

# 三波片型 $\text{LiNbO}_3$ 偏振态产生器的控制方案设计

黄春晖 荣维波

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要** 基于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的一次电光效应, 设计构造了三波片结构的延迟量控制型偏振控制器。提出将该偏振控制器作为偏振态发生器, 用于连续变量量子保密通信, 实现偏振态的快速转换。并提出在通信系统中, 用单束信号光作为载波, 以两个正交的 Stokes 分量作为可观测和编码控制的物理量的通信方案, 分析了该方案的实现原理。构造了改进的模拟退火算法来完成偏振态快速转换的最优路径搜索, 搜索步长设定为电压值小于 2.5 V 的随机值, 不仅能保证外加控制电压的渐变性和实际硬件电路的实现, 还能消除器件构造瑕疵的影响。通过控制过程仿真, 验证了该方案的可行性。提出用数字信号处理器(DSP)控制偏振态转换过程, 进而实现高速信息编码的电路设计方案。

**关键词** 光学器件; 偏振控制器; Stokes; 模拟退火算法; 保密通信

**中图分类号** O436; TP15 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.052303

## A Control Scheme of Polarization Generator Based on Three $\text{LiNbO}_3$ Wave Plates

Huang Chunhui Rong Weibo

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract** Based on Pockels effect of  $\text{LiNbO}_3$  crystal, a retardation-control-type polarization controller (PC) of three wave plates is designed. Creatively using the polarization controller as polarization generator for continuous variable quantum key distribution (CVQKD), the rapid conversion of polarized states is achieved. The proposed communication system uses a single-channel optical signal as a carrier, and the two orthogonal Stokes components as a physical quantity can be observed and encoding controlled. The implementation principle of the proposal is analyzed and verified. An improved simulated annealing algorithm (SAA) is constructed to complete the search of the optimal path for the rapid conversion of polarized states. The voltage value of the search step is set below 2.5 V, which not only guarantees the applied control voltage gradient and benefits the actual hardware circuit design, but also eliminates the influence of the device structure defects. Control process simulation is carried out to verify the feasibility of the scheme implementation. The actual circuit is suggested to be designed using a digital signal processor (DSP) to complete the entire control process, and further a high-speed information encoding.

**Key words** optical devices; polarization controller; Stokes; simulated annealing algorithm; encryption communication

**OCIS codes** 230.2090; 260.1180; 260.1440; 260.5430; 270.5568

## 1 引言

量子保密通信<sup>[1,2]</sup>是基于海森伯测不准关系和不可克隆原理的通信模式, 具有无条件安全通信的优势, 成为保密通信领域的研究热点之一。相较于单光子量子密码通信, 连续变量量子密码通信具有明显的优势, 因此越来越受人们的关注<sup>[3,4]</sup>。目前, 一般采用高斯态相干光信号作为载波, 用幅度和相位调制器<sup>[5]</sup>对光信号的两个正交分量振幅和相位进行编码, 实现连续变量量子密钥分配。此种方案是基于马赫-曾德尔(MZ)

**收稿日期**: 2013-01-18; **收到修改稿日期**: 2013-02-08; **网络出版日期**: 2013-04-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(61177072)资助课题。

**作者简介**: 黄春晖(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事量子通信与集成电路设计等方面的研究。

E-mail: hchfzu@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

干涉仪的双光路通信,通信过程中很难保证光信号的同步性和相干性。此外,现在仍没有足够快的相位调制器来满足实际相位编码的需要。因此,研究新的通信方案是非常必要的。最近,黄春晖<sup>[6]</sup>提出采用单光路传输方式,以 Stokes 两个正交分量  $S_2$  和  $S_3$  取代幅度和相位作为可操作量,并用偏振控制器来实现两个正交分量的控制转换,可以克服双光路传输的弊端,并简化了信息编码控制的过程。

