

针对电力悬空光缆量子密钥分发的高速偏振反馈算法

唐鹏毅^{1,2}, 李国春³, 高松², 余刚², 代云启², 相耀², 李东东²,
张英华⁴, 吴冰³, 赵子岩³, 高德荃³, 刘建宏^{2,4}, 王坚¹

¹中国科学技术大学近代物理系, 安徽 合肥 230026;

²科大量子技术股份有限公司, 安徽 合肥 230088;

³国网电力信息通信有限公司, 北京 100761;

⁴北京国盾量子信息技术有限公司, 北京 100193

摘要 电力悬空光缆中光子偏振态易受外界快速无规则扰动影响, 导致偏振编码量子密钥分发(QKD)系统成码率降低甚至无法成码, 为对抗链路中偏振态的快速变化, 设计了高速偏振反馈系统(FPF), 介绍了该系统的工作原理。重点研究了系统中关键的偏振反馈算法, 包括对偏振收敛程度评价函数及搜索算法的选取, 偏振反馈周期与成码周期的监测条件的选取, 以及监测阈值的自适应选取。整个系统在实际悬空光纤上进行了实测, 测试结果表明该系统能够解决中远距离悬空光缆中 QKD 成码难的问题。

关键词 光通信; 量子通信; 偏振反馈算法; 爬山算法; 电力悬空光缆

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0106005

Fast Polarization Feedback Algorithm for Quantum Key Distribution with Aerial Fiber for Power Grid

Tang Pengyi^{1,2}, Li Guochun³, Gao Song², Yu Gang², Dai Yunqi², Xiang Yao²,
Li Dongdong², Zhang Yinghua⁴, Wu Bing³, Zhao Ziyang³,
Gao Dequan³, Liu Jianhong^{2,4}, Wang Jian¹

¹Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²QuantumCTek Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China;

³State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd. (SGIT), Beijing 100761, China;

⁴QuantumCTek Co., Ltd., Beijing 100193, China

Abstract Photon polarization state in aerial fiber for power grid is susceptible to the rapid external random disturbances, which leads to low coding rate of polarization-coded quantum key distribution (QKD) system or even zero coding rate. To counter the rapid change of polarization state in the link, we design polarization feedback system (FPF), and describe the working principle of the system. The key polarization feedback algorithms in the system are studied, including the selection of evaluation function and search algorithm of polarization convergence, the selection of monitoring conditions of polarization feedback cycle and coding cycle, and the adaptive selection of monitoring threshold. The whole system is measured on actual aerial fibers. The test results show that the system and algorithm can solve the problem of QKD code in intermediate-distance installed aerial fiber.

Key words optical communications; quantum communications; polarization feedback algorithm; hill climbing algorithm; aerial fiber for power grid

OCIS codes 060.5565; 060.2330; 150.5495

收稿日期: 2017-06-15; 收到修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 北京市科技计划课题(Z171100001217002)

作者简介: 唐鹏毅(1988—), 男, 博士, 主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: tangpypy@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王坚(1975—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: wangjian@ustc.edu.cn

(通信联系人)

1 引 言

现代电力系统的运行与控制高度依赖信息交互与传输,电力系统与信息、通信系统已逐渐融合成为高度集成的复杂系统。信息技术在提供便利的同时,也将信息安全的潜在威胁叠加到电力系统的安全稳定中^[1]。例如,2015年12月,乌克兰电力部门遭受到恶意代码攻击,通过远程下达断电指令,最终导致7个110 kV变电站和23个35 kV变电站出现故障,发生大规模停电事故^[2]。由此可见,电力通信系统一旦受到安全攻击或发生数据泄露,就会对整个电力系统造成灾难性后果^[3]。由于传输距离远、环节多,电力信息传输过程成为了薄弱环节,容易受到伪指令攻击和发生信息泄露,因此需要一种安全的通信方案确保电力网络的通信安全。量子通信是目前唯一无条件安全通信方案,是解决电网通信安全问题的一个重要研究方向。

