

非理想情况下的实时偏振控制算法

张启业 朱勇 苏洋 王德双 杨龙

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 21007)

摘要 在基于偏振编码的 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)系统中,偏振控制系统是关键的一个环节。为了能够高效快速地恢复并稳定因光纤链路抖动以及环境温度变化等因素而受损的偏振态,分析了电动偏振控制器(EPC)的性能,引入了旋转矩阵作为偏振控制器的 Müller 矩阵,提出了规避盲区的策略,设计了非理想情况下的实时偏振控制算法。该算法在局部控制过程中只使用两个控制自由度即可完成期望输出的偏振态,极大地提高了控制速度。仿真结果验证了算法的可行性。

关键词 量子光学;量子光通信;偏振控制算法;旋转轴;偏振控制器;缪勒矩阵

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.090604

Real-Time Polarization Control Algorithm under Non-Ideal Situation

Zhang Qiye Zhu Yong Su Yang Wang Deshuang Yang Long

(College of Communications Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract In the receiving end of quantum key distribution (QKD) system based on the polarization encoded BB84 protocol, the polarization control system is very key to QKD. In order to recover and stabilize very efficiently the damaged polarization states owing to these factors including the optical fiber, environment temperature and so on, the performance of the electric polarization controller (EPC) is analyzed and rotation matrix is introduced as the Müller matrix of the EPC. A strategy of avoiding the blind zone is put forward and the real-time polarization control algorithm is designed in the non-ideal situation. The algorithm shows that every control process uses only two degrees of freedom to transform all possible polarization states and can improve greatly the rate of the controlling. Simulation results show that this algorithm is feasible.

Key words quantum optics; quantum optical communications; polarization control algorithm; rotation axis; polarization controller; Müller matrix

OCIS codes 060.4510; 260.5430; 060.2420

1 引言

在基于光子偏振编码的 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)系统中,接收端要求接收到的量子信号的偏振态与发送端发出的偏振态一致,这对偏振态的控制提出极为苛刻的要求。光信号在光纤链路中传输时,由于双折射的随机存在,导致光信号经过一段时间传输后它的偏振态会呈现不确定性。据统计,在暴露于空气中的光缆中传输的光信号的偏振态演变量级在毫秒级别,这对于量子密钥分发是致命的伤害。克服环境以及光纤中的双折射效应对偏振态影响的重要途径是偏振控制。常用的偏振控制器是电动偏振控制器(EPC),与之相适应的出现了各种各样的偏振控制算法,比如遗传算法^[1]、模拟退火算法^[2]和粒子群算法^[3]等。但是这些算法都是“盲”搜索算法,算法的复杂度高,需要复位算法,控制速度和效率都有限,更有甚者会陷入局部最优而难以达到目标位置,不能满足量子密钥分发的需求。因此,迫切需要找到一种高效而且实用的偏振控制算法来解决这个问题。

收稿日期: 2013-05-08; **收到修改稿日期**: 2013-05-16; **网络出版日期**: 2013-08-20

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012508)

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

偏振控制的速度不仅决定着量子密钥分发的效率,更是对系统的量子误码率有直接影响。为了提高量子密钥分发效率,降低量子误码率,保证量子密钥分发的实现,本文在深入研究了全光纤挤压式偏振控制器性能的基础上,设计了一种基于旋转矩阵的偏振控制算法。根据文献[4]可知,偏振控制器完成任意偏振态变化的最小自由度为3,而本文提出的算法在每一次局部控制过程中只需要两个自由度就可以实现目标偏振态的控制,而且每一次控制只需要两步,大大简化了控制的复杂度,提高了控制的速率。