偏振控制器是光通信研究领域关键的器件之一,其作用是实现偏振态的转换。目前已经有多种偏振控制器,但一般都用来完成偏振除噪或者偏振补偿,实现保偏功能<sup>[7,8]</sup>。本文基于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的一次电光效应,设计构造了三波片结构的延迟量控制型偏振控制器,提出用偏振控制器来完成 Stokes 参量的快速转换,将其用于连续变量量子保密通信,实现偏振态编码。根据偏振态编码需要,运用新的控制算法,设计构造出适合完成上述过程的硬件电路系统,实现基于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的偏振控制器。通过改变晶体外加电压,得到所需的延迟量组合,进而完成快速偏振转换。从理论上对控制方案进行了分析,通过仿真验证该控制算法的适应性以及方案实现的可行性。

## 2 实现方案分析

### 2.1 理论基础

光偏振态最常用的表示方法是 Stokes 参量法和庞加莱球图示法。前者把一个偏振态用一组 Stokes 参量  $\mathbf{S}=[S_0, S_1, S_2, S_3]$  表示,每一个 Stokes 参量都有明确的物理意义: $S_0$  表示偏振光总的光强; $S_1$  表示参考系水平方向与垂直方向之间的光强差; $S_2$  表示参考系  $\pm 45^\circ$  正交方向之间的光强差; $S_3$  表示右旋圆偏振光和左旋圆偏振光之间的光强差。Stokes 参量直接与光强相对应,便于光偏振态的检测与分析。庞加莱球是 Stokes 参量的几何表示,如图 1 所示,庞加莱球面上的一个点唯一对应一个完全偏振态。

在量子状态下,Stokes 参量满足

$$\Delta \hat{S}_2 \cdot \Delta \hat{S}_3 \geq |\langle \hat{S}_1 \rangle|. \quad (1)$$

式中  $\Delta \hat{S}_2, \Delta \hat{S}_3$  分别表示 Stokes 算符  $\hat{S}_2, \hat{S}_3$  测量结果的标准差。(1)式表明,对于 Stokes 参量,只要  $\langle \hat{S}_1 \rangle$  分量不为零,  $S_2$  和  $S_3$  两个 Stokes 分量就不能同时精确测量。这说明这两个正交的 Stokes 算符满足海森伯测不准原理和量子不可克隆原理,可以将其作为量子保密通信中的可操作算符<sup>[5]</sup>。选择  $S_2$  和  $S_3$  作为可操作量,是因为它们较容易测量和调制,可以通过偏振控制器直接完成态的控制转换。

### 2.2 关键器件

偏振控制器是光通信系统中最重要元件之一。虽然目前已存在多种偏振控制器,但一般用来消除偏振模色散等偏振相关损耗,起到保偏的作用,鲜有将偏振控制器用于连续变量相干光通信中进行信息编码的报道。也就是说,偏振控制器实质上是起偏振补偿和扰动的作用,而我们需要能随机地将一种偏振态转换成另一种偏振态的偏振态发生器。

为了实现偏振态点在庞加莱球面的遍历性和无端控制,目前应用最多并且效果最好的是三波片或者三波片以上的电光晶体偏振控制器<sup>[9,10]</sup>。综合各方面因素考虑,选用基于  $\text{LiNbO}_3$  晶体的三波片型偏振控制器作为实验的关键器件<sup>[11]</sup>。其基本结构如图 2 所示。

$\text{LiNbO}_3$  电光晶体具有明显的一次电光效应。根据其晶格结构以及切割方向的不同,主要有两种结构能充分利用其电光效应<sup>[8]</sup>。其一是沿  $Z$  方向切割,外加  $X$  方向电场,使光沿  $Z$  轴方向传播,称为  $Z$  型晶体。根据  $\text{LiNbO}_3$  的电光系数矩阵,可以得到晶体相位延迟量与施加电场之间的关系以及主光轴方位角的变化为

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_t - n_s) = \frac{2\pi l}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} E_x, \\ \alpha_1 = 45^\circ \end{cases} \quad (2)$$

