物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统

曹若琳 彭清轩 王金东 陈勇杰 黄云飞 於亚飞 魏正军 张智明

Real-time polarization compensation system for wavelength division multiplexing in low noise fiber channel based on single photon counting feedback

Cao Ruo-Lin Peng Qing-Xuan Wang Jin-Dong Chen Yong-Jie Huang Yun-Fei Yu Ya-Fei Wei Zheng-Jun Zhang Zhi-Ming

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 130306 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220120
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20220120
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤偏振编码量子密钥分发系统荧光边信道攻击与防御
Eavesdropping and countermeasures for backflash side channel in fiber polarization-coded quantum key distribution
物理学报. 2019, 68(13): 130301 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190464

基于峰值补偿的连续变量量子密钥分发方案
Continuous-variable quantum key distribution based on peak-compensation
物理学报. 2021, 70(11): 110302 https://doi.org/10.7498/aps.70.20202073

量子密钥分发系统中抗扰动偏振编码模式的实验研究
Experimental research on disturbance resistant polarization modulation mode for quantum key distribution
物理学报. 2021, 70(18): 180302 https://doi.org/10.7498/aps.70.20210749

一种基于标记单光子源的态制备误差容忍量子密钥分发协议
State preparation error tolerant quantum key distribution protocol based on heralded single photon source
物理学报. 2022, 71(3): 030301 https://doi.org/10.7498/aps.71.20211456

基于混合编码的测量设备无关量子密钥分发的简单协议
A simple protocol for measuring device independent quantum key distribution based on hybrid encoding
物理学报. 2020, 69(19): 190301 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200162

基于量子催化的离散调制连续变量量子密钥分发
Discrete modulation continuous-variable quantum key distribution based on quantum catalysis
物理学报. 2020, 69(6): 060301 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191689

基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统*

曹若琳 彭清轩 王金东† 陈勇杰 黄云飞
於亚飞 魏正军 张智明

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广州 510006)

(2022 年 1 月 17 日收到; 2022 年 2 月 21 日收到修改稿)

光纤信道由于受环境影响产生的随机双折射等物理效应使得在其中传输的光信号具有敏感的偏振变化, 严重影响了偏振编码量子密钥分发系统的性能. 本文提出了一种利用单光子计数作为反馈信号的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统, 该系统通过探测共轭参考光的光子计数得到光纤信道偏振变化信息, 设计补偿算法控制电动偏振控制器实时校准对应偏振基下量子信号光的偏振态, 成功实现了稳定的光纤信道偏振补偿. 为验证补偿系统的有效性, 进行了传输距离为 25.2 km 的基于 BB84 协议的量子密钥分发测试, 在实验室环境和模拟城域网地埋光纤环境下得到了长达 8 h 的稳定测试结果, 平均量子比特误码率分别为 0.52% 和 1.25%. 该实验结果表明本系统可在城域网地埋光纤环境下保障偏振编码量子密钥分发的稳定工作.

关键词: 量子密钥分发, 偏振补偿, 波分复用, 地埋光纤

PACS: 03.67.Dd, 03.67.Hk, 42.81.Gs **DOI:** 10.7498/aps.71.20220120

1 引 言

量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD) 系统利用量子物理学的基本原理保证了密钥分发的无条件安全性[1,2], 自 1984 年第一个量子密钥分发协议 (BB84 协议) 被提出以来[3], 经过三十多年的理论研究和实验技术的发展, 已成为量子信息领域最为成熟的重要分支. 在以光纤信道为传输媒介的 QKD 系统中, 可以使用多种自由度对光子信号进行编码, 如偏振[4,5]、相位[6]、角动量[7] 及时隙[8] 等, 其中, 由于偏振具有编解码简单等优点, 因此成为量子密钥分发常用的编解码方式之一[3,9]. 但是, 由于光子偏振态在单模光纤中传输时受到光纤本身制造缺陷或外界环境的影响, 造成随机的偏振变化[10], 严重影响了偏振编码 QKD 系统的性能[11]. 因此, 为提高偏振编码 QKD 系统的稳定性, 需要引入光纤信道偏振补偿技术[12]. 光纤信道偏振补偿系统的目标是为了使 QKD 系统能够稳定工作, 对于不同架构的 QKD 系统, 其偏振补偿系统的技术需求也不尽相同. 目前, 主要有制备测量型 (prepare-and-measure, PM) QKD 系统和基于纠缠 (entanglement-based, EB) 的 QKD 系统两大类. 对于应用在 PM-QKD 系统中的偏振补偿方案, 可分为中断式偏振补偿、时分复用偏振补偿 (time division multiplexing, TDM)、波分复用偏振补偿 (wavelength division multiplexing, WDM) 和基于后处理过程的偏振补偿方案. 在中断式偏振补偿

* 国家自然科学基金 (批准号: 62071186, 61771205)、广东省自然科学基金 (批准号: 2015A030313388)、广东省科技计划 (批准号: 2015B010128012) 和广东省重点实验室基金(批准号: 2020B1212060066)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangjindong@m.scnu.edu.cn

