

激光与光电子学进展

基于 FPGA 的量子通信系统偏振态制备
及控制集成化张英强^{1,2}, 程子毓^{1,2}, 李海珍^{1,2}, 陈瑞云^{1,2}, 张国峰^{1,2}, 秦成兵^{1,2}, 王晓波^{1,2}, 胡建勇^{1,2,*}, 肖连团^{1,2}¹山西大学激光光谱研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 在以偏振编码为基础的量子保密通信中, 由于外界温度、应力以及光纤的本身缺陷等因素, 使得偏振态无法保持长期稳定, 增加系统的误码率, 因此需进行偏振控制以维持通信系统正常运行。诱骗态已经成为现阶段量子通信网络的常规操作, 利用诱骗光子作为偏振参考, 有望实现系统偏振态长时间、不间断地锁定控制, 提高通信效率。提出了利用现场可编程逻辑门阵列进行偏振态制备以及强光、单光子偏振控制于一体的系统偏振解决方案, 将偏振态制备、强光偏振控制、单光子偏振控制单元集成在一个系统中, 提高了系统的集成化, 增加了系统管理的便捷性, 实验测试偏振态制备单元可以根据需要产生不同的偏振态, 经过强光偏振控制后, 保真度可达 $99.11\% \pm 0.44\%$, 经单光子偏振控制后保真度可达 $97.93\% \pm 0.96\%$, 演示证明了方案的有效性和稳定性。

关键词 量子保密通信; 现场可编程逻辑门阵列; 偏振控制; 集成化

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP2223125

Polarization State Preparation and Control Integration of a Quantum
Communication System Based on a Field-Programmable Gate ArrayZhang Yingqiang^{1,2}, Cheng Ziyu^{1,2}, Li Haizhen^{1,2}, Chen Ruiyu^{1,2}, Zhang Guofeng^{1,2},
Qin Chengbing^{1,2}, Wang Xiaobo^{1,2}, Hu Jianyong^{1,2,*}, Xiao Liantuan^{1,2}¹State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy,
Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract In quantum communication based on polarization encoding, the polarization state cannot be maintained for a long time because of the external temperature, stress, and defects in the optical fiber. This increases the bit error rate of the system. Therefore, polarization control is necessary to maintain robust operation of the communication system. Currently, decoy states are being widely used in quantum communication networks. Using decoy photons as a polarization reference, long-term and uninterrupted locking of the system polarization state can be achieved, and communication efficiency can be improved. In this study, an integrated polarization control system is built to control the polarization state preparation and single-photon transmission. The polarization state preparation unit, strong light polarization control unit, and single-photon polarization control unit are integrated into one system using a field-programmable gate array development board, which improves the integration of the system and makes system management more convenient. The experimental results show that the polarization state preparation unit can generate different polarization states as required, and the fidelity can reach $99.11\% \pm 0.44\%$ after strong light polarization and $97.93\% \pm 0.96\%$ after single-photon polarization control. These results demonstrate the effectiveness and stability of our proposed system.

Key words quantum communication; field-programmable gate array; polarization controller; integration

1 引言

量子保密通信改变了传统的加密通信方式, 通过

量子态分发密钥或直接进行安全通信^[1-2], 其安全性由量子力学基本原理保证, 具备信息论安全性, 成为了国内外的研究热点^[3-5]。偏振编码是量子保密通信中常

收稿日期: 2022-11-21; 修回日期: 2023-01-03; 录用日期: 2023-01-09; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(62105193)

通信作者: *jyhu@sxu.edu.cn

用的编码方式之一,但在长距离的光纤传输过程中,外界温度、应力及光纤的本身缺陷等因素会导致偏振态无法保持长期稳定,从而导致系统误码率升高,进而影响通信码率及安全性。另外,随着光纤距离增加,偏振漂移的时间也会变短,偏振漂移的速度变快^[6]。因此,以偏振态为信息载体的量子通信中,保证偏振态的高保真制备及长期稳定传输是实现量子保密通信系统长期稳定运行的关键^[7-11]。