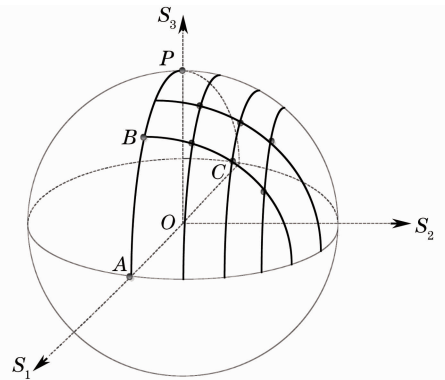
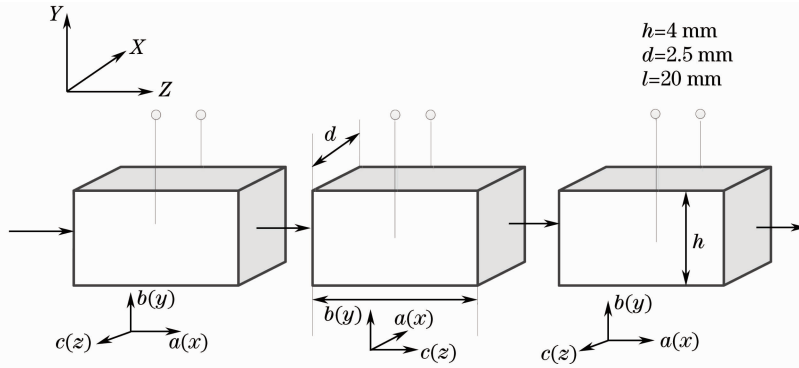


图 1 Stokes 参量与庞加莱球

Fig. 1 Stokes parameters and the Poincaré sphere

图2 LiNbO<sub>3</sub> 偏振控制器结构Fig. 2 Structure of the polarization controller based on LiNbO<sub>3</sub>

式中  $\lambda$  为实验选用激光器出射波的波长,  $\lambda = 808 \text{ nm}$ ;  $n_f$ ,  $n_s$  分别为晶体快轴和慢轴方向的折射率;  $n_o$  为晶体双折射现象中寻常光折射率;  $E_x$  表示 LiNbO<sub>3</sub> 晶体  $a(x)$  方向所加电压; 其二是沿  $X$  方向切割, 外加  $Z$  方向的电场, 使得光沿  $X$  方向传播, 称为  $X$  型晶体。类似地, 可得到相位延迟量与施加电场之间的关系以及晶体主光轴方位角的变化为

$$\begin{cases} \delta_2 = \frac{2\pi l}{\lambda}(n_o - n_e) + \frac{2\pi l}{\lambda} \left( \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E_z \right), \\ \alpha_2 = 0^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中  $n_e$  为晶体双折射现象中非寻常光折射率;  $E_z$  表示 LiNbO<sub>3</sub> 晶体  $c(z)$  方向所加电压; LiNbO<sub>3</sub> 晶体具有

$$3 \text{ m 的晶体对称性, 其电光系数为 } \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ (2) 式中的 } \gamma_{22} \text{ 和 (3) 式中的 } \gamma_{33}, \gamma_{13} \text{ 均为电光系数。}$$

根据(2)、(3)式可知, 上述  $Z$  型晶体相当于主光轴与  $X$  轴成  $45^\circ$  夹角的延迟波片;  $X$  型晶体相当于主光轴与  $X$  轴成  $0^\circ$  的延迟波片。据此, 构造如图 2 所示  $XZX$  结构的三波片型偏振控制器, 以实现偏振态转换的控制。上述两种晶体对偏振光的转换作用反映在庞加莱球面上, 第一块和第三块晶体使得庞加莱球面上的偏振态点绕  $OS_2$  轴沿球面旋转; 第二块晶体使得偏振态点绕  $OS_1$  轴沿球面旋转, 旋转的弧度即为 LiNbO<sub>3</sub> 晶体所引入的相位延迟量。可用 Mueller 矩阵分别表示两种晶体对入射偏振光的作用, 其中  $\delta$  是晶体引入的延迟相位。

根据实验系统要求, 可以将偏振态点遍历限制在庞加莱球面的特定区域, 三块晶体各自分担部分电压, 降低晶体外加偏压。实际上用两块晶体就能满足实验系统要求, 为了简化实际控制, 选用两块晶体结构的偏振控制器<sup>[12,13]</sup>进行分析。

