

# 基于适应性矩估计的偏振控制算法

夏骞, 张涛, 刘金璐, 杨杰, 何远杭, 黄伟, 李大双, 徐兵杰\*

西南通信研究所保密通信重点实验室, 四川 成都 610041

**摘要** 偏振控制可以有效恢复光纤传输过程中因相位偏移而受损的偏振态, 是量子通信、光纤传感以及相干光通信等领域中的关键技术。提出了一种基于适应性矩估计(Adam)的偏振控制算法, 建立了相应的偏振控制系统模型。基于该模型对 Adam 偏振控制算法进行了数值仿真, 并与经典的随机梯度下降(SGD)算法进行了对比, 同时分析了控制精度和噪声幅度对偏振控制效果的影响。仿真结果表明, 该算法可以快速收敛到目标偏振态, 在衰减率为 0.03、噪声幅度为 0.003、偏振迭代步数为 53 时, 控制精度可达  $10^{-4}$ 。与 SGD 算法相比, 平均迭代步数减少了 23%, 最高控制精度提升了 1~2 个数量级。基于现场可编程门阵列验证了 Adam 算法的可行性, 结果表明, 该算法能快速、稳定地补偿信道中的偏振变化, 并通过优化衰减率提高偏振控制效果、缩短偏振控制时间。

**关键词** 偏振控制; 偏振态; 适应性矩估计; 随机梯度下降算法; 现场可编程门阵列; 控制精度

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1526001

## Polarization Control Algorithm Based on Adaptive Moment Estimation

Xia Qian, Zhang Tao, Liu Jinlu, Yang Jie, He Yuanhang, Huang Wei,  
Li Dashuang, Xu Bingjie\*

Science and Technology on Communication Security Laboratory, Institute of Southwestern Communication,  
Chengdu, Sichuan 610041, China

**Abstract** Polarization control can effectively recover the polarization state shifted from the polarization phase drift during the fiber transmission, which is a key technology in quantum communication, optical fiber sensing, and coherent optical communication. In this paper, we propose a polarization control algorithm based on adaptive moment estimation (Adam) and establish a polarization control system model. Based on this model, the Adam polarization control algorithm is simulated and compared with classical stochastic gradient descent (SGD) algorithm, at the same time, the influences of control precision and noise amplitude on polarization control effect are analyzed. Simulation results show that the global optimal polarization state can be rapidly obtained by employing the proposed method. When the attenuation rate is 0.03, the noise amplitude is 0.003, and the number of polarization iterations is 53, the control precision is up to  $10^{-4}$ . Compared with the SGD algorithm, the average iterative steps are reduced by 23% and the maximum control accuracy can be improved by 1–2 orders of magnitude. The feasibility of Adam algorithm is verified by field programmable gate array. The proposed algorithm can quickly and stably compensate the polarization change in the channel, and the polarization control time can be effectively shortened by optimizing the value of attenuation rate.

**Key words** polarization control; polarization; adaptive moment estimation; stochastic gradient descent algorithm; field programmable gate array; control precision

**OCIS codes** 260.5430; 060.1660; 060.5565

## 1 引 言

激光光束的偏振控制技术广泛应用于相干光通信、光纤传感和量子通信等领域中, 对实现相关系统

的稳定性有重要作用。光波在单模光纤中传播时, 因光纤无法保证绝对的圆对称性和外界环境的影响, 会导致光纤中的两个正交偏振模式非简并, 产生光纤的双折射现象, 使偏振态发生漂移, 引起光信号

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-03-19; 录用日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61771439, 61702469, 61901425)、国家密码发展基金(MMJJ20170120)、国防科技创新特区项目(18-163-00-TS-004-040-01)、四川省青年科技基金(2017JQ0045, 2019JDJ0060)

\* E-mail: xbjpku@163.com

的偏振态随机变化<sup>[1-2]</sup>,从而导致光纤传输系统性能下降。在相干光通信中,由于光混频器对光信号的偏振态比较敏感,偏振相位漂移会降低光混频器的混频效率,影响系统的灵敏度<sup>[3]</sup>;在光纤传感系统中,偏振相位漂移会使信号相位发生变化,降低定位精度<sup>[4-5]</sup>;在量子密钥分发系统中,偏振相位漂移会引起干涉对比度的下降,导致误码率升高,严重时会导致密钥分发失败<sup>[6-12]</sup>。

光纤信道的实时偏振控制技术需要设计一种偏振控制光路,以获取可进行实时控制的反馈信号,同时采用电动偏振控制器(EPC)实现基于反馈信号的实时偏振控制,其核心是偏振控制光路和偏振反馈控制算法。2005年,李伟文等<sup>[13]</sup>利用模拟退火算法进行负反馈控制,通过控制各波片的相位得到所需的偏振态,其收敛后光强波动小于2%,但只进行了理论仿真;2008年,Li等<sup>[14]</sup>完成了基于模拟退火算法的偏振控制实验,证明了该算法的偏振控制响应时间小于400 μs;2010年,Xi等<sup>[15]</sup>利用粒子群算法优化了基于LiNbO<sub>3</sub>的多级偏振控制器,完全校准偏振控制器的所有步骤不超过1 min,但其控制速度和效率有限;2012年,Mamdoohi等<sup>[16]</sup>在PIC32MX微控制器上实现了基于遗传算法的偏振控制系统,在任何情况下都可以完成连续的偏振控制,且偏振控制响应时间小于300 ms;2017年,Su等<sup>[17]</sup>将随机并行梯度下降(SPGD)算法用于窄线宽放大器的偏振控制,偏振消光比可稳定达到11 dB;此外,和声搜索(HS)算法由于操作简单也在工程实践中得到了广泛应用,Omran等<sup>[18]</sup>采用线性增加局部扰动参数、指数减少扰动幅值等方法对HS算法进行优化,但仍然存在收敛精度低、易陷入局部最优等问题。