现有偏振控制方案可分为主动和被动偏振控制两种。其中,被动偏振控制方案为了抑制偏振态的漂移,通常在光路中将入射光经过法拉第镜进行反射,由反射光抵消光纤中的偏振漂移,这种光路双向往返校准法^[12]易于操作,但降低了系统效率,缩短了传输距离。主动偏振控制方案通常将信号光与参考光分时段处理^[13],通过参考光进行偏振控制时无法同时进行信号光传输,简化了偏振控制方法,但降低了系统工作效率。为了提高通信系统的效率,需要偏振控制具有更优的实时性和更高的控制精度。随着量子通信协议的发展,诱骗态协议已成为量子通信系统常用的通信协议之一,通过诱骗态协议可以显著提升通信距离和码率,近期的研究表明,利用诱骗态作为偏振态反馈控制资源能够实现量子保密通信系统偏振态的实时控制^[14]。但偏振编码保真度除了受到光纤传输影响之外,偏振制备的保真度也会影响系统误码率,因此,需要对强光偏振态制备和单光子偏振态传输进行联合反馈控制才能最终实现量子通信系统偏振态的长期稳定。目前根据最新研究进展,对强光和单光子偏振控制的研究,主要为使用模拟退火、遗传算法、粒子群算法等实现高速的偏振控制,控制方式上大多采用参考光作为反馈进行纠偏,而对应用中集成化的研究并不多。鉴于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)具有流水线及并行处理,运算精度高等优势,近年来众多量子保密通信方案以FPGA代替计算机作为系统的控制核心,使得系统有更强的处理效率^[15-17],并且能够便于集成,向着小型化发展。为了适应量子通信实用化的发展,以FPGA作为控制平台进行偏振控制的研究具有重要意义,虽然目前已提出不少基于FPGA的主动偏振控制方法^[18-22],但能够直接应用于量子通信方案中的方法还不够完备,还没有集偏振态制备、强光偏振控制、单光子偏振控制于一体的方案。

本文提出了集偏振态制备、强光偏振控制、单光子偏振控制于一体的量子态控制系统,以FPGA为核心控制器输出控制信号实现偏振态的产生及强光和单光子的偏振控制,偏振态部分由FPGA根据需要输出不同的电压控制,输出不同的偏振态;强光偏振控制部分由强光作为反馈信号,采用偏振控制算法控制电控偏振控制器(EPC),使得偏振态的保真度满足设定的阈值条件;单光子偏振控制部分由单光子计数作为反馈信号,控制EPC,最终使得单光子偏振态的保真度满

足设定的阈值条件,实验验证了方案的有效性和稳定性。

2 基本原理及实验方案

2.1 偏振控制器原理

光的偏振态可使用琼斯矢量表示,将一束偏振光分解为相互正交的不同平面分量,通过琼斯矩阵将输入光的偏振态表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \exp(i\delta) \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{E} 为输入偏振态的琼斯矢量; δ 为2个相互正交振动分量间的相位差; α 为偏振态与水平方向的夹角。控制出射光的偏振态常采用的自动校准方法为根据反馈光通过偏振控制器进行控制,偏振控制器的琼斯矩阵 \mathbf{G} 可表示为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(i\omega/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\omega/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: ϕ 为挤压器快轴与水平参考方向的夹角; ω 为偏振控制器挤压光纤而产生的相对相位延迟量。假设任意给定的输入偏振态的琼斯矢量 \mathbf{E} ,经过偏振控制器作用后的偏振态琼斯矢量 \mathbf{E}' 可表示为

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} \cdot \mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{G}_2 \cdots \mathbf{G}_3, \quad (3)$$

基于此原理,通过偏振控制器可将任意输入偏振态转换为任意目标偏振态,采用的电控偏振控制器结构,如图1所示,主要由4个挤压光纤^[23]的挤压单元和外部的电压驱动电路组成。挤压单元相对于水平方向呈 0° 、 45° 、 0° 、 45° ;2个方向角为 45° 波片,其快轴分别对应于庞加莱球赤道面上的2个正交轴,输入偏振态在庞加莱球上的点会分别以这2个正交轴为中心进行旋转,输出光的偏振态由加载在四路挤压单元上的电压 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 组合决定。