两块晶体的 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{M}_1(45^\circ, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & 0 & -\sin \delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \delta & 0 & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2(0^\circ, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

实验室所用入射偏振态是  $X$  方向的线偏振光, 如图 1 所示, 与庞加莱球面上的点  $A$  对应, 并且可以表示为  $\mathbf{S}_i = [1, 1, 0, 0]$ 。经上述偏振控制器控制后得输出偏振态为

$$\mathbf{S}_o = \mathbf{M}_2 \times \mathbf{M}_1 \times \mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \delta_1 \\ \sin \delta_1 \sin \delta_2 \\ \sin \delta_1 \cos \delta_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的电光性质以及(2)、(3)式,并将晶体各参数代入,计算得出外加控制电压与晶体延迟相位之间的关系为

$$\begin{cases} \delta_1 = 0.0049V_1 \\ \delta_2 = 1.571 + 0.006542V_2 \end{cases}. \quad (6)$$

联立(5)、(6)式得到

$$\begin{cases} S_{o2} = \sin \delta_1 \sin \delta_2 = \sin(0.0049V_1) \cos(0.006542V_2) \\ S_{o3} = \sin \delta_1 \cos \delta_2 = -\sin(0.0049V_1) \sin(0.006542V_2) \end{cases}. \quad (7)$$

从(7)式看出,只需改变晶体组的外加电压,就能得到期望的任意偏振态。如图1所示,按照两波片型偏振控制器的实现原理,第一块晶体的作用是将固定输入偏振态点A绕OS<sub>2</sub>,沿大圆周AP旋转至过渡偏振态点B;第二块晶体的作用是将过渡偏振态点B绕OS<sub>1</sub>,沿圆周BC旋转至目标偏振态点C。完成以上控制后,可以将球面上的初始偏振态,通过偏振控制器转换到达目标偏振态,实现偏振转换。

### 2.3 实验验证

为了验证所构造偏振控制器的功能,搭建了图3所示的实验系统,验证偏振控制器对偏振光的变换作用。

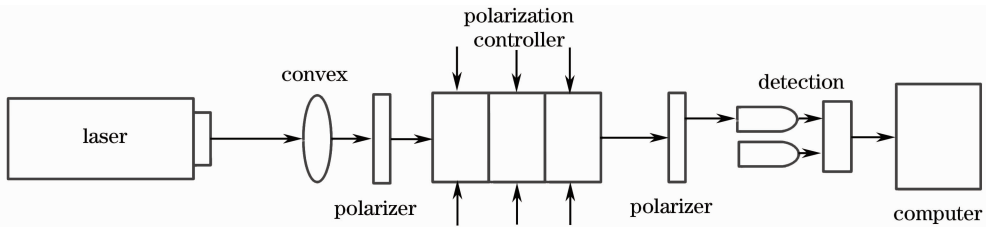


图3 偏振控制器功能验证光路

Fig. 3 Functional verification optical path of polarization controller

实验中对第二块晶体外加电压。当外加电压时,检偏前的出射光为

$$E_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_3) \end{bmatrix} \cos \frac{\delta_2}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \tan \frac{\delta_2}{2} \\ -i \tan \frac{\delta_2}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_2}{2} \\ -i \exp(i\delta_3) \sin \frac{\delta_2}{2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

经水平检偏器后,检测的光强为

$$I = \cos^2 \frac{\delta_2}{2} = \cos^2 \left( \frac{0.0049V_2}{2} \right) = \cos^2(0.00245V_2). \quad (9)$$