BB84协议是目前应用最广泛的量子密钥分发(QKD)协议^[4],BB84协议中定义的量子信息可以编码在光子的偏振态上,在光纤中传输,并在发送和接收双方进行密钥提取,生成安全密钥^[5-7]。光子在单模光纤中传输时,温度变化、受力不均、电磁场变化和光纤固有特性等均会影响光纤内双折射效应,从而使偏振态发生变化。实际通信基础设施中存在相当比例的光缆属于架空架设,尤其是在地形复杂的野外,随时变化的风力等外因会对光纤产生无规则、持续的干扰。普通的光子偏振态在该光纤传输中将发生无规则的剧烈变化,给系统引入较大的量子密钥误码率(QBER),甚至无法产生有效密钥。因此偏振编码量子通信系统必须考虑相应的设计用以对抗甚至消除快速变化的外界环境对光传输信道的干扰^[8]。

电力系统光缆架空部分长,与其他复杂信道相比受扰动更加频繁,干扰频率在毫秒量级,而目前的QKD偏振控制是基于QKD系统成码的弱相干光实现的自反馈控制^[5],对外界环境的响应周期为几十毫秒。这导致偏振编码的QKD自身的弱光反馈控制无法适应电网通信中环境扰动带来的影响,从而导致误码率过高。因此对于电力架空光缆需要引入高速偏振反馈系统(FPF)来对抗长距离架空光缆传输过程中光子偏振态的快速变化,因此对于电力架空光缆需要引入高速偏振反馈系统来对抗长距离架空光缆传输过程中光子偏振态的快速变化^[9-12]。

本文根据对长距离架空光缆偏振随时间变化速

度的测试,提出了应对该变化的高速偏振反馈系统光路原理及反馈算法。通过理论分析总结偏振评价函数,实验室模拟得出合适的偏振反馈算法,并结合实地环境做了环境自适应设计,使系统能够在偏振变化未达到影响QKD成码之前迅速完成偏振态的补偿。

2 系统原理

在实际悬空光缆环境中,本课题组使用强光照射华东地区68 km的一条悬空光缆,光子受扰动发生偏振态变化,针对光子偏振态变化进行测试,以估算架空光缆所需的偏振反馈速度。测试中发射H偏振态的偏振光,脉冲强度约为1600个光子计数,经过68 km悬空光缆后接收端使用正交H/V 2路探测器进行偏振态检验。图1为测试中的1次典型数据,横轴代表采样时间,单位为毫秒,纵轴代表因偏振改变对误码率的贡献。根据经验,偏振改变引入的误码率超过2.5%就会对QKD成码率产生较明显的影响。经过对不同天气、不同时间的测试数据的分析,得到悬空光缆中偏振变化速度分布如图2所示,横轴表示偏振态改变导致的误码率超过2.5%所需的时间,纵轴为出现的概率。

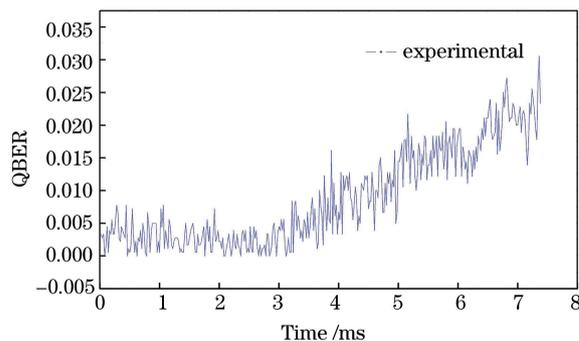


图1 光子偏振态变化测试

Fig. 1 Test of photon polarization state change

由于FPF反馈速度要求高,因此采用强光反馈的设计,系统结构设计如图3所示,图中H,V,P,N分别指偏振角度为 0° , 90° , 45° , 135° 的偏振光。偏振反馈系统制备的参考光经波分复用器与QKD系统用信号光耦合,通过相同信道传输至接收方,在接收方经解波分复用得到偏振反馈用的参考光和QKD系统用信号光^[13]。为了确保偏振相关性,参考光和QKD信号光为密集波分复用的相邻波段,波长相差0.8 nm。参考光由1个DFB激光器产生特定偏振态(H偏振态)的脉冲光,经50:50保偏分束器(BPS)分束后,对其中一路进行延时和偏

