

# 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究

张启业 朱 勇 苏 洋 周 华 经继松

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 偏振控制器(PC)是实现偏振控制算法的重要器件,也是量子密钥分发系统中的重要组成部分。提出了一种利用挤压器的相位与偏振态轨迹的旋转轴之间的关系来分析挤压型偏振控制器“极地盲区”问题的新方法。从理论上分析了此类偏振控制器的控制原理,推导出挤压器上相位变化与它的偏振态轨迹旋转轴之间相互影响的规律。基于以上特性,进一步分析了两个光纤挤压器级联的偏振控制器的“极地盲区”现象,即只有在极个别的输入偏振态才能实现任意偏振态输出,绝大多数的输入偏振态都有不能到达的区域。通过仿真和实验结果对比验证了理论分析的正确性,提出的一种规避盲区的偏振控制算法设计思路,可减少偏振控制的可变自由度。

**关键词** 光通信;偏振控制器;极地盲区;偏振态;旋转轴

**中图分类号** TN919.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0506001

## Research on the Polar Blind Zone of the Fiber Squeezer Polarization Controller

Zhang Qiye Zhu Yong Su Yang Zhou Hua Jing Jisong

(*Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

**Abstract** Polarization controller (PC) is an important device for the automatic polarization control algorithm, which is also an important part in the quantum key distribution system. A new method of analyzing the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller is presented based on the relation between the phase of the fiber squeezer and the rotation axis of the polarization state trajectory. The control principle is analyzed theoretically, and the interaction law between the changed phase and the rotation axis of the state of polarization's trajectory is deduced. Based on the above results, the “polar blind zone” phenomenon of the two fiber squeezers cascade polarization controller is further expounded, namely only in the extremely individual input polarization state, arbitrary polarization states can be output. The vast majority of the input polarization states cannot arrive certain areas in the Poincare sphere. The accuracy of theoretical analysis is verified through comparing simulation results and experimental results. An idea of the polarization control algorithm based on avoiding blind area is proposed, which can reduce variable degrees of freedom.

**Key words** optical communications; polarization controller; polar blind zone; state of polarization; rotation axis

**OCIS codes** 060.4510; 260.5430; 060.2380

## 1 引 言

光的偏振态(SOP)控制不仅在光纤通信和传感方面应用广泛,而且还在新兴的量子通信领域得到应用。在量子密钥分发(QKD)系统中使用偏振控制技术来降低量子误码率(BER)<sup>[1]</sup>是常用的手段之一。完成自动偏振控制需要偏振控制器(PC)和相

应的偏振控制算法。常见的偏振控制器有相位固定-方位可调的偏振控制器和方位固定-相位可调的偏振控制器<sup>[2]</sup>两种类型。方位固定-相位可调的偏振控制器通过改变各个挤压器上的相位达到控制偏振态的目的。偏振控制器的控制原则是基于旋转轴的,完成任意偏振态控制至少需要 3 个自由度,而且

**收稿日期**: 2012-10-12; **收到修改稿日期**: 2013-01-15

**基金项目**: 江苏省自然科学基金(BK2012508)资助课题。

**作者简介**: 张启业(1986—),男,硕士研究生,主要从事光偏振控制技术方面的研究。E-mail: zqy\_2010009@163.com

**导师简介**: 朱 勇(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: jlzhuy@163.com

挤压器级联时偏振控制器相互之间的相位与旋转轴有交互影响,因此深入研究该相位与偏振旋转轴之间的关系,有利于把握偏振控制器的控制过程,也为设计简单高效的偏振控制算法提供理论指导。

## 2 挤压型偏振控制器原理

### 2.1 偏振态的斯托克斯参量和庞加莱球表示

光的偏振态表示方法众多,斯托克斯矢量法是常见的一种。它用一组物理量完全相同的参量来描述偏振态,以  $S_0, S_1, S_2, S_3$  来表示,其中<sup>[3]</sup>

$$S_0 = |E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2, \quad S_1 = |E_{ox}|^2 - |E_{oy}|^2, \\ S_2 = 2\text{Re}[E_{ox} \times E_{oy}], \quad S_3 = 2\text{Im}[E_{ox} \times E_{oy}], \quad (1)$$

