

可变可转单波片偏振控制器研究*

李伟文¹ 金晓峰¹ 章献民¹ 陈抗生¹ 邹英寅^{1,2}

(1 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

(2 Boston Applied Technologies, Inc. Woburn, MA 01801, USA)

摘要 基于 PLZT 波片的相对相位延迟量可变性和其折射率椭球主光轴的可转性, 提出后反馈单个 PLZT 可变可转波片偏振控制器. 采用模拟退火算法进行扰动寻优, 仿真结果显示这种控制器是有效的: 能将任意输入偏振态转换为稳定的线偏振光而其光强达到总光强的 98% 以上, 在控制过程中相移能在限定范围内变化, 避免了由复位重置可能引起的波动.

关键词 光纤通信; 偏振控制器; 电光效应; PLZT; 可变可转波片

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

0 引言

在光纤通信系统中, 偏振态敏感器件的应用, 对偏振模色散(PMD)的补偿^[1,2]和偏振干涉通信^[3,4], 都必须使用偏振控制器对偏振态进行控制. 由于外界因素(如温度, 压力)的影响, 在远距离光纤中偏振态的变化是随机的, 故偏振态的控制应是无端持续的, 并要求有较快的响应速度. 可变可转波片, 如掺镧锆钛酸铅(PLZT)透明陶瓷, 可同时改变波片相对相位延迟量(即可变)和旋转波片本征轴(即可转), 从而达到控制偏振态的目的.

基于 PLZT 可变可转单波片的偏振控制器目前主要采用前馈控制^[5], 它是利用在线偏振态检测仪首先测试出输入偏振态的 Stokes 参量并用以控制后置的可变可转 PLZT 波片的相移和转角. 但由于波片相移范围的限制, 当输入输出两偏振态在庞加莱球上的点相接近时, 有可能使相移超过 2π 而需要重置, 常采用转角快速回零达到相移的复位, 但这会引起所加偏压的突变和输出偏振态的很大波动; 同时由于要事先确定输入偏振态, 增加了控制器的设计难度和控制设备的体积.

本文提出了后馈单 PLZT 可变可转波片偏振控制器, 由于波片相移范围的限制, 设想对波片的转角进行开区间寻优, 而对偏压幅值(对应于相移)进行闭区间寻优, 故可采用模拟退火算法进行扰动寻优. 相对于一般梯度算法, 模拟退火算法具有良好的全局寻优性能和限定区间寻优能力. 仿真验证以上构想是可行的.

1 PLZT 可变可转波片偏振控制器分析

PLZT 铁电陶瓷是由 PbO , La_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 等成份组成的固熔体, 它的化学式为 $Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_z)_{1-x/4}O_3$. 当比例 $x/y/z$ 为 $9/65/35$ 时, PLZT 具有良好的电光效应, 其响应时间小于 1 ns ^[6~8]. 它对波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光是透明的, 其光吸收系数只有几个 dB/cm . 当介质中不存在电场时, PLZT 呈现出各向同性; 外加偏压后 PLZT 产生很强的 Kerr 效应, 折射率椭球在电场方向上受到压缩, 呈现出电场诱导的负单轴晶型双折射, 折射率椭球主光轴方向即为电场方向^[9].

对于 PLZT, 在横向电光调制时通常使用表面电极来提供电场以诱导足够的双折射, 而双面电极结构较单面电极会在电介质中产生更强的电场以获得较低的半波电压. 已有多种数值分析方法如表面电荷法^[10]、有限元法^[11]、快速累加法(有限差分法)^[12]和保角变换法^[9]计算了不同电极结构所产生的电场分布, 发现由于 PLZT 的高介电系数, 使电场在材料内的穿透深度受到限制, 从而 PLZT 波片只有部分厚度能产生有效的电光效应. 故在实际应用中一般采用内嵌柱状电极结构^[4], 并每对电极加以余弦变化偏压, 即 $\pm V_0 \sin \theta$ 和 $\pm V_0 \cos \theta$. 图 1 是一种该结构 PLZT 波片用等压线表示电场分布的示意说明.