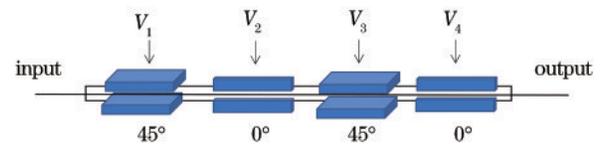
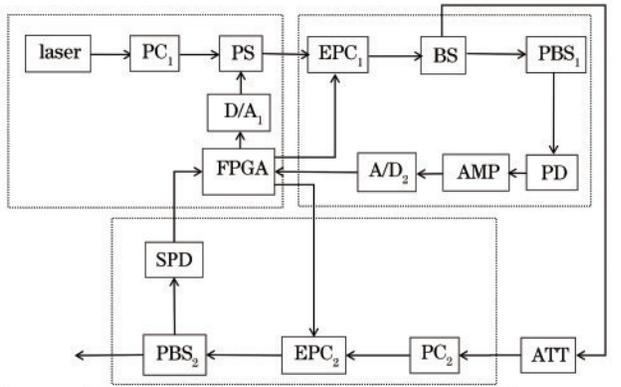


图1 电控偏振控制器结构

Fig. 1 Electric control polarization controller structure

2.2 偏振控制实验

基于FPGA的量子保密通信偏振控制方案,如图2所示。整体由3部分组成:偏振态制备、强光偏振控制、单光子偏振控制。在偏振态制备部分,激光器发出波长为1550 nm的激光,先经过手控偏振控制器(PC₁)进行预调节输入到扰偏器(PS)中,PS能够通过加载在其上的电压改变偏振态,由FPGA根据需求输出对应的控制信号经数模转换器(D/A₁)输出指定的电压



Laser: continuous laser; PC₁, PC₂: manual polarization controller; PS: polarizer; ATT: optical attenuator; FPGA: field-programmable logic gate array; D/A₁: digital-to-analog converter; A/D₂: analog-to-digital converter; EPC₁, EPC₂: electronic polarization controller; BS: beam splitter; PBS₁, PBS₂: polarization beam splitter; PD: photodetector; AMP: transimpedance amplifier; SPD: single photon detector

图 2 偏振控制方案系统框图

Fig. 2 System block diagram of polarization control scheme

加载到 PS 上,控制 PS 输出相应的偏振态。在强光偏振控制部分,制备好的偏振态先经过电控偏振控制器 (EPC₁),再由分束器 (BS) 分出一路作为调整偏振态的参考光,参考光经偏振分束器 (PBS₁) 后,由一路作为反馈,经光电探测器 (PD) 后将光信号转化为电信号,再经跨阻放大器 (AMP) 放大到模数转换器 (A/D₂) 的测量范围, A/D₂ 将模拟信号转换为数字信号输入到 FPGA 中, FPGA 经过偏振控制算法计算控制的电压值输出数字信号加载在 EPC₁ 上, EPC₁ 对偏振态进行调整,并将输出值继续进行反馈,直到保真度满足阈值条件为止。此时分束器 (BS) 两路具有同样的效果,将另一路经光衰减器 (ATT) 衰减到单光子量级并输入到长距离光纤传输,输出给单光子偏振控制模块。在单光子偏振控制部分,首先经过一个手控偏振控制器 (PC₂) 便于进行初步的偏振态调节,然后经过电控偏振控制器 (EPC₂),进行单光子量级的偏振态调节,电控偏振控制器 (EPC₂) 的输出由偏振分束器 (PBS₂) 分为两路,一路作为参考光输入到单光子探测器 (SPD) 中,由 FPGA 实现规定时间内的计数功能并由偏振控制算法计算控制的电压值输出数字信号,将数字信号加载到 EPC₂ 上, EPC₂ 对偏振态进行调整,并将输出值进行重复反馈,直到目标偏振态的保真度满足阈值条件为止。

实验装置中电控偏振控制器采用 General Photonics 公司生产的 PCD-M02 偏振控制模块,此模块与全光纤电控偏振控制器集成,控制模块的输入端由四路外部 0~5 V 的模拟信号或 12 bit 的数字信号进行控制输出电压,分别控制电控偏振控制器内部的 4 个光纤挤压装置,偏振控制模块内部集成高压放大电路,将输出电压放大至四路 0~140 V 电压加载到电控偏振控制器上。数字输入端需由 4 bit 进行选通控制,其中 1 bit 选