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

方案[13]中, 接收端的偏振补偿程序可根据传输光纤的长度设置不同的中断补偿周期, 在接收端向发送端发出执行偏振补偿任务的中断信号后, 系统进入偏振补偿阶段, 当接收端判断补偿后的偏振态(state of polarization, SOP)和目标SOP足够接近时(其偏差小于用户设置的阈值), 系统进入QKD阶段. 2007年, Chen等[13]首次测试的中断式偏振补偿系统用于QKD的平均量子误码率(quantum bit error rate, QBER)约为3.9%. 在TDM方案中[14,15], 参考光与量子信号光利用时分复用的方式进行传输, 接收端利用参考光和量子信号光设置的不同时延, 使用不同的探测器分别探测2种光信号, 通过测量参考光的偏振消光比来判断是否需要纠偏. 2009年, Chen等[14]首次测试的TDM方案用于QKD的平均误码率为5.27%. 在WDM方案中[11,16,17], 参考光与量子信号光利用不同波长进行波分复用来实现同时传输, 接收端利用解波分复用器分离参考光与量子信号光, 通过光电探测器探测参考光的光强信息来反馈SOP的变化. 2008年和2009年, Xavier等[11,16]设计了2种WDM方案, 分别运行在8.5 km和16 km的光纤信道上, 测试了偏振补偿系统引起的附加误码率分别为0.04%和1.2%. 2018年, Li等[17]设计的WDM方案在68 km的空中光缆中测试的QKD误码率低于1.5%. 在基于后处理过程的偏振补偿方案中[18], 接收端利用QKD后处理过程中误码纠错时舍弃的(约10%)密钥位来计算反馈控制信号, 该系统未使用参考光信号, 因此减少了相应设备, 但需要累积一定时间以获得偏振变化的信息. 2016年, Ding等[18]设计的基于后处理过程的偏振补偿方案用于QKD的平均误码率为2.32%. 对于应用在EB-QKD系统的偏振补偿方案[19,20], 利用了纠缠光子对之间的关联, 在其中1条光纤信道上设置了1组液晶可变延迟器作为电动偏振控制器(electrical polarization controller, EPC), 并采用QBER作为反馈控制信号来执行偏振补偿操作. 2021年, Shi等[19,20]设计的EB-QKD系统的偏振补偿方案平均误码率约为6.4%, 可以用来应对缓慢偏振变化的应用场景.

相较于中断式偏振补偿方案, TDM方案不需要中断QKD过程, 可实现实时的偏振补偿工作, 而相较于TDM方案, WDM方案的参考光信号未占用发送时隙, 提高了量子信号光的传输效率, 更适合用于高速率的QKD系统. 本文旨在利用WDM系统的优势, 进一步降低其误码率, 实现低噪高速的光纤信道补偿系统. 基于WDM偏振补偿的QKD系统的误码的主要来源有: 1) 参考光产生的拉曼散射噪声以及器件串扰引入的误码[11]; 2) 参考光和量子信号光由于波长不同而存在的补偿偏差[16]; 3) 偏振补偿精度导致的偏振补偿偏差. 针对上述引入误码的主要来源, 我们设置了平均每脉冲光子数为0.4的弱参考光以及引入滤波器(filter, FI)来减小由于参考光的散射噪声引入的误码, 设置了参考光和量子信号光波长间隔为0.8 nm以控制波长不同而引起的偏振补偿偏差, 同时采用了单光子探测器输出的数字信号作为计算补偿反馈的参量, 无需再进行模数转换, 有效提升了偏振补偿精度. 在实际应用方面, 偏振补偿速度也是一个很重要的挑战, 因此, 本文还通过引入共轭偏振基并行补偿算法有效提升了偏振补偿速度. 基于上述改进, 我们最终构建了1个基于WDM的光纤信道补偿系统, 并在25.2 km的光纤链路上实现了BB84协议4种偏振态的稳定传输, 分别得到了8 h实验室环境和模拟城域网地埋光纤扰动环境下4种量子信号光的传输误码率, 测试结果显示本系统具有低误码率优势, 可用于解决城域网内地埋光纤中的偏振变化问题.

2 基本原理

当发送的偏振光信号$|P\rangle_{in}$经过光纤信道传输到接收端时, 信号的SOP由于单模光纤受到自身应力或外界环境的影响, 产生随机双折射引起偏振模色散, 使得发送的偏振态出现随机变化[21]. 假设光纤信道的偏振传输矩阵为$\boldsymbol{M}_{\rm E}$, 则输出偏振光$|P\rangle_{\rm out}$与输入偏振光$|P\rangle_{\rm in}$的关系有[11]:

$$\mathbf{M}_{\rm E}|P\rangle_{\rm in}=|P\rangle_{\rm out}. \tag{1}$$

为解决光纤信道对输入偏振光的影响, 需引入偏振控制装置. 偏振控制实验通常在光纤信道末端与接收端的起始位置处设置EPC, EPC是由4个光纤挤压器S_1, S_2, S_3和S_4组成的, 通过输入数字/模拟电压信号驱动挤压器. 当光纤在压力作用下产生线性双折射时, 根据不同的相位延迟, EPC可以使输入的任意偏振态的转换为需要的目标偏振态[22]. 例如, 当EPC提供琼斯矩阵为$\boldsymbol{M}_{\rm R}$的偏振变化时, 若$\mathbf{M}_{\rm R}=\mathbf{M}_{\rm E}^{-1}$, 那么受到光纤信道偏振影响的输出

偏振光$|P\rangle_{\rm out}$经过 EPC 后将有:

$$|P\rangle_{\rm out}=\mathbf{M}_{\rm R}\mathbf{M}_{\rm E}|P\rangle_{\rm in}. \tag{2}$$

由此, 实现了偏振光信号的补偿操作. 在利用 WDM 的偏振补偿系统中, 可以通过引入一组共轭线偏振态的参考光与量子信号光进行同时传输, 光纤信道带来的偏振变化将同时作用于这组非正交偏振态的参考光和量子信号光. 设置接收端 EPC 以及偏振分束器 (polarization beam splitter, PBS) 的光轴对准发送来的线偏振态参考光, 利用不同线偏振态在偏振分束器输出端的投影比值不同的原理, 选择偏振分束比中输出极小值一端对应的参考光单光子计数值作为反馈偏振态的参量. 根据光子计数值的变化判断偏振态是否改变, 然后根据变化量施加步长电压至 EPC, 控制 EPC 完成对参考光和信号光偏振态的补偿. 理论上利用 1 组非正交的参考光即可实现对信号光任意偏振状态的完全控制[11].

在选择参考光与量子信号光的波长时, 由于光子偏振态在产生偏振变化时具有波长依赖性, 参考光与量子信号光因波长不同, 随着光纤信道传输后偏振变化也会产生偏差, 导致误码率的升高. 该变化程度受到参考光与量子信号光之间的波长间隔$\Delta\omega$和光纤信道差分群时延τ的影响[16], 当满足$\tau\Delta\omega\ll1$时, 通过补偿参考光偏振变化即可实现对量子信号光偏振态的良好控制, 因此, 我们选用参考光波长与量子信号光波长间隔为 0.8 nm, 光纤信道 PMD 为 0.04 (ps/$\sqrt{\rm km}$), 满足$\tau\Delta\omega\ll1$, 因此参考光偏振态与量子信号光偏振态具有较好的相关性[23].