2 偏振控制与检测系统分析

目前市场上使用较为广泛的是波片式和全光纤挤压式电动偏振控制器,由于挤压式电动偏振控制器具有低插入损耗、高响应速度、高稳定性等优点,所以这里选用的实验器件及模型建立的依据是 General Photonics 公司生产的光纤挤压式动态偏振控制器 PolarRITE III 和在线高速检偏器 PolaDetect,图 1 为偏振反馈控制系统结构图。图 2 是 PolarRITE III 的内部结构,由 4 个光纤挤压器构成,相互以 45° 倾斜放置,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 分别代表作用挤压器上的压力, 45° 和 0° 表示它们的方位角。 V_1, V_2, V_3 和 V_4 代表 4 个挤压器的驱动电压。偏振控制器在加载电压后,挤压器产生压力挤压光纤使光纤产生线双折射效应,引起相位延迟,从而改变光信号的偏振态。光信号送入检偏器,检偏器测得四路输出电压值并在计算机上算出偏振光的斯托克斯参数,即可完成偏振态的测量。驱动电压由单片机输出的 12 路数字信号提供,数字电压范围为 $0 \sim 4095$,对应的模拟电压为 $0 \sim 150$ V。

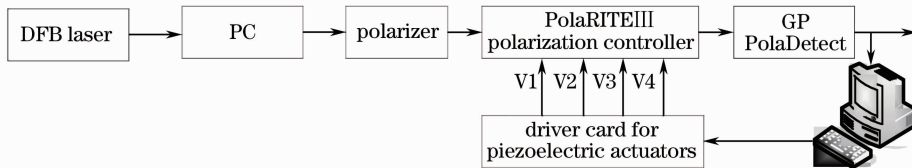


图 1 偏振反馈控制系统

Fig. 1 Polarization feedback control system

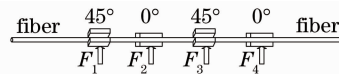


图 2 光纤挤压式电动偏振控制器结构

Fig. 2 Fiber squeeze electric polarization controller

根据参考文献[5]的偏振控制原理可知,在理想情况下,对于如图 1 所示的偏振检测与控制系统来说, 0° 放置的挤压器的偏振旋转轴为以偏振检测器为基础建立的庞加莱球的 s_1 轴, 45° 放置的挤压器的偏振旋转轴为 s_2 轴,如图 3 所示。因此在这种情况下的偏振控制过程如果用庞加莱球^[6]描述的话,那就是将当前偏振态先绕 s_2 轴旋转,再绕 s_1 轴旋转到期望的偏振态。

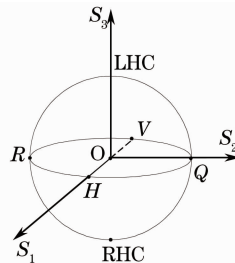


图 3 庞加莱球示意图

Fig. 3 Ponicare sphere

但是在非理想情况下,在该偏振反馈系统下测量得到的偏振控制器的旋转轴并不是庞加莱球的 s_1 轴或 s_2 轴,它会与 s_1 轴或 s_2 轴由一定的夹角,而且随实际环境的不确定性而发生变化,故基本上可以排除通过对准偏振控制器的旋转轴与以偏振检测器为基准建立的庞加莱球的坐标轴的策略来完成偏振控制。

尽管情况不理想,但是偏振控制器的基本性质还保持着,即广义的偏振主态特性^[7]。这个特性是指改变

每一个挤压器上的电压引起的偏振态变化轨迹是围绕一条直线旋转,这条直线也是之前提到的偏振控制器的旋转轴。在系统稳定的情形下,每一个挤压器的旋转轴方向基本上是不变的,这样的特性让每一个挤压器对光信号的偏振作用可以等效于一个旋转矩阵,这在参考文献[7]中有详尽的描述。另一个特性是对挤压器级联型偏振控制器而言的,那就是当几个挤压器级联时,位置靠后的挤压器上的相位延迟发生变化就会让处于它之前的挤压器的旋转轴在庞加莱球上也旋转相应的角度,这使得在使用两个方位角相差 45° 的挤压器级联进行偏振控制时存在控制“盲区”^[8]。