对于外加电压  $V_2$  为 0~42 V,变化步长为 6 V 的情况,得到图4所示测量曲线。

图4中纵坐标  $i$  为测量光强对应的转换电流值,横坐标为测试时间  $t$ 。测量结果基本符合理论推导,证明所构造的偏振控制器能完成预期的偏振转换功能。

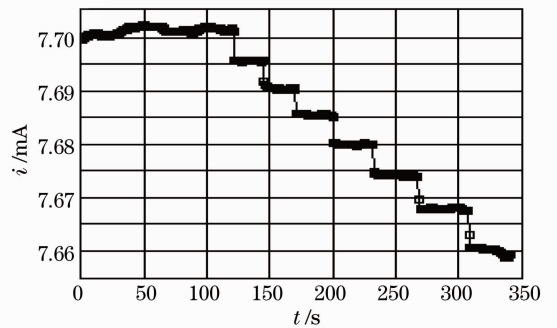


图4 偏振控制器功能验证结果

Fig. 4 Functional verification results of polarization controller

## 3 控制算法仿真

### 3.1 系统控制构架

由于一般的控制电路只能输出较小信号,而 LiNbO<sub>3</sub> 偏振编码器需要较大电压,所以,需要电压放大电路来完成这一功能。根据实验系统要求,所需的偏振控制原理如图5所示。其中,初始偏振态是指由激光器

发出的经聚焦、光隔离等处理之后得到的  $X$  方向线偏振光;目标输出态是指经偏振转换后的期望偏振态。控制电路执行搜索算法得到一组控制电压值,使电压放大器产生一组最佳电压,驱动偏振控制器完成偏振态转换,实现偏振态编码。

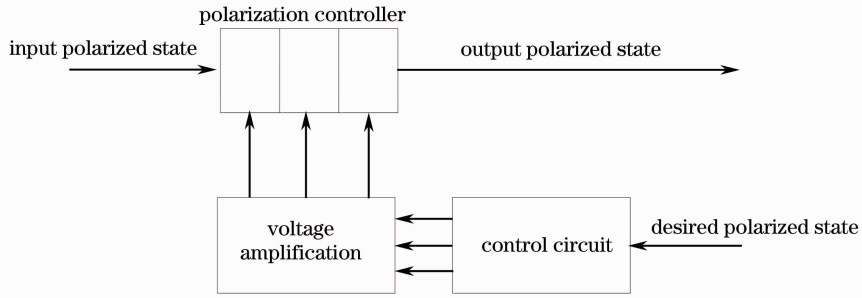


图 5 系统中的偏振控制模块

Fig. 5 Polarization control module in the system

### 3.2 改进的模拟退火算法(SAA)流程图

在实验过程中,需要通过控制电路执行搜索算法得到一组最优的电压值组  $[V_1, V_2]$ ,以得到期望的输出偏振态  $[S_{o2}, S_{o3}]$ 。模拟退火算法<sup>[14-16]</sup>是通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性,来有效避免陷入局部极小,最终趋于全局最佳的串行优化结构算法,特别适合组合优化。

根据算法特点,结合实际应用需要,对 SAA 进行一些改进,使其更适合此处的组合优化。将搜索步长设定为电压值小于 2.5 V 的随机值,进行逐次变步长搜索,获得期望电压值组合,进而得到目标偏振态点。这样改进不仅能保证外加控制电压的渐变性和实际硬件电路的实现,还能消除器件构造瑕疵的影响。具体控制流程如图 6 所示,其中,  $T$  为模拟退火算法的温度;  $L_i$  和  $L_o$  分别为算法的最大内循环次数和最大外循环次数;  $\lambda$  为温度更新系数;  $\epsilon$  为输出判定阈值;  $V, S$  分别表示电压值组及与之对应的 Stokes 矢量;  $N_i$  和  $N_o$  分别表示内循环次数和外循环次数;  $\beta$  表述目标函数值; 带有下标  $N$  的量表示新产生的值。

## 4 仿真结果与分析

根据图 6 的算法流程,选用的关键函数有温度更新函数  $T=\lambda T$  和状态产生函数。为避免搜索过程中产生较大的电压突变,搜索步长设定为电压值小于 2.5 V 的随机值,目标函数值为  $\beta$ ,即通过搜索得到的新的电压值组对应的偏振态点与期望偏振态点之间的差值。