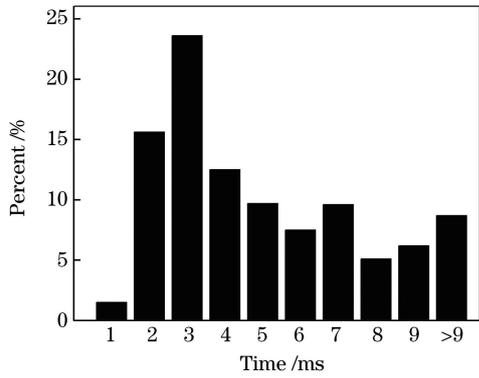
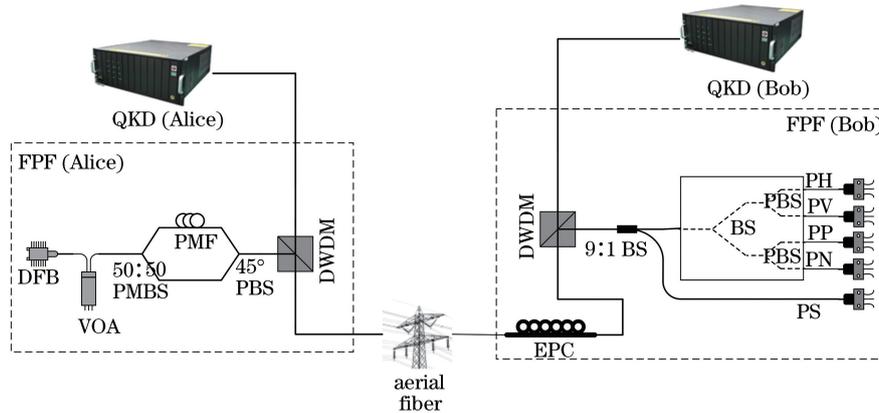


图 2 偏振变化引入的误码率超过 2.5% 所用时间的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of time used corresponding to the QBER over 2.5% induced by polarization changes



DFB: distributed feedback laser; VOA: variable optical attenuator; PMBS: polarization maintaining beam splitter; PMF: polarization maintaining fiber; PBS: polarization beam splitter; EPC: electric polarization controller; BS: beam splitter; PH(V,N,P): port for H(V, N, P) light; PS: port for synchronization light

图 3 高速偏振反馈系统结构

Fig. 3 Structure of fast polarization feedback system

编程门阵列 (FPGA) 通信, FPGA 通过模数转换器 (ADC) 采样完成 4 路 (H、V、P、N) 偏振信息采集, 通过数模转换器 (DAC) 输出实现 6 轴 EPC 控制信号输出, 整个硬件设计如图 4 所示。

程在数字信号处理器 (DSP) 中实现。DSP 与现场可用 FPF 算法对采集到的偏振数据进行高速计算处理, 并在特定的评价函数和搜索算法下寻求最优解, 高效地通过 FPGA 控制 EPC 特定轴加载特定的电压信号, 完成对链路中光偏振变化的快速补偿。FPF 算法分为调节周期和成码周期: FPF 算法监测偏振态变化, 当偏振态较差时, 进入调节周期, FPF 算法通过控制 EPC 来补偿光缆中偏振态的变化, 并通知 QKD 停止基矢比对, 放弃该部分数据; 成码周期 QKD 正常工作。

3.1 偏振评价函数

偏振评价函数是偏振调节过程中, 偏振补偿效

振旋转 (45°), 进而制备了不同时序时为不同偏振态 (H 偏振态和 P 偏振态) 的参考光。FPF 接收方通过 9:1 (BS) 分束器, 对其中一束光进行强度检测, 实现发送方和接收方的时序对齐; 对另一束再次进行 1:1 分束, 其中一路直接与 PBS 连接, 实现 H 偏振态的检测, 对另一路先进行 45° 偏振旋转后再与 PBS 相连接, 实现 P 偏振态的检测。通过对偏振检测结果的监测, 根据控制算法, 调节电偏振控制器 (EPC) 来补偿光纤链路因环境扰动造成的偏振变化。

3 高速偏振反馈算法

FPF 算法模块是 FPF 的核心控制模块, 算法流

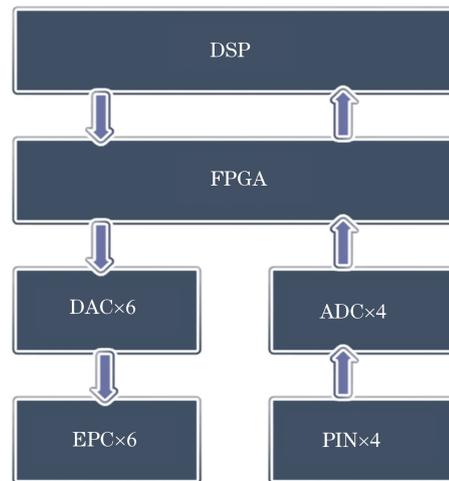


图 4 控制模块结构示意图

Fig. 4 Structure of the feedback module

果的评价标准, 即偏振补偿是否达到目标偏振态的表征。光的偏振态可以用斯托克斯矢量 ($S_0, S_1,$

$S_2, S_3)^T$ 描述, 对于完全偏振光有 $S_0 = 1$, 且满足 $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1, S_1 \in [-1, 1], S_2 \in [-1, 1], S_3 \in [-1, 1]$ 。 (1)