从实际应用方面考虑, 实时偏振补偿模块应具有较短的补偿时间, 因此, 我们引入了共轭偏振基并行补偿方式. 在偏振补偿装置中, 现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 根据接收到的反馈信息控制 EPC 进行偏振态的变化, 当 FPGA 输入电压信号控制 EPC 的 4 个挤压器时, 偏振态将绕x轴、y轴实现顺时针或者逆时针的变化[24]. 任意 1 个完全偏振光均可用邦加球上 1 个点表示[21], 在图 1 中目标偏振态为$|H\rangle$和$|+\rangle$, 经过干扰后的待补偿偏振态为$|H'\rangle$和$|+'\rangle$. 对于偏振态$|H'\rangle$补偿步骤为: EPC 调节挤压器使$|H'\rangle$绕邦加球的x轴旋转为偏振态$|A\rangle$; 再调节另 1 个挤压器使$|A\rangle$绕邦加球的y轴旋转到偏振态$|H\rangle$. 对于偏振态$|+'\rangle$补偿步骤为: EPC 调节挤压器使$|+'\rangle$绕邦加球的y轴旋转为偏振态$|B\rangle$; 再调节另 1 个挤压器使$|B\rangle$绕邦加球的x轴旋转到偏振态$|+\rangle$. 若利用 1 个 EPC 补偿 1 组非正交偏振态, 则控制其中 1 个偏振态进行偏振变化时另 1 个偏振态也会随之变化, 即补偿 1 个基的偏振态时会影响另 1 个基下的偏振态, 补偿过程耦合在一起会导致整个过程的步骤增多收敛速度变慢[25], 增加补偿时间, 因此若利用 2 个 EPC 分别控制一组共轭基下的偏振态的进行并行补偿工作时, 可提升补偿速度, 减小补偿时间.

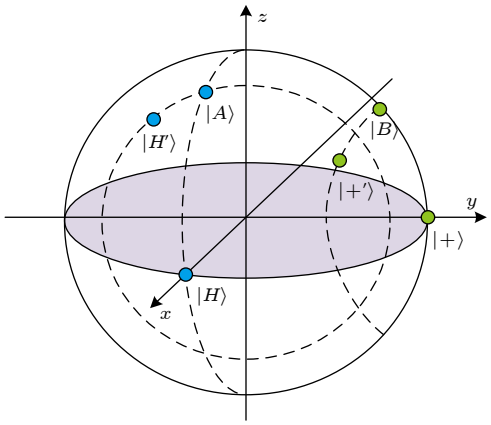

图 1 SOP 在邦加球上的补偿过程示意图

Fig. 1. Compensation process of SOP on Poincaré sphere.

3 低噪声光纤信道 WDM 实时偏振补偿系统

低噪声光纤信道 WDM 实时偏振补偿系统示意图如图 2 所示. 在发射端 (Alice), 高速皮秒脉冲激光器 (laser diodes, LD)LD-2 产生频率为 62.5 MHz, 脉冲宽度 50 ps, 中心波长为 1550.13 nm 的量子信号光, LD-1 和 LD-3 用于产生频率为 250 MHz, 脉冲宽度为 50 ps, 中心波长分别为 1550.93 nm 和 1549.32 nm 的参考光, 2 种参考光与量子信号光的波长间隔均为 0.8 nm. 光纤信道 PMD 为 0.04 ps, 根据$\tau\Delta\omega\ll1$可知参考光 SOP 与量子信号光 SOP 具有良好相关性. 光隔离器 (isolator, ISO) 可减小回波反射噪声, 保护 LD 使其具有稳定的工作状态. 滤波器用于限制对应波长参考光的带宽范围, 从而减小参考光对信号光探测时的噪声影响. 密集波分复用器 (dense wavelength division multiplexer, DWDM) 波长间隔为 0.8 nm, 其中 C33 和 C35 通道用于传输共轭参考光, C34 通道用于传输量子信号光, 插入损耗为 0.9 dB, 相邻通道间隔离度大于

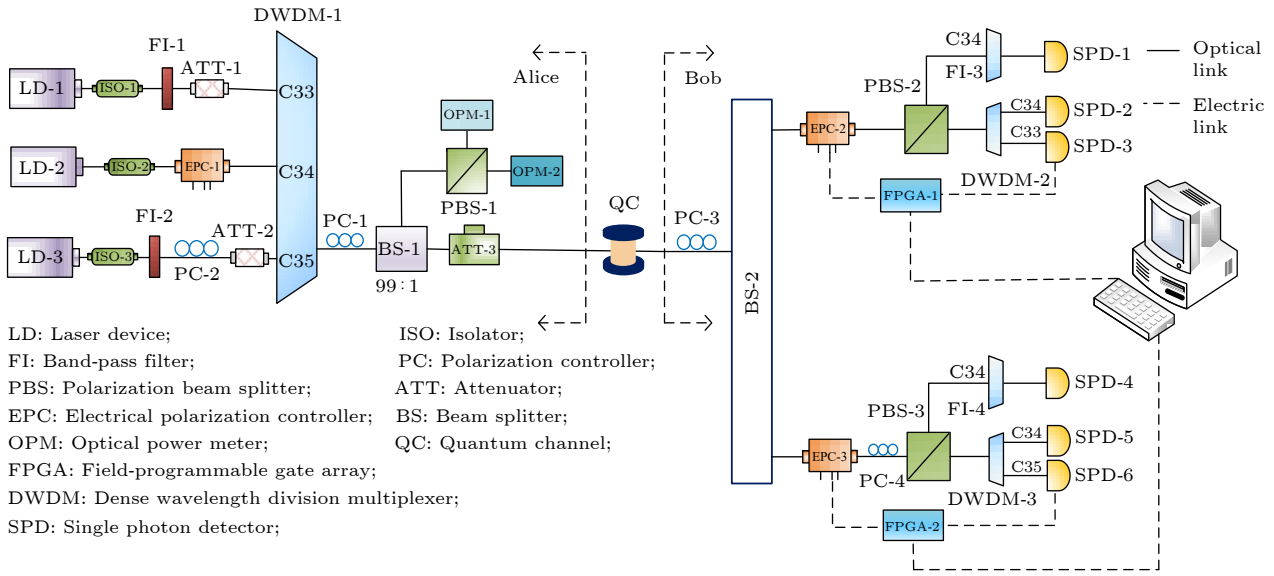

图 2 低噪声光纤信道 WDM 实时偏振补偿系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of low noise fiber channel WDM real-time polarization compensation system.