设置初温为  $T=1$ ,判定输出阈值  $\epsilon=0.0001$ ,温度更新函数  $\lambda=0.5$ ,最大内循环次数和最大外循环次数分别为  $L_i=20, L_o=50$ 。根据流程图,对控制过程进行仿真,随机产生 1000 个目标输出点。为了把所需的外加控制电压限制在较小区间内,设定这些偏振态点的 Stokes 参量值  $S_{o2}$  和  $S_{o3}$  介于  $0\sim 0.5$  之间,这样可以保证  $V_2$  在  $0\sim 240$  V 区间变化,  $V_1$  在  $0\sim 160$  V 区间变化。图 7 是整个控制过程中两块晶体上的电压变化趋势曲线,从图中可以看出,在完成偏振态转换的过程中,施加的外加电压是连续变化的,并且所加电压值

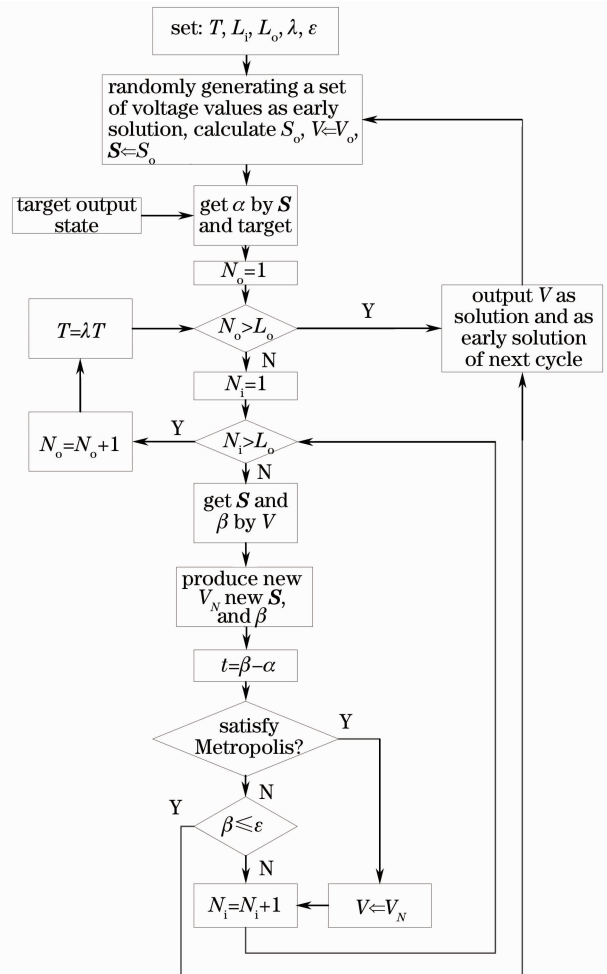


图 6 改进的 SAA 流程图

Fig. 6 Flow chart of improved SAA

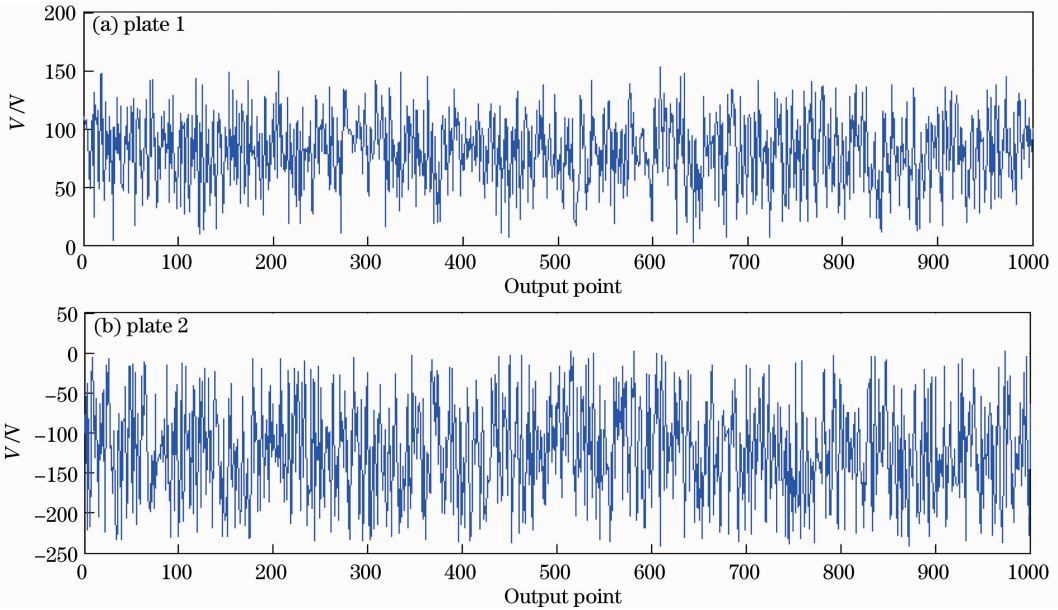


图7 控制过程中晶体外加电压的变化

Fig. 7 Curves of applied voltage on the crystal in the control process

始终保持在设定范围之内,完全符合设计的要求。

仿真结果表明,用3.2节设计的改进型SAA算法,偏振产生器可以实现所需的偏振转换,且控制偏压在预想的范围内变动。进行深入研究,对完成一次偏振转换时晶体外加电压的变化过程进行仿真,得到如图8所示变化曲线。该仿真中设定初始控制偏压为1 V以内的随机值,期望输出偏振态所对应的输出偏压为 $V_1 = 141.8$  V,  $V_2 = -137$  V,设定算法搜索步长为不超过2.5 V的随机值。