偏振反馈系统所用参考光为 H 偏振态和 P 偏振态, 对应的斯托克斯矢量分别为 $(1, 1, 0, 0)^T$ 和 $(1, 0, 1, 0)^T$ 。偏振反馈系统接收方的偏振检测模块, 归一化的斯托克斯矢量分量 S_1 和 S_2 分别满足

$$\begin{cases} S_1 = \frac{I_H - I_V}{I_H + I_V} \\ S_2 = \frac{I_P - I_N}{I_P + I_N} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 I_H, I_V, I_P 和 I_N 为图 3 中 2 个 PBS 的 4 个输出端对应 PIN 管探测到的光强值^[14-15]。

由于 BB84 协议要求在 2 组非正交的基矢上进行编码, 系统须完成 2 组基矢的偏振补偿。本文系统中 H 偏振态参考光和 P 偏振态参考光的时间间隔为几十纳秒, 可近似认为在这么短时间内链路对光偏振态的影响是不变的。为此, 对于 H 偏振态的时序, 偏振补偿完成后接收方偏振检测结果斯托克斯矢量应收敛于 $(1, 1, 0, 0)^T$, S_1 分量有极大值; 同时对于 P 偏振态的时序, 偏振补偿完成后接收方偏振检测结果斯托克斯矢量应收敛于 $(1, 0, 1, 0)^T$, S_2 分量有极大值。由于 S_1 和 S_2 的关系需满足 (1) 式, 对于相邻时序中的 H 光与 P 光, 对应的 S_1 和 S_2 之和达到唯一的极大值 2。为此, 将其作为偏振评价函数, 可表示为

$$F = \frac{I_{H-H} - I_{H-V}}{I_{H-H} + I_{H-V}} + \frac{I_{P-P} - I_{P-N}}{I_{P-P} + I_{P-N}}, \quad (3)$$

式中 I_{H-H} 和 I_{H-V} 分别表示对应发 H 偏振态参考光时 H 路和 V 路 PIN 管探测到的光强, I_{P-P} 和 I_{P-N} 分别表示对应发 P 偏振态参考光时 H 路和 V 路 PIN 管探测到的光强。F 值在 0~2 波动, 且越接近 2, 偏振反馈结果越好。

3.2 搜索算法

悬空光缆高速偏振反馈算法的重点之一是搜索算法效率, 考虑到实际应用中电网悬空光缆 QKD 设备的成本及衰减问题, 采用低成本、低损耗的压电陶瓷挤压光纤式偏振控制器, 通过调整 EPC 的电压来控制不同的轴挤压光纤, 改变光纤中光子的偏振态。由于压电陶瓷偏振控制器存在迟滞、蠕变效应等因素, 无法精确测定电压改变对偏振变化的影响, 理论计算偏振态与精确移动调节偏振态的方法误差较大, 因此需要采用搜索算法寻找偏振最优位置。

在实验室模拟扰动环境下, 分别测试了爬山算法^[16]和模拟退火算法^[17]的效率。其中模拟扰动测试的方式为使用三轴 EPC 代替图 3 中的悬空光缆部分, 然后每 20 ms 使 EPC 随机轴电压改变 1 V, DSP 分别使用爬山算法和模拟退火算法作为搜索算法, 上位机测试软件记录偏振调节所需时间并绘制分布图。测试结果如图 5 所示(横轴为算法收敛时间, 纵轴为出现的概率), 爬山算法的平均搜索效率高于模拟退火算法。