30 dB, 非相邻通道间隔离度大于 35 dB. 分束器 (beam splitter, BS)BS-1 分束比为 99∶1, 其中 99% 的尾纤连接 PBS, 1% 的尾纤连接衰减器 (attenuator, ATT). C33 和 C35 通道对应 1 组共轭 SOP 参考光, 通过利用手动偏振控制器 (polarization controller, PC) PC-1, PC-2, PBS-1 和光功率计 (optical power meter, OPM) OPM-1 和 OPM-2 进行偏振态的制备和本地校准, 调节 PC 可使对应通道的偏振光与 PBS 的光轴对准[4], $|H\rangle$参考光在 PBS 透射端口 OPM 有极大值, $|+\rangle$参考光经过 PBS 在透射端口与反射端口 OPM 有 1∶1 比值, 从而得到共轭参考光, PBS-1 消光比为 30 dB, 本地校准操作将在开始量子密钥分发工作前完成. 在光信号进入 25.2 km 光纤信道前, ATT 将每路参考光衰减至平均光子数 0.4, 该设置可以满足补偿程序的控制精度需求, 同时, 光强较弱的参考光信号产生散射噪声和串扰对量子信号光的探测影响也随之降低.

在接收端 (Bob), BS 将传输来的光信号进行等比例分束, PC-3 与 BS 上路尾纤后的 PBS-2 用于测量 Z 基下参考光和量子信号光的$|H\rangle$、$|V\rangle$, 下路尾纤后的 PC-4 用于将光轴旋转 45°再与 PC-3 和 PBS-3 共同测量 X 基下参考光和量子信号光的$|+\rangle$、$|-\rangle$. EPC-2 与 EPC-3 分别用于控制 Z 基于 X 基下的偏振光信号. DWDM-2 和 DWDM-3 将对应通道的参考光和量子信号光进行解复用, FI-3 和 FI-4 分别用于滤除 C33 和 C35 通道的参考光, 仅允许 C34 通道量子信号光进入单光子探测器 (single photon detector, SPD).

参考光利用门控频率为 1.25 GHz 的 InGaAs/InP 单光子探测器进行光子计数, 探测门宽约 300 ps, 死时间为 100 ns, 探测效率为 18.1%, 平均暗计数为 1.2×10^{-6}. SPD-3、SPD-6 将探测到的参考光光子计数转化为 LVTTL 数字信号并实时传送至 FPGA, 由 FPGA 操控 EPC 实现偏振控制. 图 3 中偏振控制程序采用了近似梯度下降搜索算法, 设计的物理思想是: 1) 利用不同的线偏振态在接收端偏振分束器输出端的投影比值不同的原理, 选择偏振分束比中输出极小值一端对应的参考光单光子计数值作为反馈偏振态的参量; 2) 在理想情况中 (不考虑单光子探测器的暗计数) 的目标线偏振态经过偏振分束器投影后极小值端口的单光子计数为 0; 3) 当偏振态发生变化时, 其投影后极小值端口的光子计数值将会上升, 当上升至超过错误阈值时, 根据当前计数与目标计数作差的距离值计算步长电压, 将步长电压加载至 EPC 的任一挤压器上进行偏振态的变化; 4) 若再次累计光子计数得到的新距离值相较于上一次的距离值有所减小则继续施加步长电压至该挤压器, 否则更换挤压器施加步长电压, 直至补偿后的计数值小于错误阈值, 完成对参考光及信号光的偏振补偿工作.

其实施步骤如下: 1)FPGA 统计单采时间 (125 μs) 的 LVTTL 数字信号计数后, 将该计数值转换为 12 位二进制数以得到反馈偏振参量; 2) 根