式中  $S_0$  为偏振光的总光强,  $S_1$  为  $x$  分量和  $y$  分量的光强差,  $S_2$  为  $+\pi/4$  和  $-\pi/4$  线偏振分量的强度差,  $S_3$  的正、负、零 3 种不同值分别表示光的右旋偏振态、左旋偏振态以及线偏振态。把斯托克斯参数归一化处理,即把  $S_0, S_1, S_2$  和  $S_3$  除以  $S_0$  可以得到归一化斯托克斯参量  $s_0, s_1, s_2$  和  $s_3$ , 其中  $s_0 = 1$ 。

对于偏振光,所有的偏振态都可以表示在一个单位球面上,这个球就叫庞加莱球,如图 1 所示,图中 LHC 为左旋圆偏振北极点, RHC 为右旋圆偏振南极点。庞加莱球与斯托克斯参数一起来描述偏振态的控制<sup>[4]</sup>。点  $H, V, Q, R$  都在赤道上, 分别表示水平线偏振、垂直线偏振、 $+\pi/4$  线偏振和  $-\pi/4$  线偏振态。赤道上其他位置是线偏振态, 南极表示右旋圆偏振态, 北极表示左旋圆偏振态, 南半球上任一点表示右旋椭圆偏振态, 北半球上任一点代表左旋椭圆偏振态。

### 2.2 偏振控制理论

图 2 为常见的方位固定-相位可调的挤压型级

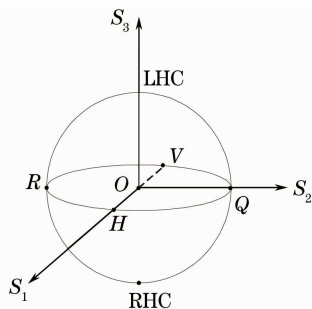


图 1 庞加莱球示意图  
Fig. 1 Poincare sphere

联偏振控制器结构,  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  分别代表作用在 4 个挤压器上的压力,  $45^\circ$  和  $0^\circ$  表示它们的方位角, 是固定不变的。4 个光纤挤压器依次记为  $X_1, X_2, X_3$  和  $X_4$ 。在压力作用下产生线双折射, 引起相位延迟, 从而改变光信号的偏振态。在庞加莱球上, 压力引起偏振态的变化轨迹是一个围绕某条过庞加莱球球心的直线旋转的圆, 该直线定义为挤压器的偏振旋转轴, 此圆即为它的轨迹圆。

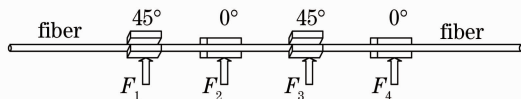


图 2 方位固定-相位可调的偏振控制器  
Fig. 2 Angle-fixed and phase-adjusted PC

在理想情况下,  $0^\circ$  放置的挤压器的旋转轴为图 1 的  $s_1$  轴,  $45^\circ$  放置的挤压器的旋转轴即为图 1 的  $s_2$  轴<sup>[5]</sup>。增加  $X_1$  上的压力  $F_1$ , 偏振态绕  $OQ$  轴 ( $s_2$  轴) 顺时针旋转, 反之, 逆时针旋转。同理, 增加  $X_2$  上的压力  $F_2$ , 偏振态绕  $OH$  轴 ( $s_1$  轴) 顺时针旋转, 反之, 逆时针旋转, 如图 3 所示。