虽然国内外对光纤信道的偏振控制技术进行了较多的理论和实验研究,但仍存在控制精度低、控制时间长、易陷入局部最优等问题。适应性矩估计(Adam)算法因所需资源少、模型收敛快等优点被广泛应用于计算机视觉和自然语言处理等领域中。因此,本文提出一种基于Adam的新型偏振控制算法,并建立了相应的偏振反馈控制系统模型,仿真分析了控制精度和噪声幅值对偏振控制的影响。结果表明,与经典的随机梯度下降(SGD)算法相比,该算法能快速收敛到全局最优偏振态,平均迭代步数减少了23%,控制精度提升了1~2个数量级,且抗干扰能力更强。基于现场可编程门阵列(FPGA)进行了实验验证,结果表明,该算法可以对任意输入的偏振态实现快速、稳定的控制,并通过优化衰减率 $\alpha$ 提高偏振控制效果,可广泛应用于量子通信、光纤传感等对偏振控制技术要求较高的领域。

## 2 基于 Adam 算法的偏振控制理论及算法分析

### 2.1 基于 Adam 算法的偏振控制系统模型

基于Adam算法实现偏振控制的原理如图1所示。首先,激光器(laser)输出光信号,经光纤信道传输后,到达内部含有四个压电陶瓷挤压器(squeezer)的EPC,对光纤进行挤压,实现偏振控制。然后经过偏振检测器(polarization detector),将检测到的四路电信号输入算法控制单元(algorithm control unit),计算出所需的控制参量。最后将该参量传给EPC完成控制过程。通过算法迭代不断调整控制参量,直至输出稳定的目标偏振态,并用偏振测量设备(polarization measuring equipment)对偏振控制结果进行测量。

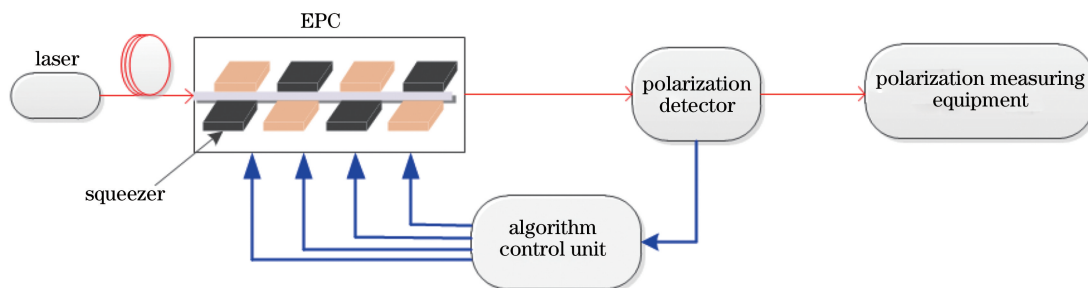


图1 基于 Adam 算法的偏振控制系统

Fig. 1 Polarization control system based on Adam algorithm

假设激光的传播距离为 $z$ ,则 $t$ 时刻光场在互相垂直的 $x$ 和 $y$ 方向上的分量可表示为

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $E_{0x}$ 和 $E_{0y}$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向上的光场振幅, $\omega$

为光场频率,  $k$  为波矢,  $\varphi_x$  和  $\varphi_y$  为  $x$  和  $y$  方向上的光场相位。可将(1)式改为

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right) \cos \Delta\varphi = \sin \Delta\varphi, \quad (2)$$

式中,  $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ , 即两个方向上的相对相位延迟量,  $\Delta\varphi$  和  $E_{0x}/E_{0y}$  共同决定了光束的偏振态<sup>[19]</sup>。

偏振光学中常用斯托克斯矢量  $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$  描述光波的强度和偏振态, 可表示为

$$\begin{cases} S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \Delta\varphi \\ S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \Delta\varphi \end{cases}, \quad (3)$$

式中, 对于完全偏振光,  $S_0 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ 。在无损耗传输的情况下  $S_0$  为常数, 可将斯托克斯矢量的分量  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  表示在一个庞加莱球上, 光波的任意偏振态, 与庞加莱球上的点一一对应<sup>[20]</sup>, 如图 2

所示。其中, 庞加莱球的两极表征左、右旋圆偏振光, 赤道上各点表征的是振动方向不同的线偏振光, 球面上任意点  $P$  为椭圆偏振光<sup>[21]</sup>。

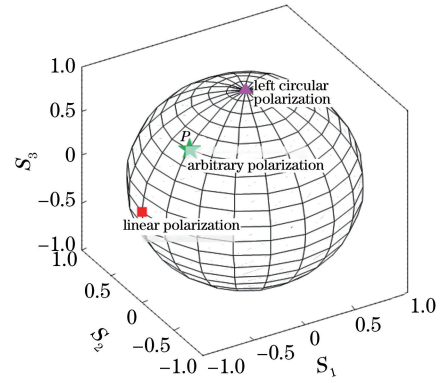


图 2 庞加莱球

Fig. 2 Poincare sphere

设挤压器旋转轴的方向向量为  $\mathbf{n} = (a, b, c)$ ,  $\theta(u)$  为延迟量, 是电压  $u$  的函数。则绕挤压器的旋转轴旋转任意角  $\theta$  的 Muller 矩阵表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a^2 + [1 - a^2 \cos \theta(u)] & ab[1 - \cos \theta(u)] - c \sin \theta(u) & ac[1 - \cos \theta(u)] + b \sin \theta(u) \\ ab[1 - \cos \theta(u)] + c \sin \theta(u) & b^2 + [1 - b^2 \cos \theta(u)] & bc[1 - \cos \theta(u)] - a \sin \theta(u) \\ ac[1 - \cos \theta(u)] - b \sin \theta(u) & bc[1 - \cos \theta(u)] + a \sin \theta(u) & c^2 + [1 - c^2 \cos \theta(u)] \end{bmatrix}. \quad (4)$$