3 非理想情况的解决策略

3.1 旋转轴不是庞加莱球的坐标轴及 Müller 矩阵

Müller 矩阵是表示斯托克斯矢量通过偏振元件的转换的数学工具。它是一个 4×4 的实数坐标变换矩阵^[9]。由于偏振控制过程只关心完全偏振光在庞加莱球上的运动轨迹,而且光纤挤压式电动偏振控制的偏振相关损耗可以忽略,所以在斯托克斯空间中偏振控制器的缪勒矩阵可以退化为一个 3×3 的旋转矩阵。旋转矩阵描述的是三维空间中绕任意轴旋转的坐标变换,这正是偏振控制器广义偏振主态描述的特性。

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

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

用斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 表示偏振光,对于完全偏振光有 $S_0 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$,常把斯托克斯归一化处理,即 $S_0 = 1$,则只用 $\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)^T$ 就可表示光的偏振态,它对应庞加莱球上一个点。如果输入偏振光 $\mathbf{S}_{in} = (S_{1i}, S_{2i}, S_{3i})^T$,相继经过 n 个挤压器后,输出光的斯托克斯矢量 \mathbf{S}_{out} 就为

$$\mathbf{S}_{out} = M_n(u) \times \cdots \times M_2(u) \times M_1(u) \times \mathbf{S}_{in}, \quad (2)$$

旋转矩阵的着眼点是偏振控制器的旋转轴在以检偏器为基准建立的庞加莱球上的实际位置,从而可以解决偏振控制器旋转轴不是庞加莱球的 s_1 轴或 s_2 轴的问题。利用(2)式便可以在已知输入偏振态与不同的电压值的情况下可以求出任意输出偏振态。

通过以上分析可知关键问题是要求出旋转轴的方向向量。根据前面的理论分析可知,在固定的输入偏振态下,持续增加挤压器的电压测量输出的偏振态,输出的偏振态点所在的圆面的法向量就是旋转轴的方向向量,所以只要知道偏振态轨迹所在平面方程,就可以求出旋转轴的方向向量,从而就得到了这一挤压器的 Müller 矩阵。但是由于环境温度以及实验操作引起的误差,常常有一部分点在该平面附近波动,这样就会导致测得的旋转轴不精确,故引入特征值最小二乘法处理实验数据^[10],从而得到最接近于真实值的方向向量。特征值最小二乘法处理过程如下:

设平面方程为

$$ax + by + cz = d, \quad (3)$$

式中 a, b, c 是平面单位法向量。实验记录 m 个数据点 $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ 。则任意一点 (x_i, y_i, z_i) 到平面(3)的距离表示为

$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d|, \quad (4)$$

如果要求出满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 的最佳平面,就要使

$$e = \sum_i d_i^2 = \sum_i (ax_i + by_i + cz_i - d)^2, \quad (5)$$

取最小值,用拉格朗日法求解最小值,得

$$f = \sum_i d_i^2 - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1), \quad (6)$$

将上式分别对 a, b, c, d 求导, 并令其导数为零, 得到

$$d = a\bar{x} + b\bar{y} + c\bar{z}, \quad (7)$$

$$\text{和} \begin{bmatrix} \sum_i \Delta x_i \Delta x_i & \sum_i \Delta x_i \Delta y_i & \sum_i \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum_i \Delta x_i \Delta y_i & \sum_i \Delta y_i \Delta y_i & \sum_i \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum_i \Delta x_i \Delta z_i & \sum_i \Delta y_i \Delta z_i & \sum_i \Delta z_i \Delta z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中 $\bar{x} = \sum_i x_i / m, \bar{y} = \sum_i y_i / m, \bar{z} = \sum_i z_i / m, \Delta x_i = x_i - \bar{x}, \Delta y_i = y_i - \bar{y}, \Delta z_i = z_i - \bar{z}$ 。

由(8)式可知, 求解 a, b, c 的值转化为求解最小特征值对应的特征向量。这样偏振控制器的旋转轴的方向向量就可以一一确定。此时旋转轴的方向与增加电压时偏振态的旋转方向符合右手规则, 从而得到偏振控制器的基于旋转轴的 Müller 矩阵。