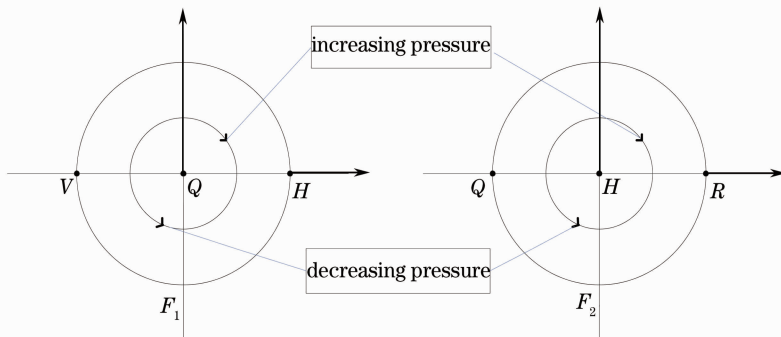


图 3 偏振控制原理平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of polarization control principle

### 2.3 波片级联对偏振旋转轴影响理论分析

挤压器的变化矩阵通常可以用穆勒矩阵表

示<sup>[6]</sup>, 方位角为  $45^\circ$  的挤压器和方位角为  $0^\circ$  的挤压器对应的穆勒矩阵分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示各自的相位差, 假设入射光为完全偏振光, 它的偏振态记为  $\mathbf{S}_{\text{in}} = (s_0, s_1, s_2, s_3)$ , 光信号依次经过  $X_1$  和  $X_2$  后, 输出偏振态变换为  $\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{B} \times \mathbf{A} \times \mathbf{S}'_{\text{in}}$ , 若  $\mathbf{S}_{\text{out}} = (s_{00}, s_{01}, s_{02}, s_{03})$ , 则有

$$\begin{cases} s_{00} = s_0 = 1 \\ s_{01} = s_1 \cos \alpha - s_3 \sin \alpha \\ s_{02} = s_1 \sin \alpha \sin \beta + s_2 \cos \beta + s_3 \cos \alpha \sin \beta \\ s_{03} = s_1 \sin \alpha \cos \beta - s_2 \sin \beta + s_3 \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式可知, 当  $\alpha$  取 0 时,  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  的  $s_{01}$  与  $\beta$  无关,  $s_{02}$ 、 $s_{03}$  分别是  $s_2$ 、 $s_3$  绕  $s_1$  轴旋转了  $\beta$  后的值, 当  $\beta$  连续变化时, 构成的偏振态轨迹就是绕  $s_1$  轴旋转的圆;

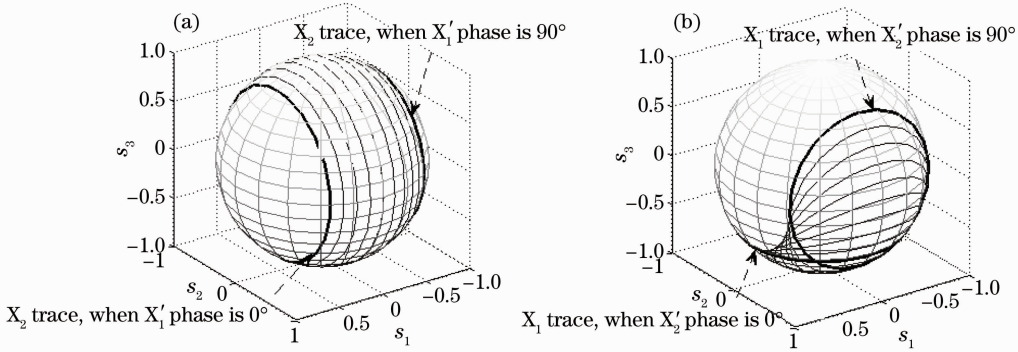


图 4 相位与轴的关系仿真图。(a)不同  $X_1$  相位时  $X_2$  的变化轨迹; (b)不同  $X_2$  相位时  $X_1$  的变化轨迹

Fig. 4 Simulation results of the relationship between phase and rotation axis. (a) Trace of  $X_2$  when  $F_1$  is changed; (b) trace of  $X_1$  when  $F_2$  is changed