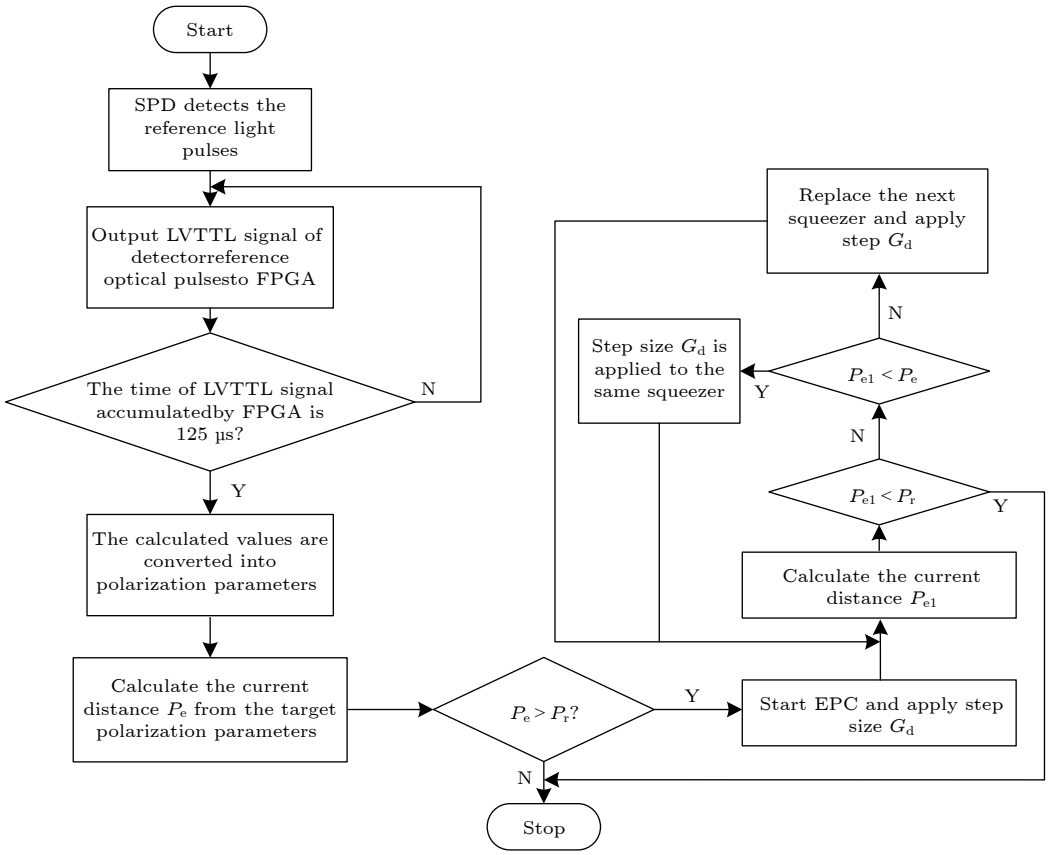

图 3 偏振补偿程序流程图

Fig. 3. Flow chart of polarization compensation program.

据偏振态信号传输后未发生偏振变化的光子计数值设置目标偏振参数 (包含暗计数), 计算当前反馈偏振参数与目标偏振参数的距离值 P_e; 3) 当距离值 P_e > 依据 2% 误码率对应的错误阈值 P_r, 同时符合累计判断机制 (防止偶然出现的光子数变化导致超出阈值的情况), 则开启补偿工作, 否则结束补偿; 4) 在 EPC 的某一挤压器 (n) 上施加步长电压 G_d ($G_d = P_e/\eta$, η为设定的参数值), 统计当前单采时间内的反馈偏振参数对应的距离值 P_{e1}, 若 $P_{e1} < P_r$, 则结束补偿工作, 若 $P_{e1} > P_r$, 则继续进行判断; 5) 判断当 $P_{e1} < P_e$, 则继续在当前挤压器上施加 G_d; 若 $P_{e1} > P_e$, 则更换挤压器施加 G_d, 并更新 $P_e = P_{e1}$, 循环执行步骤 4), 5) 直至结束补偿工作.

4 基于 QKD 系统的偏振补偿实验测试

本偏振补偿系统的有效性利用基于 BB84 协议的偏振编码 QKD 实验进行测试, 整体实验中参考光脉冲、信号光脉冲及探测器均由时钟发生器提供时钟同步. 如图 2 所示, Alice 端 LD-2 产生频率为 62.5 MHz, 脉宽为 50 ps 的信号光脉冲, 由 FPGA 输出数字调制信号传输至 EPC 压电驱动模块制备偏振光, 即在 BB84 协议的$|H\rangle$、$|V\rangle$、$|+\rangle$、$|-\rangle$4 种 SOP 下进行切换, 进入光纤信道前由 ATT 将信号光脉冲衰减至单光子量级, 平均光子数为 0.3, 在 Bob 端经过 BS 分束后分别由对应偏振基下的 EPC 进行补偿操作, 信号光探测器为自由运行模式的 InGaAs 单光子探测器, 检测效率设置为 15%, 暗计数为 550/s.

根据文献 [12] 的测试结果可知, 在城域网环境中当地埋光纤长度小于 30 km 时, 所需的偏振补偿速度应达到每秒钟几个 rad[12]. 为测试本系统的实际补偿效果, 通过在 25.2 km 的光纤链路末端处利用 EPC 设置 1 个偏振扰频器, 借助 FPGA 提供随机数字信号至扰偏器的 4 个挤压器, 控制 SOP 在邦加球上实现频率为 2π rad/s 的偏振变化来模拟城域网中地埋光纤的偏振变化现象. 在利用参考光信号的光子计数作为反馈信号来进行实时偏振参量分析的算法中, 我们的目标是使量子信号光的 QBER 最小化, 因为若 SOP 发生变化, 则 QBER

将上升. 本文中的 QBER 为对本实验系统进行偏振补偿效果评估的误码率, 未表示完整 QKD 实验中最终所得的误码率. 为验证补偿效果, 首先在未运行补偿程序时, 测试实验室环境中利用 25.2 km 的单模光纤作为光纤信道的量子信号光$|H\rangle$偏振态变化情况, 如图 4 所示.

图 4 中横坐标表示时间, 纵坐标表示 QBER, 曲线由每秒钟采集 1 次单光子计数计算 QBER 所绘制. 由未进行补偿控制时, 测试量子信号光$|H\rangle$偏振变化引起 QBER 的变化结果可知, 无论在有

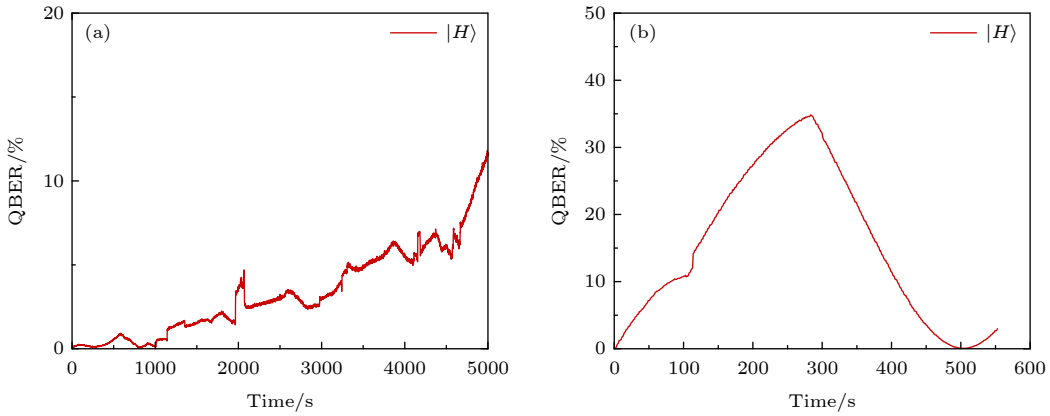

图 4 偏振补偿模块未启动时量子信号光$|H\rangle$偏振变化引起 QBER 变化情况 (a) 测试 90 min 无扰偏器时 QBER 变化情况; (b) 测试 10 min 有扰偏器时 QBER 变化情况

Fig. 4. QBER variation of quantum signal caused by polarization drift without compensation: (a) QBER variation in 90 minutes without scrambler; (b) QBER variation in 10 minutes with scrambler.