假设输入偏振光为  $\mathbf{S}_{in} = (S_{in1}, S_{in2}, S_{in3})^T$ , 相继通过  $n$  个挤压器后, 输出光场的斯托克斯矢量  $\mathbf{S}_{out}$  可表示为

$$\mathbf{S}_{out} = \mathbf{M}_n \times \cdots \times \mathbf{M}_2 \times \mathbf{M}_1 \times \mathbf{S}_{in}. \quad (5)$$

通过(5)式可在已知输入偏振态与不同的反馈控制电压时, 解出输出偏振态。

偏振控制的原理是通过改变输入偏振态两个垂直分量的相位延迟量, 补偿由光纤信道传输引入的偏振漂移, 获得所需的目标偏振态。通常偏振控制器采用波片式、全光纤挤压式和基于电光、磁光效应等控制方式。挤压式偏振控制方式具有插入损耗

低、偏振相关损耗低、易实现等优点<sup>[22]</sup>, 因此实验基于取向固定、相位差可调的动态挤压式偏振控制器建立仿真模型。图 3 为光纤挤压式偏振控制器的内部结构, 由 4 个光纤挤压器构成, 分别定位于  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$  (顺序不同, 其他参数一致)。光纤挤压器从左到右依次记为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_4$ ,  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  为作用在挤压器上的压力,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  为挤压器的驱动电压。通过控制施加到偏振控制器的驱动电压, 产生相应压力挤压光纤, 使光纤发生双折射效应, 即光纤中两个垂直分量的相位差发生变化, 从而获得期望的光场偏振输出。

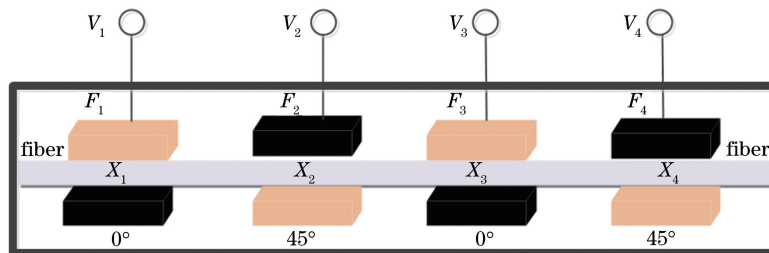


图 3 光纤挤压式电动偏振控制器结构

Fig. 3 Structure of optical fiber extruded electric polarization controller

基于压电陶瓷(PZT)的挤压式偏振控制单元是利用光纤的弹光效应对光纤中的偏振态进行控制<sup>[23]</sup>,该偏振控制器的内部结构与图3相同,由于第四个波片的作用只是重置偏振控制器,因此只需讨论前三个波片即可。研究表明,对于庞加莱球上任意一个输入偏振态,经前三个波片级联后的偏振控制,可得到任意一点的输出偏振态<sup>[24]</sup>。由于PZT具有良好的线性挤压特性,而光纤的相位延迟量与压力也是线性的,因此相位延迟量与施加在偏振控制器上的驱动电压也成线性关系<sup>[25]</sup>。

## 2.2 Adam 偏振控制算法流程

Adam算法是一种基于低阶自适应矩估计的随机目标函数梯度优化算法,由Kingma和Ba提出<sup>[26]</sup>。与传统的SGD算法相比,Adam算法不易陷入局部最优点,且更新速度快。由上述分析可知,输出光场的斯托克斯矢量是关于驱动电压的函数,即偏振控制器的控制算法在数学上属于多极值求解问题,也是一个寻优问题<sup>[27]</sup>,因此可利用Adam算法进行求解。Adam算法只需计算目标函数的梯度,算法中的衰减率是根据梯度的一阶和二阶矩估计值独立自适应选取的。

通过在控制单元上加载Adam优化算法,对偏振控制所需参量进行优化,控制施加在偏振控制器上的电压延迟量大小,以实现更快、更稳定的输出结果。设计的偏振控制流程如下。

1) 已知初始化偏振控制器三个方向上的分量。

2) 根据(4)式,求出三个挤压器的Muller矩阵 $M_1, M_2$ 和 $M_3$ 。

3) 输入偏振态的斯托克斯矢量 $S=(S_{in1}, S_{in2}, S_{in3})^T$ 与目标偏振态的斯托克斯矢量 $S_{aim}=(S_{a1}, S_{a2}, S_{a3})^T$ 。

4) 判断是否需要偏振控制,设置收敛精度为 $S_{th}$ ,计算通过偏振控制器后的输出偏振态 $S_{out}=M_1 \times M_2 \times M_3 \times S_{in}$ ,反馈条件为 $S_{aim}$ 与 $S_{out}$ 的欧氏距离 $\Delta S=\sqrt{|S_{aim}-S_{out}|}$ ,如果 $\Delta S > S_{th}$ ,则需要偏振控制,否则不需要。

5) 若要偏振控制,则利用算法控制单元上的Adam算法,进行多次迭代运算,直至 $\Delta S \leq S_{th}$ ,即 $S_{out}$ 在 $S_{aim}$ 附近,完成偏振控制过程。

其中,Adam算法的更新规则如下。

1) 计算 $\tau$ 时间内的梯度 $g_\tau = \nabla S(\theta_{\tau-1})$ ,其中,

$\theta_\tau$ 为 $\tau$ 时刻延迟量与电压的函数。

2) 计算梯度的指数移动平均数 $m_\tau$

$$m_\tau = \beta_1 m_{\tau-1} + (1 - \beta_1) g_\tau, \quad (6)$$

式中,初始化 $m_0=0, \beta_1=0.9$ 为一阶矩估计的指数衰减率,控制权重分配(动量与当前梯度)。

3) 计算梯度平方的指数平均数 $v_\tau$

$$v_\tau = \beta_2 v_{\tau-1} + (1 - \beta_2) g_\tau^2, \quad (7)$$

式中,初始化 $v_0=0, \beta_2=0.9$ 为二阶矩估计的指数衰减率,控制之前梯度平方的影响情况,对梯度平方进行加权均值,

4) 由于 $m_0$ 初始化为0,会导致 $m_\tau$ 偏向于0,因此需要对梯度均值 $m_\tau$ 进行偏差修正,降低偏差对训练初期的影响,可表示为

$$\hat{m}_\tau = \frac{m_\tau}{(1 - \beta_1^\tau)}. \quad (8)$$

5) 用相同的方法对梯度平方均值 $v_\tau$ 进行偏差修正

$$\hat{v}_\tau = \frac{v_\tau}{(1 - \beta_2^\tau)}. \quad (9)$$

6) 将参数更新为

$$\theta_\tau = \theta_{\tau-1} + \alpha \times \frac{\hat{m}_\tau}{(\sqrt{\hat{v}_\tau + \epsilon})}, \quad (10)$$