图 1 说明柱状电极结构 PLZT 内电场分布是均匀的, 电场方向与 θ 相一致, 随着 θ 值的增大, 电场也作逆时针方向转动. 由于产生的双折射主光轴方向即为电场方向, θ 值变化就决定了 PLZT 波片本征轴的转动, 其大小对应于本征轴的转角即方位角, 可见 PLZT 波片是可转波片. 由于 PLZT 波片中所产生的电场强度大小只由电压幅值 V_0 决定, 与角

*浙江省科技计划重点项目(No. 2004C21G2010007)资助
Tel: 0571-88206345 Email: zhangxm@zju.edu.cn
收稿日期: 2004-10-20

度 θ 无关, 因此 V_0 的变化将引起 PLZT 波片附加相对延迟量的变化, 从而也是可变波片, 其相移只由电

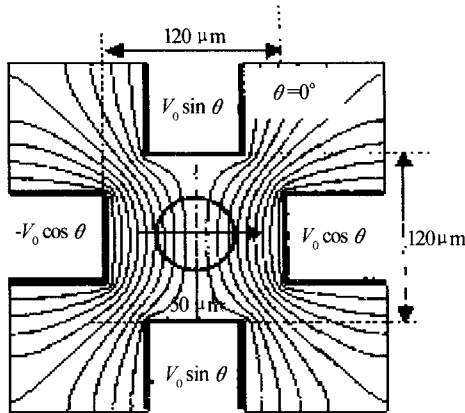


图 1 $\theta=0$ 时柱电极结构 PLZT 波片的等压线分布
Fig. 1 Equal-voltage contour lines calculated for $\theta=0$ for PLZT plate of pole electrodes

压幅值确定.

在 PLZT 波片偏振控制器中, 半波电压影响着控制电路的复杂性, 过高的半波电压 V_π 势必增加电路设计的难度和控制过程的波动. 相对于面电极结构, 柱状电极结构 PLZT 波片有较低的半波电压; 而采用 $V_0 \sin \theta$ 、 $V_0 \cos \theta$ 、 $-V_0 \sin \theta$ 和 $-V_0 \cos \theta$ 的偏压方式, 可进一步使偏压幅值减少一半. 对于柱状电极结构 PLZT 波片, 其半波电压可设计在 300 V 左右, 因而实际所加偏压最高幅值是 150 V. 这种偏压方式的 PLZT 波片的相移 $\Delta\varphi$ 与外加偏压幅值有如下关系^[10]

$$2V_0 = V_\pi \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\pi}} \quad (1)$$

对于 PLZT 可变可转波片, 当其主光轴方位角相对水平参考方向为 Θ , 附加相对相位延迟为 δ 时, 其 Mueller 矩阵 M 为

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (1 - \cos \delta) \sin^2 2\Theta & (1 - \cos \delta) \sin 2\Theta \cos 2\Theta & -\sin \delta \sin 2\Theta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\Theta \cos 2\Theta & 1 - (1 - \cos \delta) \cos^2 2\Theta & \sin \delta \cos 2\Theta \\ 0 & \sin \delta \sin 2\Theta & -\sin \delta \cos 2\Theta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

可见 PLZT 波片是一线性可变可转波片, 转动时其本征轴一直位于庞加莱球的赤道面上, 通过本

征轴的转动和延迟转角的变化实现偏振态的控制. 因此其 Jones 矩阵 J 可表示为

$$J = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + i \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cos(2\Theta) & i \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin(2\Theta) \\ i \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin(2\Theta) & \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - i \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \cos(2\Theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Hirabayashi 等人分析指出^[5], 单个 PLZT 可变可转波片就可实现任意偏振态的控制, 但它是基于前馈控制, 并且在一些关键点附近偏振态转换时需要复位重置, 故此设想采用后馈无复位控制算法, 以期输出方向的光功率作为反馈信号. 对于可变可转波片, 有限制要求的是相移范围, 而本征轴是可以无端旋转的, 后反馈无复位控制算法正是按此构想提出的. 利用寻优算法, 通过轴转角的持续单向变化, 把相移变化限制在相移范围内寻优. 相对于一般梯度算法, 模拟退火算法具有良好的全局收敛性和区间寻优能力, 因此这里的扰动寻优采用模拟退火算法.