通信号, 1 bit 读写信号, 2 bit 通道选择信号。由选通控制信号进行逐路选通、逐路控制。在强光偏振控制部分和单光子偏振控制部分参考端, FPGA 由偏振控制算法逐一输出四路的控制电压,作用于电控偏振控制器的 4 个光纤挤压装置,循环多次进行偏振保真度的寻优。

2.3 偏振控制流程

强光偏振控制部分和单光子偏振控制部分分别根据光电探测器和单光子探测器的探测结果进行实时监测及反馈控制。由 FPGA 完成偏振控制算法计算电压控制值移动的步长和方向,进行循环控制,实现偏振态的稳定控制。强光偏振控制流程和单光子偏振控制流程根据反馈探测的方式不同,算法控制的流程有略微不同。主要区别为强光偏振控制部分的光电探测器信号,经模数转换器后转换为数字信号,可以随时读取反馈数据。单光子偏振控制部分需根据控制逻辑主动地进行一定积分时间的光子数统计。而二者使用的界定根据反馈信号决定:强光偏振控制,一般为了便于光电探测器检测到光强变化,并有较好的控制效果,需使光强在 mW 量级,光强分辨精度在 μW 量级;单光子偏振控制,为了有足够的光子数能够计算出当前的保真度,需将光子数调整到 $10\,000\text{ s}^{-1}$ 左右,分辨精度在 100 s^{-1} 左右。

其中,在偏振控制流程中,通过保真度判断是否满足条件,其计算公式为

$$f_{\text{fidelity}} = (S_{\text{signal}} - N) / (S_{\text{signal}} + S_{\text{reference}} - 2N), \quad (4)$$

式中: S_{signal} 为信号光强度; $S_{\text{reference}}$ 为参考光强度; N 为所考虑的系统噪声。强光偏振控制和单光子偏振控制的流程图具体如图 3(a)、图 3(b) 所示。

强光偏振控制算法流程: 1) 开始时,对电控偏振控制器进行初始化,开启复位信号,关闭选通信号,进入写状态,偏振控制器的通道选择在第一通道,电压控制信号输出 0。2) 通过光电探测器采集当前偏振态的电压,确定当前的保真度,根据其和目标偏振态的距离计算偏振控制的步长和方向。3) 若计算得到的步长不为 0,偏振控制器开启选通信号,通道首先选择在第一通道,并将控制电压加载在偏振控制器上,关闭选通信号,将通道切换为下一通道。4) 重新通过光电探测器进行监测,采集当前偏振态电压,计算保真度,并计算下一次的偏振控制步长和方向。5) 若计算得到控制步长为 0,此时偏振态保真度已经满足要求,若步长不为 0,此时偏振态不满足条件,进行下一次电压加载,循环控制到保真度满足阈值。

单光子偏振控制算法流程: 1) 开始时,对电控偏振控制器进行初始化,开启复位信号,关闭选通信号,进入写状态,通道选择在第一通道,电压控制信号输出 0。2) 通过单光子探测器对当前偏振态的单光子进行计数,计算当前偏振态的保真度。3) 判断当前的保真