式中, $\alpha$ 为迭代的衰减率, $\epsilon=10^{-8}$ (防止迭代过程中出现负值)。

综上所述,确定参数 $\alpha, \beta_1, \beta_2$ 和目标函数之后,初始化 $t, m_0$ 和 $v_0$ 。当参数 $\theta$ 没有收敛时,循环迭代更新每个参数。

## 3 数值仿真及结果分析

### 3.1 基于Adam算法的偏振控制过程

基于Adam算法的更新规则,对 $0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ 三个波片的相位延迟量 $\theta_0, \theta_{45}, \theta'_0$ 进行迭代优化,仿真非理想情况下的偏振控制过程。由于实验无法遍历所有偏振态,因此选取5个特殊点位进行偏振控制,5个不同输入偏振态(Input SOP)到目标偏振态(Aim SOP)的偏振控制过程以及完成控制所需的迭代步数如表1所示。其中1和2为极点,分别表示左、右旋圆偏振光,3和4为赤道上的点,表示线偏振光,5为庞加莱球上任意一点,表示椭圆偏振光。

表1 输入/输出偏振态与迭代步数

Table 1 Input/output polarization and iteration step

Point	Input SOP	Aim SOP	Number of iteration steps
1	(0,0,1)	(0,1,0)	81
2	(0,0,-1)	(0,1,0)	76
3	(1,0,0)	(0,1,0)	48
4	(-1,0,0)	(0,1,0)	55
5	(0.62,-0.73,-0.28)	(0,1,0)	74

为了更加直观地呈现算法的实现过程,仿真了偏振态在庞加莱球上的变化情况,如图4所示。可

以看出,Adam算法能实现从随机选取的输入偏振态到目标偏振态的快速、稳定的偏振控制。

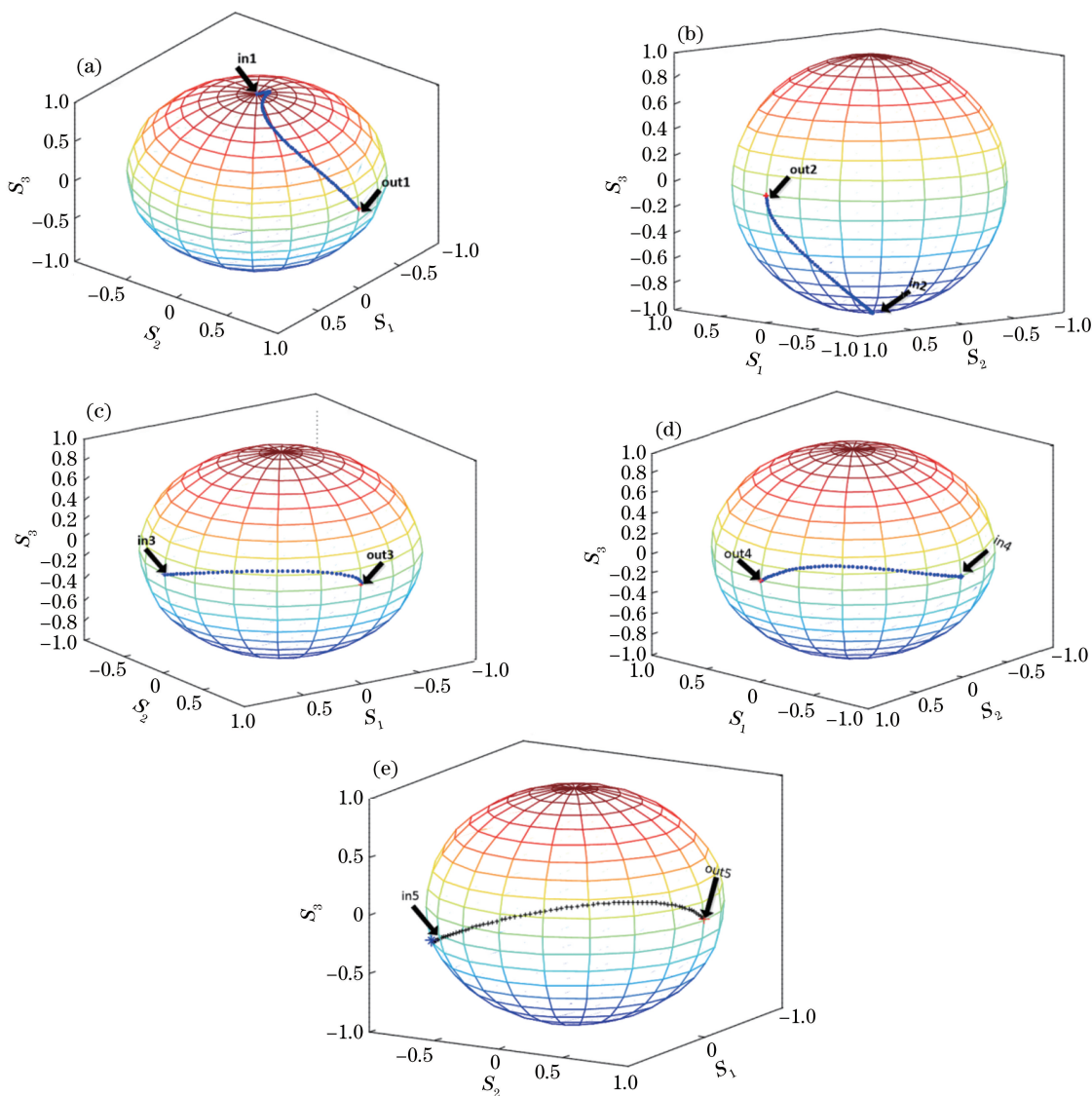


图4 5个不同偏振态的偏振控制过程。(a)~(e)偏振态1~5

Fig. 4 Polarization control process of 5 different polarization states. (a)–(e) Polarization state 1–5