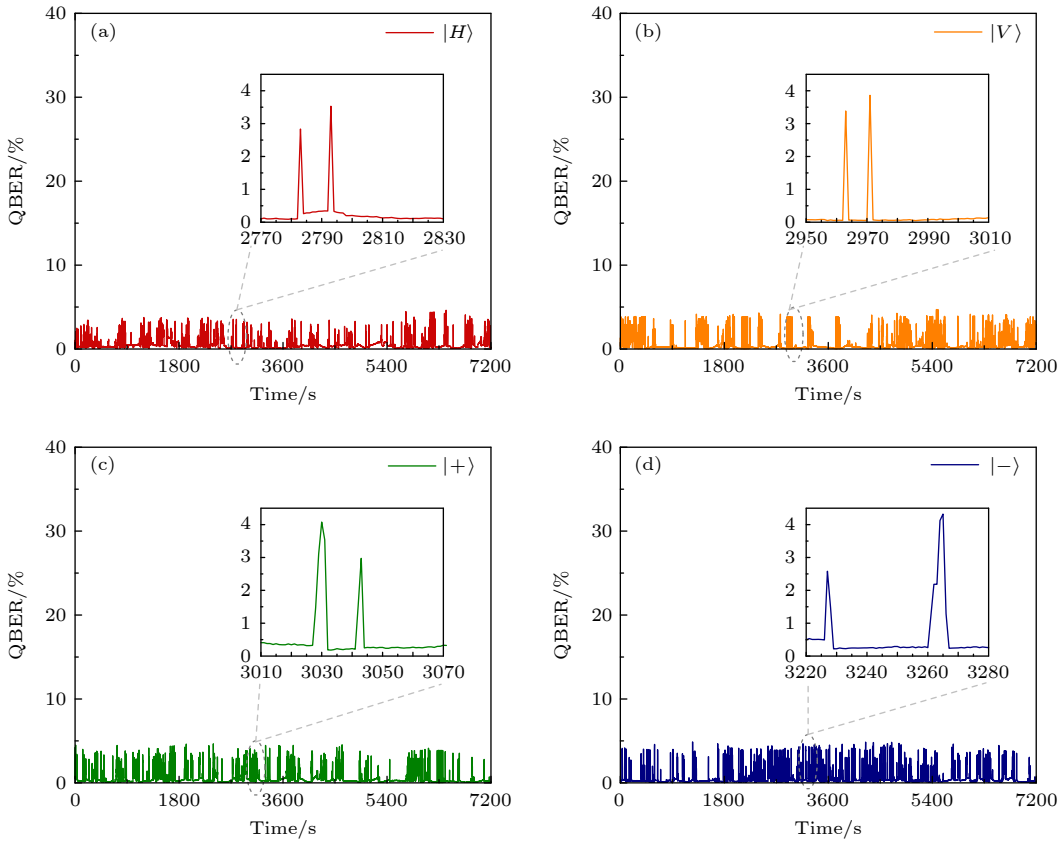

图 5 运行补偿程序时量子信号光的 4 种偏振态 QBER 的变化 (a) 量子信号光$|H\rangle$QBER 的变化; (b) 量子信号光$|V\rangle$QBER 的变化; (c) 量子信号光$|+\rangle$QBER 的变化; (d) 量子信号光$|-\rangle$QBER 的变化

Fig. 5. QBER variation of quantum signal in four polarization states when running the compensation program: (a) QBER variation of quantum signal in $|H\rangle$; (b) QBER variation of quantum signal in $|V\rangle$; (c) QBER variation of quantum signal in $|+\rangle$; (d) QBER variation of quantum signal in $|-\rangle$.

扰偏器还是无扰偏器设置的系统中, 光子偏振态均发生不同程度的变化, 若无偏振控制模块则偏振编码系统难以实现长期的稳定运行. 考虑到 2 组基下的参考光与量子信号光具有不同的波长, 在接收端解复用后, 偏振补偿的反馈信号只选取该基下对应的参考光, 此时另 1 个基下的参考光未作为反馈信号进行补偿工作, 即对于另 1 种基下的量子信号光不具有有效的补偿作用, 并且共轭测量的结果在后处理的对基过程中将被舍弃. 所以我们在实验室设备受限的情况下, 对 2 组基下的参考光与量子信号光分别进行测试.

图 5 和图 6 中横坐标时间单位为 s, 纵坐标表示 QBER, 曲线为每秒钟采集 2 次计数计算 QBER 的结果. 图 5 为无扰偏器时稳定补偿系统对应的 4 种偏振态 QBER 的变化情况, 测试系统连续运行 8 h, 量子信号光发送 4 种偏振态每种态测试 2 h, 计算得到无扰偏器时稳定补偿系统$|H\rangle$、$|V\rangle$、$|+\rangle$、$|-\rangle$的平均误码率为 0.53%, 0.52%, 0.54%, 0.51%, 每次补偿完成后误码率均在 0.4% 以下. 其中, 内插图表示稳定补偿系统测试 4 种量子信号光时, 某一分钟内偏振补偿过程中的 QBER 的变化情况, 可以看到, 当偏振变化导致 QBER 增大时, 补偿系统可在短时间可进行稳定校准. 在内插图中, 尖峰型变化表示一次偏振过程. 当偏振态发生变化后 QBER 将会上升, 当 QBER 上升至超过错误阈值后, 程序启动 EPC 进行偏振态补偿操作, 但在初始补偿阶段, 需要判断当前使用的 EPC 中的某一挤压器是否有效, 此时 QBER 仍会有所上升, 直到使用有效的挤压器进行偏振补偿时, QBER 将会下降, 直至补偿结束.