3.2 偏振控制器的“盲区”问题

由第二节分析的结果可知, 只使用偏振控制器相邻的两个挤压器对光信号控制会出现控制盲区。对于同一输入偏振态, 通过 X_1 和 X_2 组合后不能到达的区域与通过 X_2 和 X_3 后能覆盖的区域刚好是整个庞加莱球。因此只要期望输出的偏振态落于某两个相邻的挤压器(X_1 和 X_2 或 X_2 和 X_3) 的偏振控制区域内, 那么两个控制自由度就可以实现目标输出, 故在偏振控制算法中可以引入盲区判断。

可以用平面相交法判定每次控制过程参与的挤压器, 设 P_1 和 P_2 分别为庞加莱球上的两点, 分别表示输入偏振态(进入偏振控制器之前的)和期望输出的偏振态, 以 P_1 作一个以 X_1 的旋转轴的方向向量为法向量的平面, 过 P_2 作一个以 X_2 的旋转轴的方向向量为法向量的平面, 求由这两个平面方程与 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 的球面方程构成的方程组, 若有实数解, 则选择 X_1 和 X_2 进行控制; 若没有实数解, 则选择 X_2 和 X_3 进行控制。

4 算法流程

根据以上分析, 可设计如下的流程:

- 1) 测量偏振控制器三个旋转轴的方向向量以及各挤压器的电压与延迟量的关系;
- 2) 根据(1)式求出三个挤压器的 Müller 矩阵(M_1, M_2 和 M_3)及其逆矩阵(此 Müller 矩阵是正交矩阵, 故其逆矩阵即为它的转置矩阵);
- 3) 设定目标偏振态 S_{aim} , 读取光信号当前的偏振态 S'_{now} ;
- 4) 求解反馈函数, 确定是否需要控制: 设定一个指标 $T=0.01$, 反馈条件是 $f = \sqrt{|S_{\text{now}} - S_{\text{aim}}|} - T$, 若 $f > 0$, 需要 EPC 控制, 否则不需要;
- 5) 判定参与控制的挤压器, 首先要求解原始输入状态, 即通过公式 $S_{\text{in}} = M'_1 \times M'_2 \times M'_3 \times S_{\text{now}}$ 求解, 然后再根据第三节提供的判断方法选择参与控制挤压器;
- 6) 求解延迟量: 以选择 X_1 和 X_2 控制为例, 从上一步中解得的两个交点(记为 M, N , 两点可能重合), 选取距离 S_{in} 最近的一点(取 M)作为过渡态, 计算出 S_{in} 和 M 所在偏振态轨迹圆的圆心角, 即为延迟相位 θ_1 。同理可以求得 M 到 S_{aim} 的延迟量 θ_2 ;
- 7) 确定电压变化方向, 确保调整不出界: 根据上一步求出的延迟量, 以 θ_2 为例, 设置延迟量参考区间为: $[0, \theta_2, \pi + \theta_2, 2\pi + \theta_2, 4\pi]$ 。读取当前电压值 V_{now} , 把它转化为延迟量 $\theta_{\text{now}} = \frac{\pi}{680} \times V_{\text{now}}$ 并通过比较确定其处于参考区间的位置。若处于 $[0, \theta_2, \pi + \theta_2]$ 区间, 当前电压 V_{now} 调整到 $V_{\text{aim}} = \frac{680}{\pi} \times \theta_2$; 若处于 $[\pi + \theta_2, 2\pi + \theta_2, 4\pi]$ 区间, 当前电压 V_{now} 调整到 $V_{\text{aim}} = \frac{680}{\pi} \times (2\pi + \theta_2)$ 。可以看出, 这样划分的目的就是避免越界, 还可以使每次调整的电压值不超过 V_π (延迟量为 π 的电压值, 电压变化值在 V_π 内时延迟量与电压值可以用线性关系表征);

8) 持续更新当前的偏振态 S_{now} 和偏振控制器的驱动电压, 实时监测 S_{now} , 进行反馈判断, 重复步骤 4)~7), 便可完成实时的偏振控制算法。