### 3.2 Adam 算法性能分析

基于Adam算法的偏振控制仿真中,影响算法收敛速度和精度的主要因素有噪声误差的幅值、控制精度等。为了实现快速和优化的偏振控制,通过Matlab对上述因素进行分析。

#### 3.2.1 控制精度及衰减率对补偿性能的影响分析

Adam算法通过计算梯度的一阶矩估计和二阶矩估计,为不同参数设计独立的自适应衰减率。仿真时参量 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 和 $\epsilon$ 使用推荐的缺省值,分别为0.9、0.9、 $10^{-8}$ ,只需对Adam的衰减率(步长因子) $\alpha$ 进行调整,控制权重的更新比率,从而在相同条件下得到更好的控制性能。在噪声幅度 $\gamma=0.003$ ,控制精

度 $S_{th}=10^{-4}$ 的条件下, $\alpha$ 分别取0.01(推荐值)、0.02、0.03和0.04时,Adam算法从初始偏振态(1, 0, 0)收敛到目标偏振态(0, 1, 0)的迭代曲线如图5所示。可以看出, $\alpha$ 越小,算法的单步迭代步长越小、控制精度越高,所需要的迭代步数相应就越多; $\alpha$ 越大,算法的单步迭代步长越大,迭代曲线在开始时斜率越高,其初始迭代更快。

为了进一步体现衰减率、控制精度和迭代步数之间的关系,在噪声幅度 $\gamma=0.003$ ,衰减率 $\alpha$ 分别取0.01、0.02、0.03和0.04的情况下,统计相应可实现的最高控制精度及所需迭代次数,结果如表2所示,其中N/A表示无法完成迭代。可以发现,控制

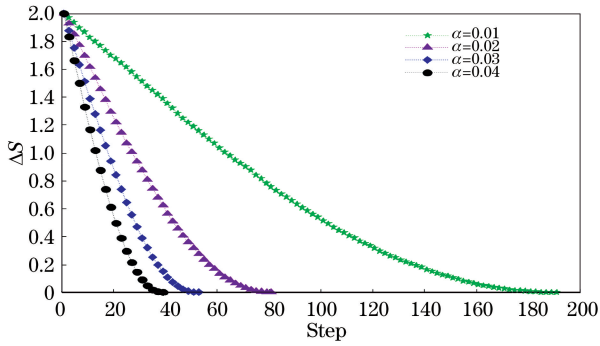


图 5 不同衰减率情形下的迭代曲线

Fig. 5 Iteration curves at different decay rates

精度越高,所需的迭代步数越多,收敛速度越慢;衰减率  $\alpha$  越大,所需的迭代步数越少,收敛速度越快。当控制精度较高时,过高的衰减率会造成无法迭代到目标偏振态,即无法完成偏振控制。

表 2 Adam 算法在不同衰减率下的最高控制精度及迭代步数

Table 2 Maximum Control accuracy and iteration steps of Adam algorithm under different attenuation rates

$\alpha$	$S_{th}$				
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
0.01	176	186	189	192	191
0.02	77	81	82	101	N/A
0.03	50	52	53	N/A	N/A
0.04	37	39	N/A	N/A	N/A

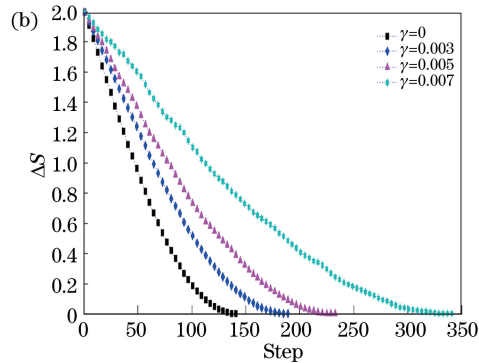
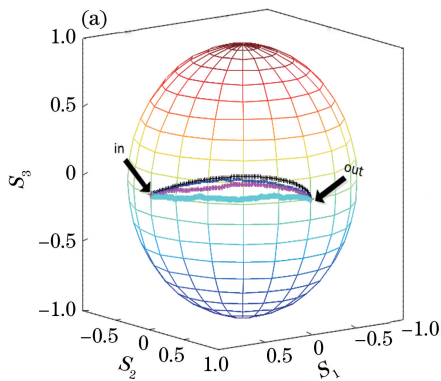


图 6 不同噪声幅度情形下的实验结果。(a)不同噪声幅度情形下的控制过程;(b)不同噪声幅度情形下的迭代曲线

Fig. 6 Experimental results of different noise amplitudes. (a) Control process of different noise amplitudes;

(b) iterative curves of different noise amplitudes

由于光信号在传输过程中周围存在噪声,对偏振系统的抗干扰能力提出了更高的要求。根据上述仿真结果,Adam 算法在噪声幅度  $\gamma = 0.007$  时,也可以保证从设定的输入偏振态逐步收敛到目标偏振态的控制,证明了 Adam 算法具有良好的抗干扰性能。

因此,在噪声幅度一定的条件下,选择合适的衰减率  $\alpha$  和控制精度  $S_{th}$ ,可获得最优的偏振控制效果。在噪声幅度  $\gamma = 0.003$ ,偏振控制精度  $S_{th}$  为  $10^{-4}$  时,由仿真结果可知, $\alpha = 0.03$  时可以获得最优的偏振控制效果。实验中,需要对衰减率和控制精度进行多次实验,找到最优值,以提高 Adam 算法在实际偏振控制系统中的收敛效果。