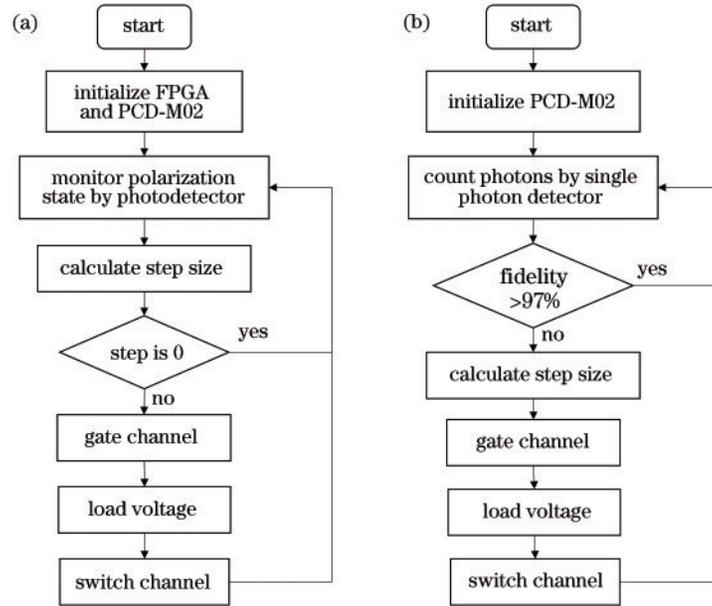


图 3 流程图。(a)强光偏振控制;(b)单光子偏振控制

Fig. 3 Flow chart. (a) Strong light polarization control; (b) single photon polarization control

度是否满足阈值条件:若不满足阈值条件,则发出控制信号;若满足阈值条件则重新计数,进行下一次偏振态监测。4) 若接收到控制信号,将通道选择在第一通道,开启选通信号,根据电压控制信号与目标偏振态的距离计算偏振控制的电压值,将控制电压加载在偏振控制器上,关闭选通信号,将通道切换为下一通道。5) 重新通过单光子探测器进行单光子计数,监测当前偏振态的保真度:若保真度满足阈值条件,表示已经控制到目标偏振态,进行循环监测;若保真度不满足阈值条件,进行下一次偏振控制步长和方向的计算,循环控制到满足阈值条件为止。

3 分析与讨论

由偏振态制备部分产生的测试结果,如图 4 所示。一般的量子通信需要 4 种偏振态,而目前也提出了较多三态协议传输的方案,同样可以实现保密通信。制备部分通过 FPGA 控制经模数转换器输出 0~5 V 的电压,

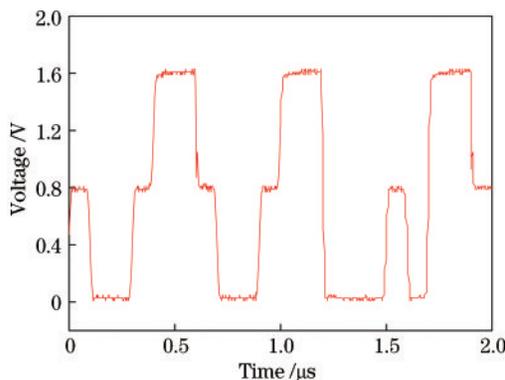


图 4 不同幅度电压对应 0°、45°、90°偏振态的制备

Fig. 4 Different amplitude voltages correspond to 0°, 45° and 90° polarization states preparation

以 10 MHz 的频率变化电压,加载在扰偏器上,经偏振分束后,由示波器监测信号光,分别对应不同的幅值,代表不同的偏振态,经过偏振态产生部分,调节 FPGA 输出不同的电压,可以控制扰偏器制备不同的偏振态。

不进行强光偏振控制的情况下,长时间自由漂移的结果图,如图 5(a)所示。由示波器监测信号光和参考光,在不进行偏振控制的情况下,由于外界温度、应力以及光纤的本身缺陷等因素,光纤中偏振态的始终不能保持一个状态,随时间变化缓慢地产生偏振漂移。使用强光偏振控制算法对偏振态进行控制后的结果,如图 5(b)所示。偏振控制算法根据当前偏振态与目标偏振态的距离计算步长和方向,由光强作为反馈,以 1 kHz 的寻优频率,寻优时间小于 4.09 s。测试结果显示,经过寻优后偏振态能够锁定在目标状态,AD 子卡的量程为 0~5 V,测量精度为 10 mV,最终由强光反馈,保真度可达 99.11%±0.44%。

在单光子偏振控制部分,若不进行偏振控制,偏振态在光纤中随时间变化的结果,如图 6(a)所示。由单光子探测器监测参考光和信号光,测试结果显示,光子数由最初状态在没有人干扰的情况下自然地缓慢漂移。在单光子状态下,偏振态始终不能保持稳定。