2 单波片控制仿真实验

仿真实验中, 取半波电压 $V_\pi = 160$ V, 横向偏压

V_x 为 $V_0 \cos \theta$, 而纵向偏压 V_y 为 $V_0 \sin \theta$, 相移和所加偏压幅值关系由式(1)给出. 对相移和方位角同时进行寻优, 不直接针对偏压, 相移寻优可用偏压幅值寻优取代. 实验中对每个采样点的处理循环周期为 9 次, 每个循环周期约为 0.1 ms.

单向持续变化偏振态转换为垂直方向固定线偏振态的仿真结果如图 2. 由于方位角的持续单向变化进行寻优, 长时间处理的累积, 必然有很大的方位角值, 根据状态产生函数可知此时寻优邻域会很大, 即步长变大, 从而影响最后的收敛准确度. 考虑到所加偏压是方位角的周期函数, 即方位角的转动是无端的, 因此可以把方位角变化也限制在一个周期内: 当超出限制范围时可以突变 2π 而不会引起所加偏压的波动. 这种回复过程不同于相移或电压的复位, 因为表现在偏压上是不可见的.

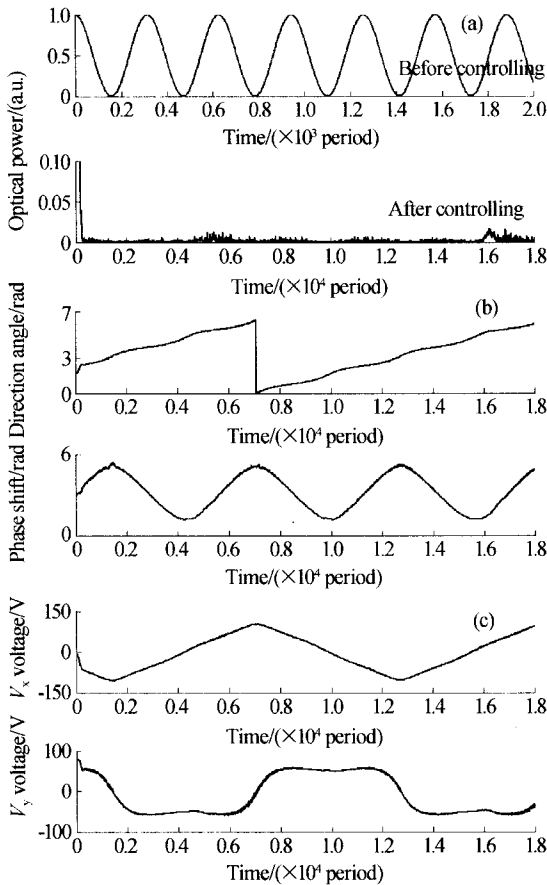


图2 (a)单向连续变化输入偏振态在控制前后水平方向的光强变化;(b)控制过程中PLZT波片的本征轴方位角和波片相移变化;(c)控制过程中在垂直和水平方向波片偏压的变化

Fig. 2 (a) Horizontal intensity of output polarization light before and after controlling for directional varying input polarization light; (b) Phase delay and direction angle of PLZT plate; (c) Horizontal and vertical control voltage of PLZT plate

由图2,单向持续变化输入偏振态,经过反馈单个PLZT波片控制器后,可得到固定线偏态输出,在输出方向的偏振态达到总光强98%以上,波动很小.在控制过程中,相移变化能在 2π 的范围内寻优,因此不需对相移进行重置复位,避免了由于相移复位引起的偏振态波动,并简化了控制算法;也可以看到,方位角变化呈现出一定的单调性,因此对其范围的限制是必须的,图中显示,方位角的 2π 突变没有引起偏压和偏振态的波动.电压变化曲线说明,在控制过程中不存在电压的跃变,因此能平稳地控制

偏振态.由此可见,这种偏振态控制方法是可行的.实验中还发现,相对于相移寻优步长,方位角步长对收敛后波动的影响更大,因此有必要采用不同的寻优步长.