5 仿真实验结果

对非理想情况下的偏振控制算法进行仿真实验, 仿真模型建立在如图 1 所示的基础上。仿真过程中只使用前三个挤压器参与控制, 最后一个挤压器的电压一直保持为 0。

5.1 测量偏振控制器旋转轴实验

首先, 初始化偏振控制器。其次, 输入一束偏振光, 记录此时的偏振状态。然后, 改变挤压器的电压值, 使其以 2 的间隔从 0 增加到 3×10^3 , 并记录实验测得的数据。最后, 借助 Matlab 软件, 用最小特征值二乘法处理得到的实验数据, 从而得到三个挤压器的旋转轴的方向向量如表 1 所示。

表 1 偏振控制器主轴方向向量参数
Table 1 Direction vector parameters at the rotation axis of polarization controller

Squeezer	n_x	n_y	n_z
X_1	-0.2422	-0.7732	0.5860
X_2	-0.1338	0.6215	0.7719
X_3	-0.0520	-0.8285	0.5575

图 4 给出这三个旋转轴在庞加莱球上的位置。标号为 1 的线是 X_1 的旋转轴, 标号为 2 的线是 X_2 的旋转轴, 标号为 3 的线是 X_3 的旋转轴。

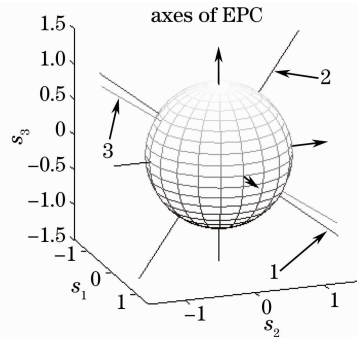


图 4 旋转轴在庞加莱球上的显示

Fig. 4 Rotation axes displayed on the Poincaré sphere

5.2 测量延迟量与电压的关系实验

对于某一选定的输入偏振态, 在如图 1 所示的系统中, 只改变 X_1 上的驱动电压, 其它驱动电压均为 0, 让电压(数字电压)从 $0 \sim 3 \times 10^3$ 区间均匀增加, 记录输出偏振态的斯托克斯参数的变化情况, 用同样的方法测量 X_2 和 X_3 的电压与输出偏振态的斯托克斯参数的关系, 为了直观起见, 将数据图示出来, 得到图 5 的结

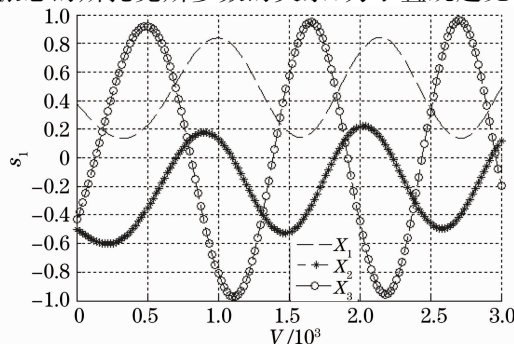


图 5 s_1 与电压的关系

Fig. 5 Relation between s_1 and voltage

果。从图 5 中所示曲线可以看出,在驱动电压均匀增加的情况下,输出偏振态的斯托克斯参数 s_1 与挤压器的电压呈现余弦函数关系,这说明随着电压的增加旋转角也是均匀增大的,正如文献[7]所描述的压电陶瓷具有很好的线性偏振旋转的特性。因此在电压变化量不超过 V_π 时,近似把电压与延迟量看成线性关系。根据测试结果可以得到偏振控制器延迟量与电压的具体关系:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{660} \times V_1, \quad \theta_2 = \frac{\pi}{680} \times V_2, \quad \theta_3 = \frac{\pi}{690} \times V_3, \quad (9)$$

5.3 偏振控制过程

基于以上测量结果,对非理想情况下的偏振控制算法控制过程进行仿真实现。随机选取 1×10^3 个不同的输入偏振态,完成到目标点的偏振控制。表 2 给出其中 6 个特殊点的输入输出偏振态以及参与控制的波片与需要的控制电压和当前电压。