图 4(a)为  $X_1$  上的相位在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间变化时,  $X_2$  在不同相位下的偏振态旋转轨迹。它们是一族以  $s_1$  轴为旋转轴的圆, 其旋转轴为  $s_1$  轴。图 4(b)为  $X_2$  上的相位在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间变化时,  $X_1$  在不同相位下的偏振态旋转轨迹。轨迹的变化规律是围绕  $s_1$  轴旋转, 旋转的角度与  $X_2$  上的相位差一致。其旋转轴从  $s_2$  轴开始以  $10^\circ$  的相位差围绕着  $s_1$  轴顺时针旋转了  $90^\circ$ 。以上仿真结果与第 2 节中的理论分析一致。综上可知, 当光通过两个方位角相差  $45^\circ$  的挤压器级联的偏振控制器时, 如果靠近输出端的挤压器上相位不为零, 那么该相位就会改变处于此前的挤压器的偏振旋转轴。而当多个方位角相同或相差  $90^\circ$

当  $\alpha$  变化时, 此轨迹圆沿着  $s_1$  轴移动, 形成一族以  $s_1$  轴为旋转轴的圆。而当  $\beta$  取 0 时,  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  的  $s_{02}$  与  $\alpha$  无关,  $s_{01}$ 、 $s_{03}$  分别是  $s_1$ 、 $s_3$  绕  $s_2$  轴旋转了  $\alpha$  后的值, 则当  $\alpha$  连续变化时, 构成的轨迹是绕  $s_2$  轴旋转的圆; 当  $\beta$  变化时, 此轨迹的旋转轴不再是  $s_2$  轴, 而是已经绕  $s_1$  轴在一个平面内旋转了  $\beta$  的轴。

因此, 如果使用  $X_1$  和  $X_2$  方位角相差  $45^\circ$  的挤压器级联的偏振控制器进行偏振态调控, 大多数情况下输出偏振态只能覆盖一个圆环, 只有输入偏振态处于  $H$ 、 $V$  和南北极构成的圆上才能实现任意偏振态的输出。

### 3 仿真结果

随机产生完全偏振光的输入偏振态  $\mathbf{S}_{\text{in}} = (1, 0.51, 0.61, 0.61)$ , 挤压器上的相位在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间以  $10^\circ$  的间隔发生改变, 在其中一个挤压器处于固定相位时, 根据(3)式仿真出另一个挤压器相位连续变化时的偏振态旋转轨迹, 不同相位下的仿真结果如图 4 所示。

的挤压器级联时, 它们的轴将不会随着其他挤压器相位的变化而变化, 即是固定不变的。

对于以上假设的输入偏振态, 当经过  $X_1$  和  $X_2$  以后, 由于受  $X_2$  上的相位影响导致  $X_1$  的偏振态轨迹绕  $s_1$  轴旋转扫描庞加莱球, 这样就会在  $s_1$  轴两端有两个空白区域, 即  $s_1$  轴的两极盲区, 即出现“极地盲区”现象, 如图 5(a)所示。同样, 要想实现任意输入偏振态到任意输出偏振态的调整, 至少需要 3 个相互相差  $45^\circ$  的波片级联<sup>[7]</sup>。如图 5(b)所示, 由于  $X_2$  和  $X_3$  级联组成的偏振控制器的盲区是出现在  $s_2$  轴的两个极地, 从而与  $X_1$  和  $X_2$  的组合形成互补之势, 便可实现全球扫描。