### 3.2.2 噪声幅度对 Adam 算法性能的影响

光信号在光纤中传输时,由于光纤自身的缺陷、外界环境引入的噪声以及由偏振系统器件的不完美性和检测精度的限制,都会导致光信号在传输过程中的偏振态发生变化。存在噪声时的延迟量  $\theta'$  为

$$\theta' = \theta + \gamma \times X_{rand}(1), \quad (11)$$

式中, $\gamma \times X_{rand}(1)$  为偏振控制系统中出现的随机噪声, $X_{rand}(1)$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数。将(11)式添加到算法仿真中,研究噪声幅度  $\gamma$  对系统性能的影响。

用 Adam 算法对偏振控制过程进行模拟,得到衰减率  $\alpha = 0.01$ ,收敛精度  $S_{th} = 10^{-4}$ ,控制偏振态从  $(1, 0, 0)$  迭代到  $(0, 1, 0)$ , $\gamma$  分别取  $0, 0.003, 0.005, 0.007$  时算法的实现过程和迭代曲线,如图 6 所示。可以发现, $\gamma$  分别取  $0, 0.003, 0.005$  和  $0.007$  时,所需要的迭代步数为  $143, 190, 234$  和  $341$ 。且增大  $\gamma$  时,偏振控制需要的迭代次数会明显增加,但仍可以收敛到目标偏振态附近。

## 4 Adam 算法与现有典型算法的性能对比

在实际光纤信道传输中,偏振控制系统的性能主要受到算法控制精度及噪声幅度的影响。因此通过对偏振控制系统中的 SGD 算法进行仿真,验证

Adam 算法相比 SGD 算法在性能上的优势。

1) 控制精度的影响及对比

控制精度是衡量偏振控制系统性能的指标之一,系统的控制精度会影响偏振控制的效率。因此,在噪声幅度  $\gamma=0.003$ ,衰减率  $\alpha$  分别为 0.01、0.02、0.03 和 0.04 时,统计了 SGD 算法从输入偏振态  $(1, 0, 0)$  迭代到  $(0, 1, 0)$  时可实现的控制精度及相应的迭代步数,如表 3 所示。

表 3 SGD 算法在不同衰减率下的控制精度及迭代步数

Table 3 Control accuracy and iteration steps of SGD algorithm under different attenuation rates

$\alpha$	$S_{th}$		
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
0.01	97	N/A	N/A
0.02	56	N/A	N/A
0.03	39	N/A	N/A
0.04	30	N/A	N/A

对比表 2 和表 3,可以发现,在  $\gamma=0.003$ ,控制精度  $S_{th}<10^{-2}$  时,SGD 算法无法完成偏振控制,但 Adam 算法可以完成;在控制精度  $S_{th}=10^{-2}$  时,SGD 算法取不同衰减率时所需的迭代步数少于 Adam 算法。这表明,相比 SGD 算法,Adam 算法可实现更高精度的偏振控制,最高控制精度提升了 1~2 个数量级。

2) 噪声幅度的影响及对比

噪声幅度是判断偏振控制系统抗干扰能力强弱的依据,在噪声存在且控制精度相同的情况下,参与控制所需的迭代步数越少,则系统的抗干扰能力就越强。当衰减率  $\alpha=0.01$ ,控制精度  $S_{th}=10^{-3}$ ,输入偏振态为  $(1, 0, 0)$ ,目标偏振态为  $(0, 1, 0)$ ,在不同

噪声幅度下,仿真得到 SGD 算法和 Adam 算法的迭代步数,如表 4 所示。

表 4 不同噪声幅度下的算法迭代步数

Table 4 Iteration steps of the two algorithms under different noise amplitudes

Algorithm	$\gamma$					
	0	0.0003	0.0005	0.0007	0.001	0.003
SGD	198	188	187	188	N/A	N/A
Adam	143	145	147	150	154	190

从表 4 中可以发现,在不同的噪声幅度下,用 Adam 算法完成偏振控制所需要的迭代步数明显少于 SGD 算法,平均迭代步长减少 23%;在噪声幅度较大的时候,基于 Adam 算法仍然可以完成偏振控制,但 SGD 算法已经失效。

综上所述,可以看出,相比于 SGD 算法,Adam 算法在存在干扰的情况下,可以实现的控制精度更高,且在相同实验条件下的抗干扰能力更强,控制效率更高。

## 5 实验及结果分析

### 5.1 实验结构

为验证本算法的实际偏振控制效果,设计了实验验证系统,系统结构如图 7 所示。激光器输出的连续光信号经偏振控制设备 PSY-201 设定输入偏振态后,通过偏振控制系统完成指定偏振态控制输出,通过偏振检测设备 POD-201 完成输出光的偏振态检测以验证偏振控制效果。其中,偏振控制系统由偏振控制模块 PCD-M02、偏振检测模块 POD-001、模数转换(A/D)模块以及 FPGA 控制模块构成。POD-001 将获得的光信号转换为表征偏振态

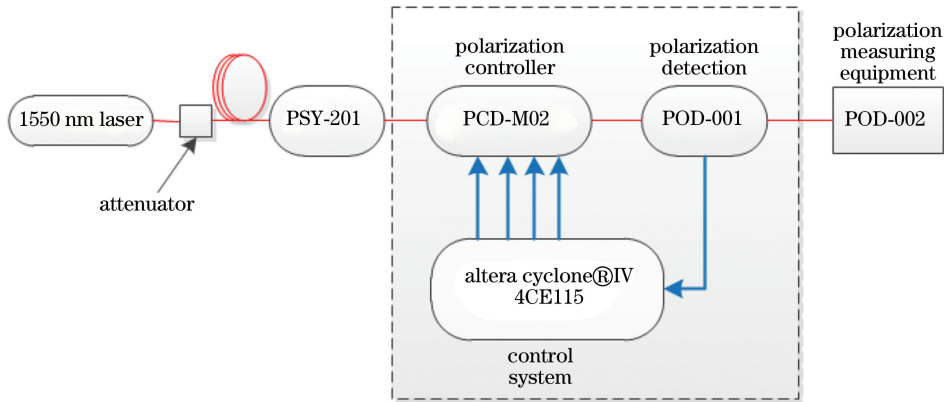


图 7 基于 Adam 算法的偏振控制系统装置图

Fig. 7 Device diagram of polarization control system based on Adam algorithm

的电压信号,通过模数(A/D)转换模块输送给FPGA,FPGA运行Adam算法对目标函数(输入偏振态和目标偏振态的欧氏距离)进行控制优化,计算出偏振控制电压并加载到偏振控制模块PCD-M02上,完成偏振控制,反复迭代直到满足输出偏振态的要求。