单光子偏振控制部分,执行单光子偏振控制算法的结果,如图 6(b)所示。通过单光子探测器探测光子,由 FPGA 进行光子计数,计算控制的电压值加载至电控偏振控制器调整偏振态。测试结果显示,通过单光子的反馈计数进行寻优,可以在短时间内寻找到目标偏振态,考虑到单光子探测器在黑暗环境中暗计数的影响,测试平均暗计数率为 630 s⁻¹,为提高控制精度将总光子数调整至 11000 s⁻¹,测得系统静态的情况下量子涨落为 0.24%,实验测得保真度为

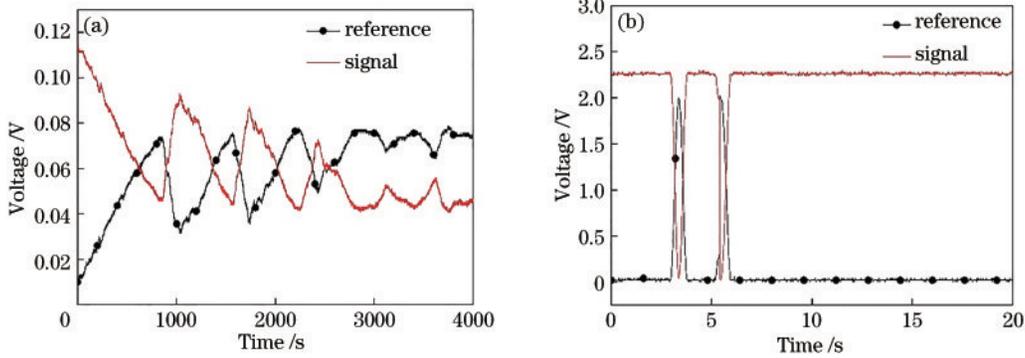


图 5 测试结果。(a)强光自由偏振漂移;(b)强光偏振控制效果

Fig. 5 Test results. (a) Free polarization drift of strong light; (b) strong light polarization control effect

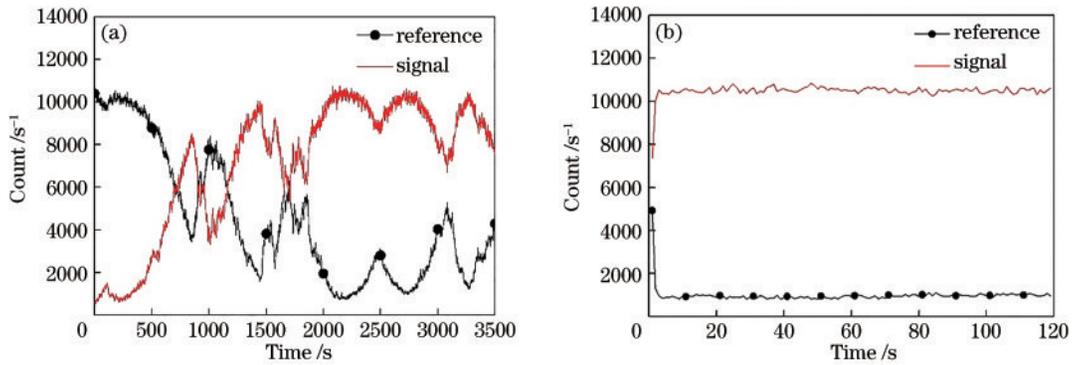


图 6 测试结果。(a)单光子偏振漂移;(b)单光子偏振控制效果

Fig. 6 Test results. (a) Single photon polarization drift; (b) single photon polarization control effect

97.93%±0.96%，而最理想情况下借助手动偏振控制器继续微调,保真度可达到99.76%。

4 结 论

提出了一种用于量子保密通信系统的偏振态制备、强光偏振控制、单光子偏振态控制一体的实时量子态控制系统。在偏振态制备部分通过FPGA控制扰偏器实现了不同偏振态的制备,通过强光偏振控制部分控制偏振态到达目标状态,实时监测和反馈控制偏振态制备保真度,实验中偏振态制备保真度达到99.11%±0.44%。在单光子偏振控制部分,通过设定合适的积分时间实时监测单光子偏振态,通过偏振控制算法实时反馈优化偏振保真度,保真度达到97.93%±0.96%。利用FPGA流水线及并行处理的优势,由FPGA统一作为中央处理器代替计算机作为控制核心来提高系统的处理效率。控制过程中各个部分的FPGA、扰偏器、电控偏振控制器、单光子探测器可以统一集成,为实现量子保密通信系统集成化、小型化实时偏振控制提供了解决方案。