图 6 为有扰偏器且扰偏速率为 2πrad/s 时补偿系统对应的 4 种偏振态 QBER 的变化情况, 测试系统连续运行 8 小时, 量子信号光发送 4 种偏振态每种态测试 2 小时, 有扰偏器时即模拟城域网内地埋光纤系统的偏振变化系统, 4 个量子信号光$|H\rangle$、$|V\rangle$、$|+\rangle$、$|-\rangle$的平均误码率为 1.29%, 1.26%,

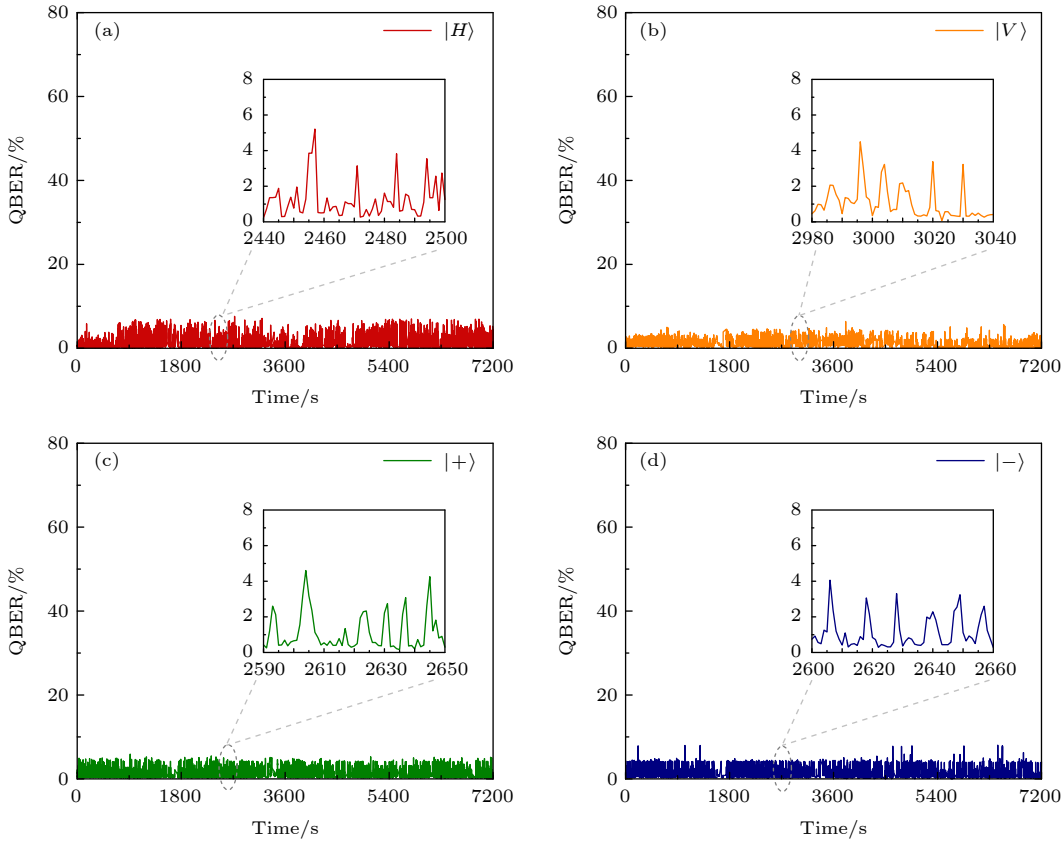

图 6 启动扰偏器后运行补偿程序时量子信号光的 4 种偏振态 QBER 变化 (a) 量子信号光$|H\rangle$QBER 的变化; (b) 量子信号光$|V\rangle$QBER 的变化; (c) 量子信号光$|+\rangle$QBER 的变化; (d) 量子信号光$|-\rangle$QBER 的变化

Fig. 6. QBER variation of the quantum signal in four polarization states after starting the scrambler and running the compensation program: (a) QBER variation of quantum signal in $|H\rangle$; (b) QBER variation of quantum signal in $|V\rangle$; (c) QBER variation of quantum signal in $|+\rangle$; (d) QBER variation of quantum signal in $|-\rangle$.

1.20%, 1.27%, 每次补偿完成后误码率均在 0.8% 以下. 系统测试的 QBER 主要包含 SPD 暗计数 (0.13%) 以及 PBS 有限消光比 (25 dB) 带来的不完全偏振控制. 其中, 内插图表示 4 种量子信号光在测试时间段中的某一分钟内受到扰偏器影响的偏振补偿情况, 可以看到, 补偿系统可在短时间内恢复扰偏速率为 2π rad/s 时产生的偏振变化问题.

实时偏振补偿模块的核心要求具有较短的补偿时间, 能够跟踪偏振态的变化并快速完成补偿工作. 本实验使用 EPC 为四挤压器型压电陶瓷电控偏振控制器, 响应时间为 30 μs, 通过测试有扰偏器工作时进行偏振补偿的算法迭代次数, 得到平均补偿时间约为 8 ms. 由于本实验利用参考光的单光子计数计算偏振补偿模块的反馈参量, 若在不影响信号光探测的前提下, 适当提高参考光平均光子数, 可进一步提升控制精度并且缩短累计时间, 提高补偿速率. 此外, 可以将四挤压器型压电陶瓷电控偏振控制器改进为 $LiNbO_3$ 电光晶体偏振控制器 [26], 该控制器响应时间约为 100 ns, 相较于压电陶瓷电控偏振控制器, 可缩短补偿时间, 进一步缩短补偿时间提升补偿速率, 未来可应用于解决长距离城际地埋光纤或空中光纤中 SOP 快速变化的情况, 进一步提高系统的实用性.

5 结 论

本文构建并实验测试了一种基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统. 在传输距离为 25.2 km 的光纤链路中实现了基于 BB84 协议的量子密钥分发测试, 借助偏振扰动器模拟了城域网内地埋光纤可能引起的偏振变化情况. 在实验室环境和模拟城域网地埋光纤偏振变化的环境中分别进行了 8 h 测试, 实验得到平均 QBER 分别为 0.52% 和 1.25%, 补偿偏振变化的平均时间为 8 ms, 实验结果表明, 本系统可实现城域网地埋光纤环境下偏振编码量子密钥分发的稳定工作.