### 5.2 实验结果与分析

由于FPGA的高速、并行特性,可以有效提高Adam算法的运算效率,进而提高偏振控制速度。

#### 1) 任意给定输入偏振态的偏振控制

由于Adam算法的全局搜索特点,即使迭代到目标偏振态附近,控制模块仍可一直工作。为了验证该偏振控制系统对任意输入偏振态的可控性,用偏振控制设备PSY-201设定任意输入偏振态进行多次实验验证,在衰减率 $\alpha = 0.04$ ,控制精度 $S_{th} = 0.1$ 的条件下完成偏振控制。由于实验无法遍历所有偏振态,因此选取与仿真模拟相同的5组特殊点

位进行偏振控制验证,结果如表5所示。

表5 不同输入偏振态的偏振控制时间  
Table 5 Polarization control time for different SOPs

Point	Input SOP	Aim SOP	Polarization control time /s
1	(0,0,1)	(0,1,0)	3.0
2	(0,0,-1)	(0,1,0)	1.2
3	(1,0,0)	(0,1,0)	6.0
4	(-1,0,0)	(0,1,0)	4.0
5	(0.62,-0.73,-0.28)	(0,1,0)	4.8

以第2组实验的偏振控制过程为例,其在庞加莱球上的轨迹及控制时间的变化如图8所示。可以发现,基于Adam的偏振控制算法可实现对任意给定的输入偏振态到目标偏振态快速、稳定的控制。

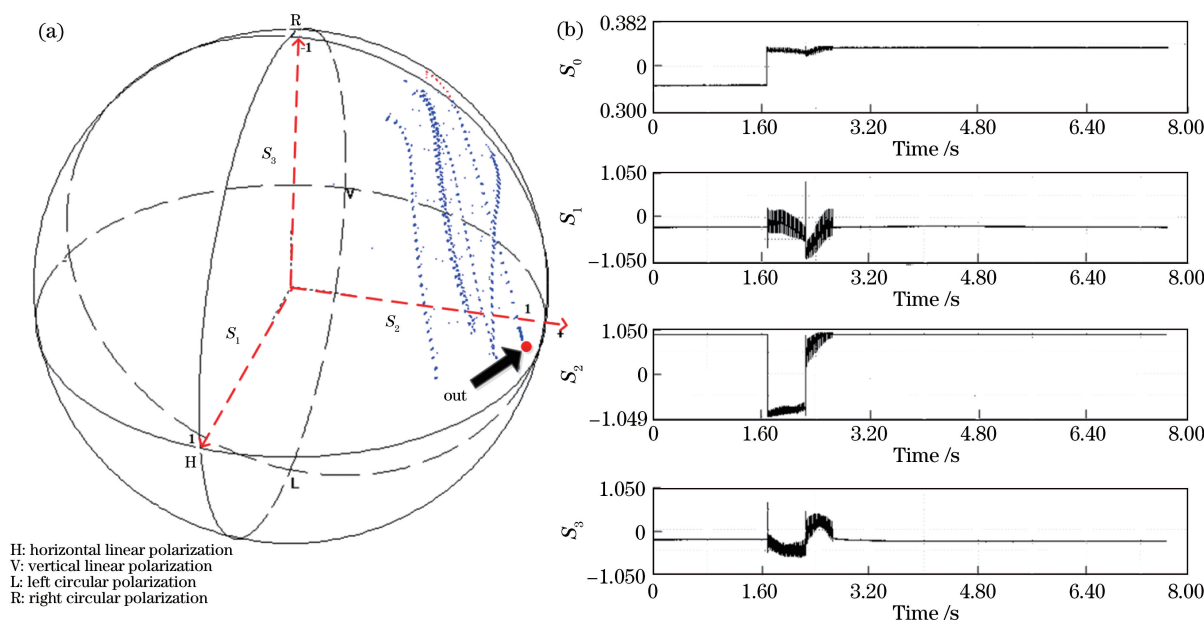


图8 输入偏振态(0,0,-1)到目标偏振态(0,1,0)的偏振控制。(a)庞加莱球上的偏振控制过程;(b)偏振控制时间变化曲线

Fig. 8 Polarization control from input SOP (-1,0,0) to the aim SOP (0,1,0). (a) Polarization control process on Poincare sphere; (b) polarization control time variation curve

#### 2) 不同衰减率 $\alpha$ 对偏振控制效果的影响

根据理论分析可知,衰减率 $\alpha$ 的取值会影响偏振控制所用的时间。当控制精度 $S_{th} = 0.1$ 时,输入偏振态为(0,-1,0),目标偏振态为(0,0,-1),选择不同的衰减率 $\alpha$ ,完成偏振控制过程并记录所消耗的时间,结果如表6所示。可以发现,当控制精度 $S_{th} = 0.1$ 时,随衰减率的增大,算法完成偏振控制所需的时间更短,控制速率更快。

表6 Adam算法在不同衰减率下的偏振控制时间

Table 6 Adam algorithm polarization control time under different attenuation rates

