相移变化

Fig. 5 Phase delay of plate 2 for endless reset

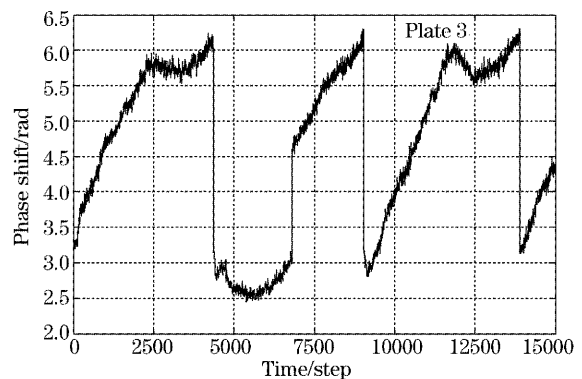


图 6 强制复位时波片 3 的相移变化

Fig. 6 Phase delay of plate 3 for endless reset

相移  $\pi$  附近扰动,不会超出相移限制范围,故不需要进行复位。可以看出,控制器能进行稳定的复位过程,此时各波片的相移范围差不多可以限制在  $\pi$  范围内,从而可进一步减少最大控制电压;由于复位步长较小(不超过  $18^\circ$ ),因此不会引起控制电压的突变,简化了控制电路设计,同时能保证输出偏振态的稳定性。图中存在两种复位情形:波片 1 和波片 3 同时反向分别到达  $\pi$ 、 $2\pi$  和波片 1 在  $\pi$  同时波片 2 为  $\pi$ ,这时分别对应于输入偏振态是水平和垂直本

征态。图中也显示,利用模拟退火算法进行偏振态控制是完全可行的。

## 4 结 论

构造了四波片电光晶体偏振控制器,通过模拟退火算法的反馈控制,能使任意输入偏振光很好地转变为期望方向的输出线偏振光。在控制过程中各波片的相位变化平缓,并能在波片相移范围限制在  $0\sim 2\pi$  情况下实现无端控制。强制复位控制可进一步消除复位死角,减少波片相移范围,由于采用小步长复位,复位过程稳定。仿真结果为按模拟退火反馈控制算法设计电光晶体无端偏振控制器提供了依据。

## 参 考 文 献

- Xu Kun, Dai Yitang, Mao Jin *et al.*. Study of dynamic PMD compensation system using signal DOP as the feedback control signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1204~1209 (in Chinese)
- 徐 坤,戴一堂,毛 晋等. 基于光信号偏振度的偏振模色散补偿系统的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1204~1209
- Martinelli M, Chipman R A. Endless polarization control algorithm using adjustable linear retarders with fixed axes[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 2089~2096
- Okoshi T, Kikuchi K, Cheng Y. New polarization-state control device: rotatable fiber cranks[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(20): 895~896
- Okoshi T. Polarization-state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(6): 1232~1237
- Matsumoto T, Kano H. Endlessly rotatable fraction-wave devices for single-mode-fiber optics[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(2): 78~79
- Heismann F. Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4): 690~699
- Noe R. Endless polarization control in coherent optical communications[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(15): 772~773
- Noe R. Endless polarization control experiment with three elements of limited birefringence range[J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(25): 1341~1343
- Noe R, Heidrich H, Hoffmann D. Endless polarization control system for coherent optics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7): 1199~1208
- Rumbaugh S H, Jones M D, Casperson L W. Polarization control for coherent fiber-optic systems using nematic liquid crystals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(3): 459~465
- Dupont L, Sansoni T, Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye. Endless smectic A\* liquid crystal polarization controller[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **209**: 101~106
- Heismann F, Whalen M S. Fast automatic polarization control system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(5): 503~505
- Zheng Yuan, Liu Yumin, Yang Bojun *et al.*. Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by Jones transfer matrix method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 45~48 (in Chinese)
- 郑 远,刘玉敏,杨伯君等. 用琼斯传输矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 45~48
- Kirkpatrick K S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680