参考文献

[1] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H 2001 *Rev. mod. phys.* **74** 145

[2] Scarani V, Bechmann P H, Cerf N J, Dušek M, Lütkenhaus N, Peev M 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1301

[3] Bennett C H, Brassard G 1984 *IEEE International Conference on Computers New York* **198** 4

[4] Wang J D, Qin X J, Jiang Y Z, Wang X J, Chen L W, Zhao F, Wei Z J, Zhang Z M 2016 *Opt. Express* **24** 8302

[5] Liu X B, Liao C J, Mi J L, Wang J D, Liu S H 2008 *Phys. Lett. A.* **373** 54

[6] Wang S, Wei C, Yin Z Q, He D Y, Cong H, Hao P L, Guan-Jie F Y, Wang C, Zhang L J, Jie K, Liu S F, Zhou Z, Wang Y G, Guo G C, Han Z F 2018 *Opt. Lett.* **43** 2030

[7] Zhu L, Zhu G X, Wang A D, Wang L L, Ai J Z, Chen S, Du C, Liu J, Yu S Y, Wang J 2018 *Opt. Lett.* **43** 1890

[8] Boucher W, Debuisschert T 2006 *Phys. Rev. A* **72** 1

[9] Bennett C H, Bessette F, Brassard G, Salvail L, Smolin J 1992 *J. Cryptol.* **5** 3

[10] Heffner B L 1992 *IEEE Photon. Tech. L.* **4** 1066

[11] Xavier G B, Walenta N, Vilela de Faria G, Temporão G P, Gisin N, Zbinden H, von der Weid J P 2009 *New J. Phys.* **11** 045015

[12] Ding Y Y, Hua C, Wang S, He D Y, Yin Z Q, Wei C, Zhou Z, Guo G C, Han Z F 2017 *Opt. Express* **25** 27923

[13] Chen J, Wu G, Li Y, Wu E, Zeng H P 2007 *Opt. Express* **15** 17928

[14] Chen J, Wu G, Xu L, Gu X, Zeng H P 2009 *New J. Phys.* **11** 065004

[15] Agnesi C, Avesani M, Calderaro L, Stanco A, Foletto G, Zahidy M, Scriminich A, Vedovato F, Vallone G, Villoresi P 2020 *Optica* **7** 284

[16] Xavier G B, Vilela de Faria G, Temporão G P, & von der Weid J P 2008 *Opt. Express* **16** 1867

[17] Li D D, Gao S, Li G C, Lu X, Wang L W, Lu C B, Yao X, Zhao Z Y, Yan L C, Chen Z Y 2018 *Opt. Express* **26** 22793

[18] Ding Y Y, Chen W, Chen H, Wang C, Li Y P, Yin Z Q, Wang S, Guo G C, Han Z F 2017 *Opt. Lett.* **42** 1023

[19] Shi Y C, Thar S M, Poh H S, Grieve J A, Kurtsiefer C, Ling A 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 4002

[20] Shi Y C, Poh H S, Ling A, Kurtsiefer C 2021 *Opt. Express* **29** 37075

[21] Liao Y B 2003 *Polarization Optics* (Beijing: Science Press) p45 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京: 科学出版社) 第45页]

[22] Zhang Q Y, Zhu Y, Su Y, Zhou H, Jing J S 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 23 (in Chinese) [张启业, 朱勇, 苏洋, 周 华, 经继松 2013 光学学报 **33** 23]

[23] Wang J, Zhu Y, Zhou H, Su Y, Zhang Z Y 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 76 (in Chinese) [王剑, 朱勇, 周华, 苏洋, 张志永 2015 光学学报 **35** 76]

[24] Yan Y, Geng C, Li F, Huang G, Li X Y 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 945

[25] Zhou H, Pu T, Su Y, Xu Z Y, Shen H P, Zhao J Y, Wang Y M, Wu C X 2017 *2017 Quantum Information Technology and Application Symposium proceedings Beijing China* June 15–16, 2017 p68 (in Chinese) [周华, 蒲涛, 苏洋, 徐智勇, 沈荟萍, 赵继勇, 王艺敏, 吴传信 2017 2017量子信息技术与应用研讨会论文集 中国北京 2017年6月15—16日 第68页]

[26] Xi L X, Zhang X G, Tang X F, Weng X A, Tian F 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 804

Real-time polarization compensation system for wavelength division multiplexing in low noise fiber channel based on single photon counting feedback*

Cao Ruo-Lin Peng Qing-Xuan Wang Jin-Dong † Chen Yong-Jie
Huang Yun-Fei Yu Ya-Fei Wei Zheng-Jun Zhang Zhi-Ming

(*Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Materials, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou* 510006, *China*)

(Received 17 January 2022; revised manuscript received 21 February 2022)

Abstract

The physical effects such as random birefringence of fiber optic channels due to environmental influences make the optical signals transmitted in them have sensitive polarization variations, which seriously affects the performance of polarization biased code quantum key distribution systems. In this paper, a low-noise fiber channel wavelength division multiplexing real-time polarization compensation system is presented, where single photon counting is used as a feedback signal. The system can acquire the fiber channel polarization change information by detecting the photon counting of the conjugate reference light. In the system, the compensation algorithm is designed to control the electric polarization controller to calibrate the polarization state of the quantum signal light under the corresponding polarization base in real time, and the stable fiber channel polarization compensation is successfully achieved. In order to verify the effectiveness of the compensation system, a quantum key distribution test based on BB84 protocol with a transmission distance of 25.2 km is conducted, and stable test results of up to 8 hours are obtained in the laboratory environment and the simulated metropolitan area network buried fiber environment, with the average quantum bit error rate being 0.52% and 1.25%, respectively. The experimental results show that this system can guarantee the stable operation of polarization-encoded quantum key distribution in the buried fiber environment in urban areas.

Keywords: quantum key distribution, polarization compensation, wavelength division multiplexing, buried fiber optic

PACS: 03.67.Dd, 03.67.Hk, 42.81.Gs **DOI:** 10.7498/aps.71.20220120

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62071186, 61771205), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2015A030313388), the Science and Technology Projects of Guangdong Province, China (Grant No. 2015B010128012), and the Key Laboratory Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2020B1212060066).

† Corresponding author. E-mail: wangjindong@m.scnu.edu.cn