$\alpha$	0.01	0.02	0.03	0.04
Time /s	25.0	20.0	8.0	3.6

## 6 结 论

提出了一种基于Adam的偏振控制算法,并给



出了基于挤压式偏振控制器和高速检偏器的偏振控制系统模型,对该算法的控制过程及影响因素进行理论仿真与实验验证。仿真结果表明:Adam 算法可以实现从任意输入偏振态到目标偏振态快速、稳定的控制;控制精度、衰减率等关键参数的选取会影响算法的控制效率,在噪声幅度  $\gamma=0.003$ ,偏振控制精度  $S_{th}=10^{-4}$  时,使衰减率  $\alpha=0.03$  可以获得最优的偏振控制效果。与 SGD 算法相比,在存在干扰的情况下,Adam 算法可以实现更高的控制精度;在相同条件下,Adam 算法的抗干扰能力更强,控制效率更高。最后,基于 FPGA 搭建了偏振控制实验系统,实现了控制任意输入偏振态到目标偏振态的功能,证明了控制精度固定时,优选衰减率可有效提升偏振控制速率的结论。

受限于现有实验采用的偏振控制器单次最小电压变化量以及 FPGA 在梯度运算时存在的精度问题,当前的系统控制精度仅为 0.1,后续将采用控制精度更高的偏振控制器以及基于 ZYNQ 系列的 FPGA(集成有 ARM 核,可高效完成梯度运算)提升系统的控制精度。

### 参 考 文 献

- [1] Martinelli M, Martelli P, Pietralunga S M. Polarization stabilization in optical communications systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4172-4183.
- [2] Wu J L, Ke X Z. Development of adaptive optical correction and polarization control modules for 10-km free-space coherent optical communications [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(3): 189-195.
- [3] Ma B B, Ke X Z, Zhang Y. Polarization control and control algorithm of beams in coherent optical communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0106002.  
马兵斌, 柯熙政, 张颖. 相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0106002.
- [4] Kersey A D, Dandridge A, Tveten A B. Dependence of visibility on input polarization in interferometric fiber-optic sensors [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(4): 288-290.
- [5] Li P C, Liu K, Jiang J F, et al. Research on polarization control of distributed optical fiber sensing system based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510002.  
李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于 FPGA 的分布式光纤传感系统偏振控制研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510002.
- [6] Huang B, Huang Y M, Peng Z M. Attack and detection on reference-pulse phase of continuous-variable quantum-key distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1127001.  
黄彪, 黄永梅, 彭真明. 连续变量量子密钥分发的参考脉冲相位攻击与探测 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1127001.
- [7] Chen S, Wang J D, Zhong P P, et al. Influence of time jitter on quantum bit error rate of phase-coding quantum key distribution system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0727001.  
陈帅, 王金东, 钟平平, 等. 时间抖动对相位编码量子密钥分发系统量子误码率的影响 [J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0727001.
- [8] Wu C F, Du Y N, Wang J D, et al. Analysis on performance optimization in measurement-device-independent quantum key distribution using weak coherent states [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(10): 100302.  
吴承峰, 杜亚男, 王金东, 等. 弱相干光源测量设备无关量子密钥分发系统的性能优化分析 [J]. *物理学报*, 2016, 65(10): 100302.
- [9] Zhang Y C, Li Z Y, Chen Z Y, et al. Continuous-variable QKD over 50 km commercial fiber [J]. *Quantum Science and Technology*, 2019, 4(3): 035006.
- [10] Lu F Y, Yin Z Q, Cui C H, et al. Improving the performance of twin-field quantum key distribution [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(2): 022306.
- [11] Ding Y Y, Chen W, Chen H, et al. Polarization-basis tracking scheme for quantum key distribution using revealed sifted key bits [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1023-1026.
- [12] Chen J, Wu G, Xu L, et al. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(6): 065004.
- [13] Li W W, Zhang X M, Chen K S, 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.
- [14] Li W W, Zhang X M, You B Q, et al. Endless polarization control based on simulated annealing algorithm [C]//2008 IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop, December 21-22, 2008, Wuhan, China. New York: IEEE, 2008: 275-278.

- [15] Xi L X, Zhang X G, Tian F, et al. Optimizing the operation of LiNbO<sub>3</sub>-based multistage polarization controllers through an adaptive algorithm [J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(2): 195-202.
- [16] Mamdoohi G, Abas A F, Samsudin K, et al. Implementation of genetic algorithm in an embedded microcontroller-based polarization control system [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(4): 869-873.
- [17] Su R T, Liu Y K, Yang B L, et al. Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm [J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 045802.
- [18] Omran M G H, Mahdavi M. Global-best harmony search [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 198(2): 643-656.
- [19] Dong S H, Wang X L, Su R T, et al. Research on conversion technology from non-polarized to linearly polarized laser based on principle of polarization phase locking [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0202006.  
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于偏振锁相的非线偏-线偏光转换技术研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202006.
- [20] Wang J, Wang S D, Zhuang Q R. Fiber stress measurement based on Poincare sphere [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2004, 25(1): 34-36.  
王静, 王士东, 庄其仁. 庞加莱球的光纤应力测量 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 34-36.
- [21] Yang X H. Poincare-sphere and the application [J]. Journal of China Three Gorges University (Humanities & Social Sciences), 1999, 21(2): 36-38, 48.  
杨孝海. 庞加莱球表象及其应用 [J]. 三峡大学学报(人文社会科学版), 1999, 21(2): 36-38, 48.
- [22] Gong Y D, Chen G X, Jian S S. Research and state of the art of polarization controllers [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 1995(3): 15-20.  
龚岩栋, 陈根祥, 简水生. 偏振控制器的研究和现状 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1995(3): 15-20.
- [23] Wang B C. High-speed precision polarization generator [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 9.  
王搏尘. 高速精密偏振态发生器 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 9.
- [24] Zhang X G, Duan G Y, Xi L X. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarizations [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1173-1176.  
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.
- [25] Li Z Y. High-speed polarization control in optical fiber and polarization encoding communication [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 45-46.  
李政勇. 光纤偏振态的高速控制与偏振编码通信 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009: 45-46.
- [26] Kingma D, Ba J. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL]. [2020-02-25]. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
- [27] Walker N G, Walker G R. Polarization control for coherent communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(3): 438-458.