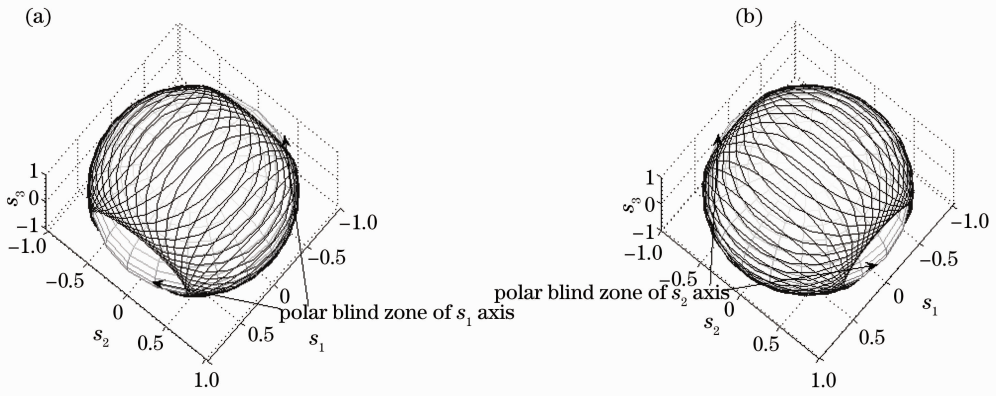


图 5 “极地盲区”仿真结果图。(a) $X_1$  和  $X_2$  级联的极地盲区;(b) $X_2$  和  $X_3$  级联的极地盲区

Fig. 5 Polar blind zones of the fiber squeezer PC by simulation. (a) Polar blind zone of  $X_1$  and  $X_2$  cascade PC; (b) polar blind zone of  $X_2$  and  $X_3$  cascade PC

### 4 实验验证

为了验证理论分析,搭建如图 6 所示实验装置,分布反馈式(DFB)激光器输出的是波长为1550 nm的稳定光信号。在线起偏器用来保证输入偏振控制器的光是完全偏振光。PolaRITE III偏振控制器是美国通用光电公司生产的一款典型的方位固定-相位可调的电控偏振控制器,内部结构如图 2 所示。通过调整

挤压器上的电压而改变信号的偏振态。电压信号由单片机输出的 12 路信号提供,范围为 0~4095,对应的输出模拟电压范围为 0~140 V。输出偏振态用美国通用光电(GP 公司)的在线检偏仪监测,通过模/数(A/D)转换及数据采集处理后输入计算机,并在相应的软件上显示。

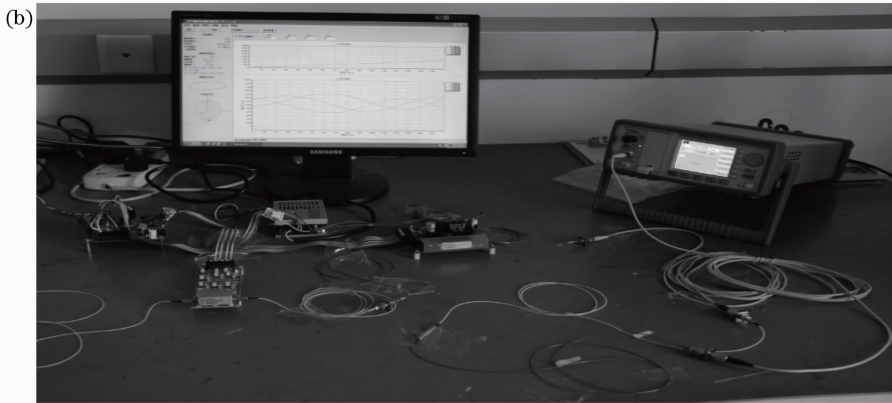
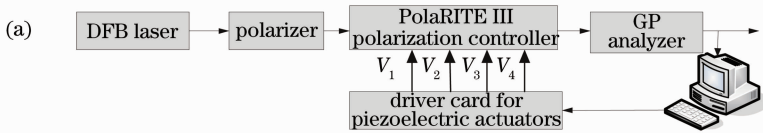


图 6 偏振控制器实验测试系统。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 6 PC experimental measurement system. (a) Diagram; (b) actual picture

$V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  和  $V_4$  分别是施加在 4 个挤压器  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_4$  上的数字电压。测试两挤压器级联时相位与偏振旋转轴关系的实验过程中要求  $V_3$  和  $V_4$  置为 0,  $V_1$  和  $V_2$  分别取不同的值,记录每一组数据。由于实验数据具有在一个平面上上下波动的特性,所