参 考 文 献

[1] 龙桂鲁,潘栋.量子直接通信研究进展[J].信息通信技术与政策,2021,47(7):1-7.
Long G L, Pan D. Progress in quantum secure direct communication[J]. Information and Communications

Technology and Policy, 2021, 47(7): 1-7.

[2] 龙桂鲁.量子安全直接通信原理与研究进展[J].信息通信技术与政策,2020(7):10-19.
Long G L. Quantum secure direct communication: principles and progress[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2020(7): 10-19.
[3] Wang S, Yin Z Q, He D Y, et al. Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 154-161.
[4] Fan-Yuan G J, Lu F Y, Wang S, et al. Robust and adaptable quantum key distribution network without trusted nodes[J]. Optica, 2022, 9(7): 812-823.
[5] Wang J P, Li Z H, Sun Z Q, et al. Loss-tolerant measurement device independent quantum key distribution with reference frame misalignment[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(9): 092701.
[6] Ding Y Y, Chen H, Wang S, et al. Polarization variations in installed fibers and their influence on quantum key distribution systems[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27923-27936.
[7] 刘令令,景明勇,于波,等.单光子相位编码量子密钥分发系统中的偏振控制[J].激光与光电子学进展,2015,52(7):262-266.
Liu L L, Jing M Y, Yu B, et al. Polarization control in single photons phase coding quantum key distribution system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 262-266.
[8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Suprano A, Zia D, Polino E, et al. Dynamical learning of a photonics quantum-state engineering process[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(6): 066002.
- [12] Martinelli M. A universal compensator for polarization changes induced by birefringence on a retracing beam[J]. *Optics Communications*, 1989, 72(6): 341-344.
- [13] 尤阳, 漆云凤, 何兵, 等. 光纤激光主动偏振控制技术的原理与进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 100001.
You Y, Qi Y F, He B, et al. Principles and development of active polarization control technology for fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 100001.
- [14] Bedroya O, Li C Y, Qian L, et al. Resource-efficient real-time polarization compensation for MDI-QKD with rejected data[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 5-9, 2021, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2021: JTh3A.2.
- [15] 安辉耀, 刘敦伟, 耿瑞华, 等. 量子通信系统中基于 FPGA 的偏振控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(8): 1917-1921.
An H Y, Liu D W, Geng R H, et al. Polarization controlling by FPGA for quantum security communication [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1917-1921.
- [16] Guo H, Liu N, Li Z, et al. Generation of continuous-variable high-dimensional entanglement with three degrees of freedom and multiplexing quantum dense coding[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(12): 2828-2835.
- [17] 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.
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.
- [18] 尹明, 粟荣涛, 王小林, 等. 基于 SPGD 算法的光纤激光偏振控制理论与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090602.
Yin M, Su R T, Wang X L, et al. Theoretical and experimental research on polarization control of fiber laser based on SPGD algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090602.
- [19] 尤阳, 漆云凤, 沈辉, 等. 基于遗传退火算法的光纤激光主动偏振控制技术研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2314002.
You Y, Qi Y F, Shen H, et al. Research on active polarization control system of fiber laser based on a mixed genetic algorithm and simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2314002.
- [20] 王思尧. 光纤偏振稳定技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
Wang S Y. Research on fiber polarization stabilization technology[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [21] Yin H L, Liu P, Dai W W, et al. Experimental composable security decoy-state quantum key distribution using time-phase encoding[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29479-29485.
- [22] Yin H L, Fu Y, Liu H, et al. Experimental quantum digital signature over 102 km[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(3): 032334.
- [23] 胡正良, 蒋鹏, 马丽娜, 等. 利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0910001.
Hu Z L, Jiang P, Ma L N, et al. Suppression of polarization induced signal fading and phase noise utilizing orthogonal-polarization switching method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0910001.