表 2 列出非理想情况下偏振算法控制过程的几个关键数据。从表中可以看出可以实现任意输出偏振态的控制,每一次控制过程只需要两个挤压器参与,并且每一个挤压器的驱动电压改变量均在 V_π 内。为了更加形象直观地表述偏振态的控制过程,这里把以上所涉及的控制过程都在 Poincaré 球上描绘出来,如图 6 所示。

表 2 输入输出偏振态与偏振控制器电压值

Table 2 Input and output SOP and EPC's voltages

Point	Input SOP	Aim SOP	Fiber squeezer	Voltage (digital)		Fiber squeezer	Voltage (digital)	
				Now	Aim		Now	Aim
1	(0.68, -0.73, -0.03)	(1, 0, 0)	X_2	1038	1299	X_3	1993	2147
2	(-0.87, 0.29, -0.41)	(-1, 0, 0)	X_2	2677	2872	X_3	709	1115
3	(0.55, 0.83, 0.10)	(0, 1, 0)	X_1	2858	2670	X_2	435	178
4	(-0.74, 0.53, 0.41)	(0, -1, 0)	X_2	1364	1170	X_3	2984	2276
5	(0.02, -0.85, 0.52)	(0, 0, 1)	X_2	2949	2601	X_3	621	1065
6	(-0.34, 0.80, 0.49)	(0, 0, -1)	X_1	706	463	X_2	523	1192

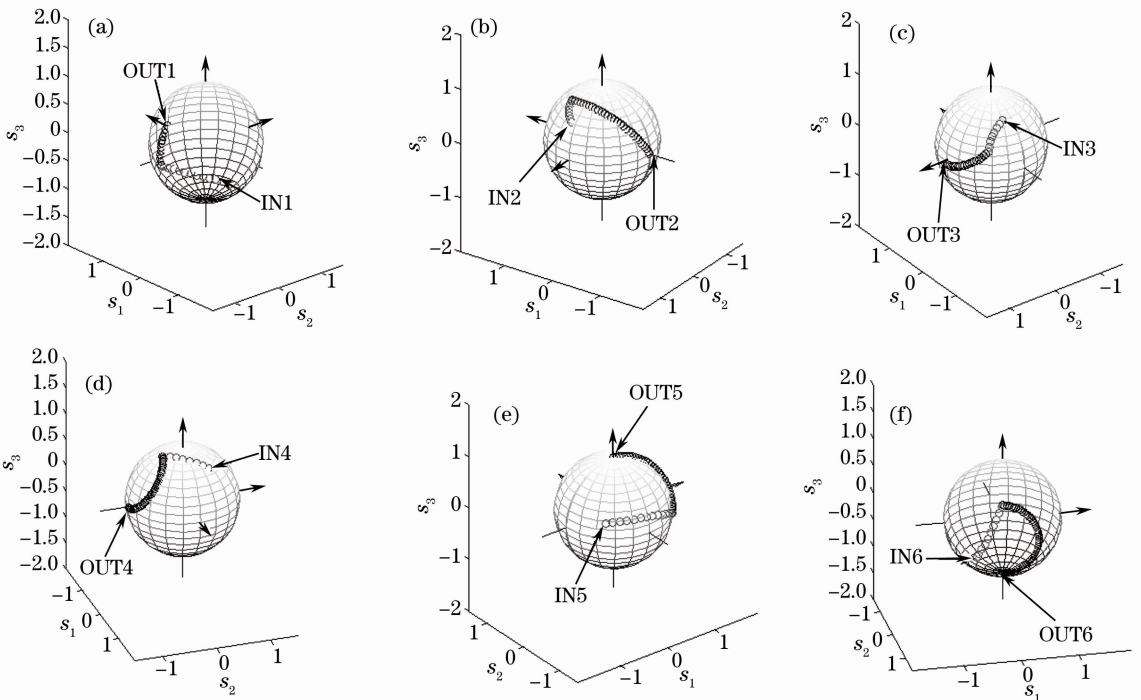


图 6 实现六个特殊状态的偏振控制过程。(a): (1,0,0); (b): (-1,0,0); (c): (0,1,0); (d): (0,-1,0); (e): (0,0,1); (f): (0,0,-1)