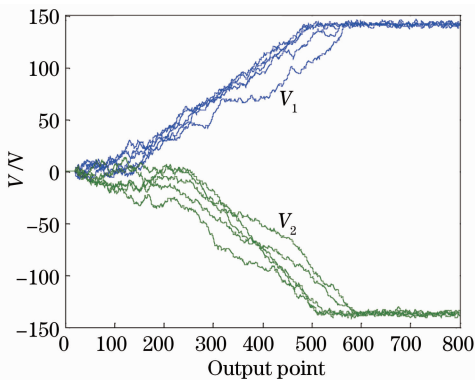


图8 完成一次偏振转换晶体外加电压变化

Fig. 8 Curve of applied voltage in once polarization conversion

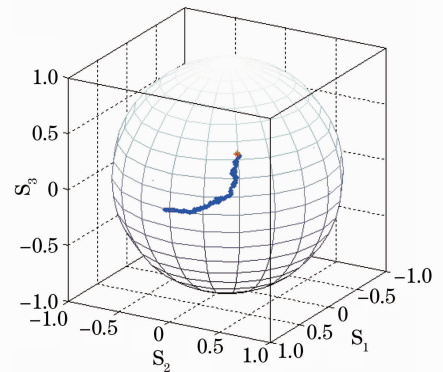


图9 反映在庞加莱球上的偏振态转换

Fig. 9 Polarization conversion process on the Poincaré sphere

图8中对同一设定值进行5次仿真,与之对应的仿真输出电压值分别为 $V_1, V_2$ :141.6, -135.9;141.1, -136.3;141.1, -137;143, -135.4;140.5, -137.1(单位为V)。结果显示,在整个变化过程中,晶体外加电压都是渐变的,没有出现跳变和突变,且达到期望偏振态之后,晶体外加偏压维持一段时间作为数据采集时间,这对于实际的应用来说很重要。另外,通过搜索算法得到的输出电压值与期望输出值之间存在一定的误差,可以根据实际需要,设定算法内外循环次数及输出阈值,得到满足实验需要的精度值。

图9表示上述控制过程中偏振态点在庞加莱球上的变化路径,在控制过程中偏振态点连续地变动,对应于晶体外加电压值连续变化。完成一次偏振转换之后,所得的电压值组直接作为下一次控制变换的初始电压值组,继续参与控制。这样就可以通过实验所用的偏振态产生器控制,由固定偏振态点连续地得到期望偏振态,进而完成连续偏振态的产生。图中红色点分别代表最初输入偏振态和最后输出的偏振态,绿色点代表期望输出偏振态,很明显,控制所得输出偏振态点与期望偏振态点重合。