应用这种控制方法,对在关键点(即波片已存在较大相移时输入的垂直或水平方向线偏振态)附近

作随机变化的输入偏振态控制也作了相应的实验验证,其结果如图3.

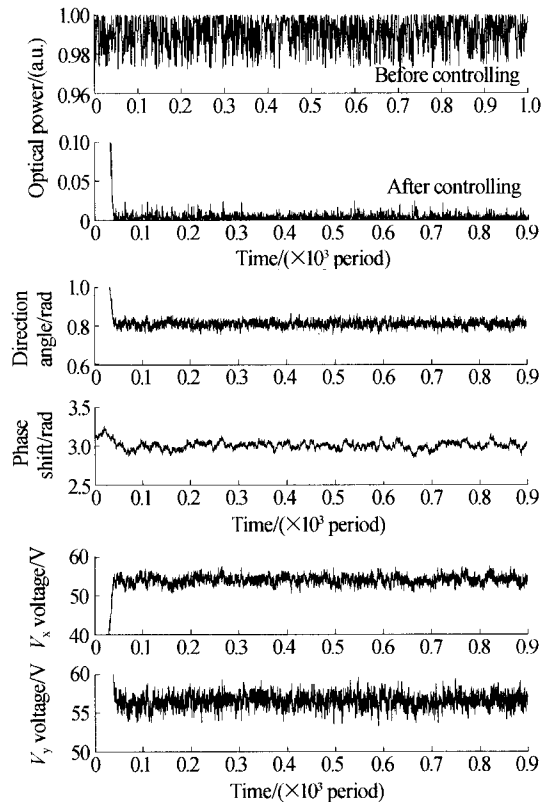


图3 (a)随机变化输入偏振态在控制前后水平方向的光强变化;(b)控制过程中PLZT波片的本征轴方位角和波片相移变化;(c)控制过程中在垂直和水平方向波片偏压的变化

Fig. 2 (a) Horizontal intensity of output polarization light before and after controlling for random varying input polarization light; (b) Phase delay and direction angle of PLZT plate; (c) Horizontal and vertical control voltage of PLZT plate

由图3可见,随机输入偏振态,经过反馈单个PLZT可变可转波片控制器控制后能较快收敛于期望方向,大约在200个处理周期;收敛后得到的固定线偏振输出较为稳定,其光强达到总光强的98%以上.在控制过程中,相移和方位角变化都在限定范围内进行.

3 结论

在分析掺镧锆钛酸铅透明铁电陶瓷(PLZT)波片基础上,提出利用其相移可变、本征轴可转特点,构造单个可变可转后反馈控制式PLZT波片偏振控制器.采用模拟退火算法进行扰动寻优.转角的无端性和相移的范围限制,仿真验证说明这种控制器对偏振态的控制是有效的.对单向变化输入偏振态,经控制器后能得到稳定的固定方向线偏振输出,其光强达到总光强的98%以上,而相移变化在限定的 2π 范围内进行,因此不需要进行重置复位,避免

了由此可能引起的波动,由于方位角的周期性,故也可进行范围限定,实验显示其 2π 的突变不会引起附加波动. 对关键点附近随机变化偏振态的控制也说明该控制器是可行的,并且在控制过程中不需重置算法.