以用特征值最小二乘法<sup>[8]</sup>处理实验数据,获取偏振态轨迹和旋转轴。把实验测量的数据在庞加莱球上描出来,便可直观地看出相位与旋转轴的关系,如图 7 所示。由于检偏仪与偏振控制器之间的快慢轴不是一一对应的,所以  $X_1$  和  $X_2$  的初始旋转轴不是

$s_2$  轴和  $s_1$  轴。图 7 的结果与理论仿真结果基本一致，误差在于图 7(a) 中轴没有完全重合；图 7(b) 中轴没有完全共面，相同的电压间隔引起的相位差略有差别。造成这些差别的主要原因是偏振控制器高温条

件下的膨胀以及电滞回归性导致实际相位差不是完全由电压引入的，次要原因是实验环境、器件等人为因素。

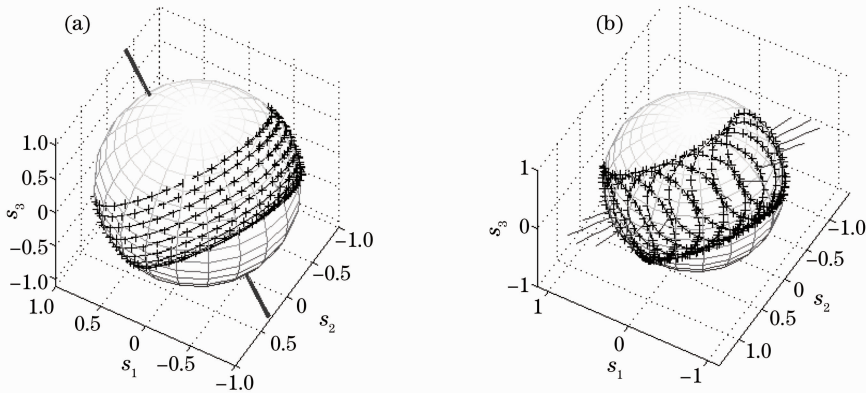


图 7 相位与轴的关系实验结果图。(a)  $V_1$  取不同值时  $X_2$  的轨迹和轴；(b)  $V_2$  取不同值时  $X_1$  的轨迹和轴

Fig. 7 Relationship between phase and rotation axis in experiment. (a) Trace and axis of  $X_2$  when  $V_1$  is changed; (b) trace and axis of  $X_1$  when  $V_2$  is changed

通过随机取值，实验测试偏振控制器的“极地盲区”现象。首先测试  $X_1$  和  $X_2$  级联出现的“极地盲区”现象，随机设置不同的  $X_1$  和  $X_2$  值，记录每一个输出点的偏振态，显示在庞加莱球上，如图 8(a) 所示，出现了两个空白区域。其次，把  $V_1$  和  $V_4$  置为

0，测试  $X_2$  和  $X_3$  级联的“极地盲区”现象，结果如图 8(b) 所示。图 8 的结果和图 5 一致，由于实验测试中输入偏振态和旋转轴都不理想，导致图 8(a) 和 (b) 中的盲区区域大小不一致，覆盖区域的空白之处是因为取点没有取到造成的。