Fig. 6 Polarization control process of six special state. (a): (1,0,0); (b): (-1,0,0); (c): (0,1,0); (d): (0,-1,0); (e): (0,0,1); (f): (0,0,-1)

图中 OUT 表示目标输出偏振态, IN 表示随机的输入偏振态, 序号 1, 2, \dots , 6 分别对应表 2 中点的序号。从六幅图中都能观察到一个特点, 那就是从 IN 出来到 OUT 都要经过一个转折点, 这个点就是通过算法求出的中间状态, 也是该偏振控制算法的核心。有了这个控制桥梁, 就可以把每次控制过程分为两步, 第一步到达中间状态, 另一步到达目的状态, 图中也可以清楚地观察到这个现象。另外, 从图中还可以观察到到每一步的延迟量都没有超过所在轨迹圆的一半, 即电压变化量小于 V_π 。最后, 每一步旋转都没有绕 s_1 轴或 s_2 轴, 这也证明了算法的理论分析。以图 6(a) 为例, 具体控制过程是首先确定了参与控制的挤压器是 X_2 和 X_3 , 然后让 V_2 从 1038 增加到 1299 使输入偏振态(0.68, -0.73, -0.03)绕 X_2 的旋转轴旋转到中间状态, 再让 V_3 从 1993 增加到 2147 使中间状态绕 X_3 的旋转轴旋转到目标偏振态(1, 0, 0)。在这个过程中, 不管是 V_2 还是 V_3 , 它们的改变量都没有超过它们的 V_π 。

6 结 论

基于 General Photonics 公司的光纤挤压式电动偏振控制器 PolaRITE III 和在线高速检偏器 PolaDetect 搭建了偏振反馈控制模型, 对偏振控制系统的实际情况进行讨论分析, 通过引入旋转矩阵与规避盲区的策略, 成功地实现了非理想情况下偏振反馈控制算法。通过仿真实验结果可知, 该算法能够在每一次局部控制过程中仅使用三个挤压器中的两个便可实现输入偏振光到输出偏振态的控制。通过中间状态使得每次控制过程只需要两步走, 极大地改善了偏振控制速度以及弥补了搜索算法偏振过程的不可控性。仿真结果为完成量子密钥分发接收端偏振跟踪与控制任务提供了依据。后续工作将进一步从实验上对算法进行验证与优化。

参 考 文 献

- Li Weiwen, Jin Xiaofeng, Zhang Xianmin, *et al.*. Application of genetic algorithms in polarization control[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 3(40): 443-447.
李伟文, 金晓峰, 章献民, 等. 遗传算法在偏振态控制中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 3(40): 443-447.
- 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.
- Lan Baolin. Optical Fiber Polarization Control System Based on the Electro-Optic Crystals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011: 31-36.
兰宝林. 基于电光晶体的光纤偏振态控制系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2011: 31-36.
- 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.
- J Chen, G Wu, L Xu, *et al.*. Stable quantum key distribution with active polarization control based on time-division multiplexing[J]. New Journal of Physics, 2009, 11: 065004.
- Zhang Desheng, Sun Lei, Dong Xiaoyi. Application of the Poncare Sphere in analyzing state polarization transmission in optical fiber[J]. Journal of 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.
- Li Zhengyong. High-speed Polarization Control in Optical Fiber and Polarization Encoding Communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. 43-49.
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, 2008. 43-49.
- Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Research on the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506001.
张启业, 朱勇, 苏洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506001.
- Li Zhengyong, Wu Chongqing, Yang Shuangshou, *et al.*. Generalized principal-state-of-polarization analysis and matrix model for piezoelectric polarization controllers[J]. Chin Phys Lett, 2008, 4(25): 1325-1328.
- Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Shi Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds[J]. Journal of 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.
- Zhang Lan, Duan Gaoyan, Zhang Xiaoguang, *et al.*. Analysis and research of voltage controlled crystal polarization controllers[J]. Photon Technology, 2006, 13(3): 144-149.