## 5 结 论

根据连续变量相干光通信的需要,利用  $\text{LiNbO}_3$  晶体的电光特性,设计了一种 XZX 三波片结构的相位延迟型偏振态发生器。提出以 Stokes 两个正交参量  $S_2$  和  $S_3$  作为可操作量,采用改进型的 SAA 算法,设计串联式偏振控制器方案,完成偏振态的快速转换,实现偏振编码。利用 Matlab 编程,完成对控制算法及过程的仿真和验证,结果表明改进型的 SAA 算法和串联式控制方式在控制适应性方面和偏振态转发进程上,均能满足连续变量相干光通信的需要。以设计方案为依据,构建以数字信号处理器(DSP)为核心的硬件控制系统,实现连续变量相干光通信的偏振编码。

## 参 考 文 献

- Zeng Guihua. Quantum Cryptography [M]. Beijing: Science Press, 2006  
曾贵华. 量子密码学[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- Ma Ruilin. Quantum Cryptography Communication [M]. Beijing: Science Press, 2006  
马瑞霖. 量子密码通信[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- K. Kikuchi. History of coherent optical communication and challenges for the future[C]. 2008 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, 2008. 107~108
- C. H. Bennett. Quantum cryptography using any two nonorthogonal states[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(21): 3121~3124
- Tang Zhilie, Li Ming, Wei Zhengjun *et al.*. The quantum key distribution system based on polarization states produced by phase modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2534~2539  
唐志烈, 李 铭, 魏正军 等. 相位-偏振编码量子保密通信系统的研究[J]. 物理学报, 2005, **54**(6): 2534~2539
- Huang Chuihui. Theoretical and Experimental Study of Continuous Variable Coherent Optical Communication in Single Space Mode [OL]. National Natural Science Foundation of China. <http://isisn.nsf.gov.cn/egrantweb/>  
黄春晖. 用空间单模实现连续变量相干光通信的理论实验研究 [OL]. 国家自然科学基金网. <http://isisn.nsf.gov.cn/egrantweb/>
- F. Grosshans, G. V. Assche, J. Wenger *et al.*. Quantum key distribution using Gaussian-modulated coherent states[J]. *Nature*, 2003, **421**(6920): 238~241
- Yao Jianguo. Polarization control technique for coherent optical communications[J]. *Optical Communication Technology*, 1992, **16**(1): 13~28  
姚建国. 相干光通信系统中的偏振控制技术[J]. 光通信技术, 1992, **16**(1): 13~28
- H. Shimizu, K. Kaede. Endless polarization controller using electro-optic waveplates [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(7): 412~413
- C. K. Madsen, P. Oswald, M. Cappuzzo *et al.*. Reset-free integrated polarization controller using phase shifters[J]. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(2): 431~438
- A. J. Haasteren, J. J. D. Tol, M. V. D. E. Al. Modeling and characterization of an electrooptic polarization controller on  $\text{LiNbO}_3$ [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(7): 1151~1157
- K. Hirabayashi, C. Amano. Feed-forward continuous and complete polarization control with a PLZT rotatable-variable waveplate and inline polarimeter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 1920~1932
- L. Dupont, W. Rong, J. Vivalda. Endless polarization control using two rotatable wave plates with variable birefringence [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **252**(1-3): 1~6
- M. Martinelli, R. AChipman. Endless polarization control algorithm using adjustable linear retarders with fixed axes[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 2089~2096
- Li Weiwen, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng *et al.*. A study for phase-shift characteristics of polarization controller based on simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 449~453  
李伟文, 章献民, 陈抗生 等. 基于模拟退火算法的偏振控制器波片相移特性研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 449~453
- Li Weiwen, Zhang Xianmin, chen Kangsheng *et al.*. Application of simulated annealing algorithm on endless polarization controller [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 820~824  
李伟文, 章献民, 陈抗生 等. 模拟退火算法在无端偏振控制器中的应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(6): 820~824