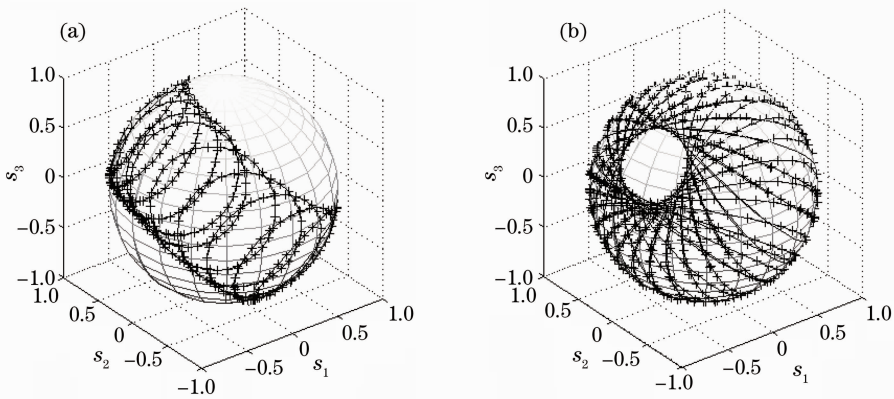


图 8 “极地盲区”实验结果图。(a)  $X_1$  和  $X_2$  级联的“极地盲区”；(b)  $X_2$  和  $X_3$  级联的“极地盲区”

Fig. 8 Polar blind zones of the fiber squeezer PC in experiment. (a) Polar blind zone of  $X_1$  and  $X_2$  cascade PC; (b) polar blind zone of  $X_2$  and  $X_3$  cascade PC

## 5 结 论

通过理论和实验证明，当两个方位角相差  $45^\circ$  的挤压器级联时，光经过后面挤压器的相位会改变前一个挤压器的旋转轴。当两个方位角相同或者相差  $90^\circ$  的波片级联时，波片上的相位对波片的旋转轴没有任何影响。在大多数情况下，两个相差  $45^\circ$  的波片级联的偏振控制器都会存在“极地盲区”问

题。而 3 个挤压器级联时，某一偏振态经过后两个挤压器出现的盲区是经过前两个挤压器后覆盖的区域，这为设计行之有效的偏振控制算法提供了理论指导。若要实现到目标点的偏振控制，首先可以判断目标点是不是处于相应输入偏振态经过  $X_1$  和  $X_2$  后的盲区范围，当它处于盲区就选择用  $X_2$  和  $X_3$  来完成控制，否则就用  $X_1$  和  $X_2$  完成偏振控制。此方

法与常见的模拟退火算法、粒子群算法等基于“盲”搜索的偏振算法有很大区别,它的目的明确,控制时间短,能够减少偏振控制的自由度,是完成量子密钥分发系统中实时偏振控制的关键,对于某些对偏振控制速度有要求的领域具有十分重要的意义。基于偏振旋转轴的实时偏振控制算法的实现是下一步研究的重点。

### 参 考 文 献

- 1 J. Chen, G. Wu, L. Xu *et al.*. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing [J]. *New J. Physics*, 2009, **11**(6): 065004
- 2 Liu Yang. Research on Polarization Controller and Its Control Algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. 1~7  
刘 洋. 偏振控制器及其算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. 1~7
- 3 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameter of fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0605003  
叶振兴, 苏 洋, 朱 勇等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(6): 0605003
- 4 Zhang Desheng, Sun Lei, Dong Xiaoyi. Application of the Poincare sphere in analyzing state polarization transmission in optical fiber [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(10): 1099~1102  
张德生, 孙 磊, 董孝义. 邦加球在分析光纤偏振态传输中的应用[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(10): 1099~1102
- 5 Zhang Lan, Duan Gaoyan, Zhang Xiaoguang *et al.*. Analysis and research of voltage controlled crystal polarization controllers [J]. *Photon Technology*, 2006, **3**(13): 144~149  
张 岚, 段高燕, 张晓光等. 电控晶体偏振控制器分析与研究[J]. 光子技术, 2006, **3**(13): 144~149
- 6 R. Simon. The connection between Mueller and Jones matrices of polarization optics [J]. *Opt. Commun.*, 1982, **42**(5): 293~297
- 7 Zhang Xiaoguang, Duan Gaoyan, Xi Lixia. Research on least number of degrees of freedom for transformation among arbitrary state of polarization [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
- 8 Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Shi Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds [J]. *J. Tongji University*, 2008, **36**(7): 981~984  
官云兰, 程孝军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报, 2008, **36**(7): 981~984

栏目编辑: 王晓球