参考文献

- 1 张晓光,于丽,郑远,等. 光纤通信系统中偏振模色散自适应补偿实验研究. 光子学报,2003,32(12): 1474~1478
Zhang X G, Yu L, Zheng Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(12): 1474~1478
- 2 刘汉奎,章献民,陈抗生. 偏振模色散补偿控制中偏振度技术的性能. 光子学报,2005,34(8):1213~1216
Liu H K,Zhang X M,Chen K S. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(8): 1213~1216
- 3 Noe R, Heidrich H, Hoffmann D. Endless polarization control systems for coherent optics. *J Lightwave Technol*, 1988,6(7): 1199~1208
- 4 王海晏,安毓英,杨廷梧. 偏振模色散的偏振主态旋转补偿. 光子学报,2003,32(11): 1302~1305
Wang H Y, An Y Y, Yang T W. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(11): 1302~1305
- 5 Hirabayashi K, Amano C. Feed-forward continuous and complete polarization control with a PLZT rotatable-variable waveplate and inline polarimeter. *J Lightwave Technol*, 2003,21(9): 1920~1932
- 6 谢菊芳,张端明,王世敏,等. 透明 PLZT 电光陶瓷材料的制备与应用研究进展. 功能材料,1998,29(1): 1~7
Xie J F, Zhang D M, Wang S M, et al. Progress on the fabrication and application of transparent electrooptic PLZT ceramic materials. *Journal of Function Materials*, 1998,29(1): 1~7
- 7 Sampei Y, Naito S. PLZT fiber-optic switch. *J Lightwave Technol*, 1987, LT-5(9): 1203~1206
- 8 Hirabayashi K, Amano C. Variable and rotatable waveplates of PLZT electrooptic ceramic material on planar waveguide circuits. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002,14(7): 956~958
- 9 叶宇煦,曾庆济,段耀明. 应用双面电极的 PLZT 横向电调制器电场的精确解. 光学学报,1997,17(5): 604~608
Yeh Y X, Zeng Q J, Duan Y M. Exact analysis of the electric field for transverse electro-optic modulator using double-sided electrodes. *Acta Optica Sinica*, 1997,17(5): 604~608
- 10 Title M A, Lee S H. Modeling and characterization of embedded electrode performance in transverse electrooptic modulator. *Appl Opt*, 1990,29(1): 85~98
- 11 Tanaka K, Yamaguchi M, Seto H, et al. Analyses of PLZT electrooptic shutter and shutter array. *Japan J Appl Phys*, 1985,24(2): 177~182
- 12 Wu A Y, Chen T C, Chen H Y. Model of electrooptic effects by Green function and summary representation; applications to bulk and thin film PLZT displays and spatial light modulators. Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1992. 600~603

Research of Polarization Controller Based on Single Rotatable-Variable Waveplate

Li Weiwen¹, Jin Xiaofeng¹, Zhang Xianmin¹, Chen Kangsheng¹, Zou Yingyin^{1,2}

¹ Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

² Boston Applied Technologies, Inc. Woburn, MA 01801, USA

Received date:2004-10-20

Abstract The electro-optic effect and the field distribution of Lead lanthanum zirconate titanate (PLZT) transparent ferroelectric ceramic waveplates are reviewed. The feedback single rotatable-variable PLZT waveplate polarization controller is constructed based on the variable retardation and rotatable axes of a PLZT waveplate. For this controller the simulated annealing algorithm is applied to dither optimization considering the limit of phase shift and the endless rotatable axes. Simulated research results show that this controller can transform any varying general input polarization state into an arbitrary linear output polarization state and in the desired direction more than 98% of total light intensity is attained. On controlling the phase shift can vary within $0\sim 2\pi$, so the fluctuation caused by resetting can be avoided.

Keywords Optical fiber communication; Polarization controller; Electro-optic effect; PLZT; Rotatable-variable waveplates



Li Weiwen was born in June, 1968, in Zhejiang, China. He received his B. S. in 1993 from Jilin University and his M. S. in 2002 from Zhejiang University. Now he is a Ph. D. candidate of Department of Information and Electronic Engineering in Zhejiang University. His research interests include fiber communication devices and systems.