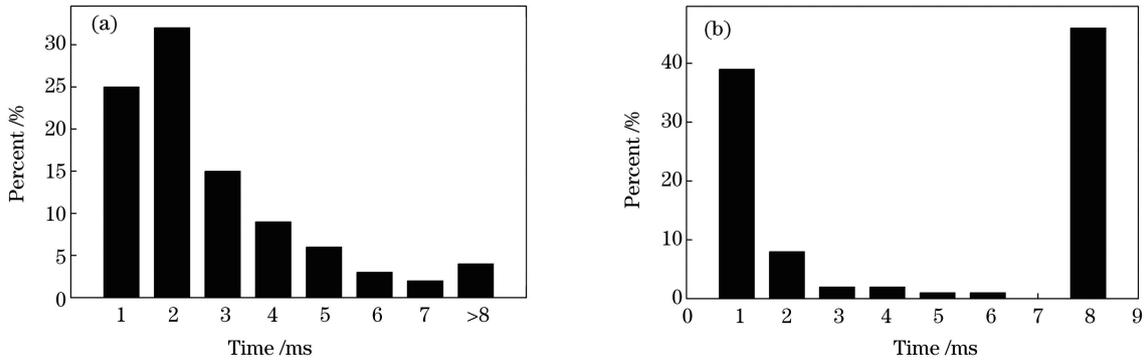


图 5 不同模拟算法运算效率。(a)爬山算法; (b)模拟退火算法

Fig. 5 Operation efficiencies of different simulation algorithms. (a) Hill-climbing algorithm; (b) simulated annealing algorithm

不同搜索算法在不同应用环境下有各自的优劣。爬山算法是一种局部搜索算法, 算法简单且高效; 模拟退火算法是一种全局搜索算法, 其主要优势是避免局部最优值, 算法精度高。然而上述评价函数取极大值对应唯一的偏振态, 即最优解两边理论上均是单调的, 不考虑噪声干扰时局部最优值即全

局最优值。光纤中光子偏振态变化速度极快, 在此情况下, 算法速度的重要性高于算法精度, 因此采用爬山算法作为搜索算法。在实验室模拟扰动环境下, 经过优化后, 爬山算法的平均搜索效率小于 2 ms, 能够对抗悬空光缆中毫秒量级扰动带来的光子偏振态变化。

受噪声影响,偏振评价函数的取值会在小范围内极快地随机抖动,导致爬山算法在步长减小(接近最优值点)时受噪声影响明显,求得的局部最优值与实际的全局最优值存在偏差,最优值精度不高。为此,将判断偏振是否完成的监测条件设置为偏振评价函数的取值是否达到某一阈值,而不使用是否达到最优值点(EPC 电压改变达到最小步长且 2 次调节后评价函数的取值相差足够小)。用这种方式弥补了爬山算法在步长减小时因噪声原因导致的局部最优值与全局最优值偏差较大的不足。

3.3 监测条件

悬空光缆偏振反馈的另一个重点是监测条件的选择,分为启动偏振反馈的条件和开始成码的条件。监测条件与评价函数 F 的阈值设置有关,阈值可用偏振态对误码率的贡献估算。

由于光纤中的偏振态变化较快,如果将偏振态补偿到较严格的状态,然后开始成码,可以有更长的成码时间。所以开始成码的条件选择阈值为 1.94,此时偏振态的改变对误码率的贡献为 1.5%,而进入调节周期的阈值设为 1.90,对应偏振态的改变对误码率的贡献为 2.5%。2 个阈值的选择参考了埋地光缆偏振态调节的评价指标^[15]。为了排除极短暂扰动和噪声等因素对偏振反馈的影响,开始将偏振反馈的条件设为 30 次测量中 F 值小于 1.90 的次数超过 10 次。

为了提高成码周期的时间比例,必须压缩调节周期的时间。如果像上述开始偏振反馈的监测条件一样,使用统计值作为监测条件,则需要进行较多的样本统计后判断是否调节完成,时间消耗较大。因此,借鉴 Canny 图像边缘检测算法,使用双阈值检验的条件取代统计值作为由偏振调节周期到成码周期切换的监测条件。开始成码的条件为:测量到 1 次 F 值大于高阈值 $F_H=1.96$ (悬空光缆偏振测试得出的经验值)后,暂停 EPC 调节,然后连续测量 4 次,如果结果均大于低阈值 $F_L=1.94$,则进入成码周期,整个流程如图 6 所示,图中 B 是阈值高于 1.94 的测量次数的计数。不仅减少了统计消耗的时间并确保爬山算法的精度,还可以随时跳出调节周期进入成码模式,即不必要等待搜索算法找到最优值点,只要中途测到 1 次理想的偏振态,就去尝试判断偏振反馈是否完成。

3.4 环境自适应设计

在实际应用中,启动偏振反馈的监测条件是 FPF 系统可以调节的参数,对于不同的光缆线路和

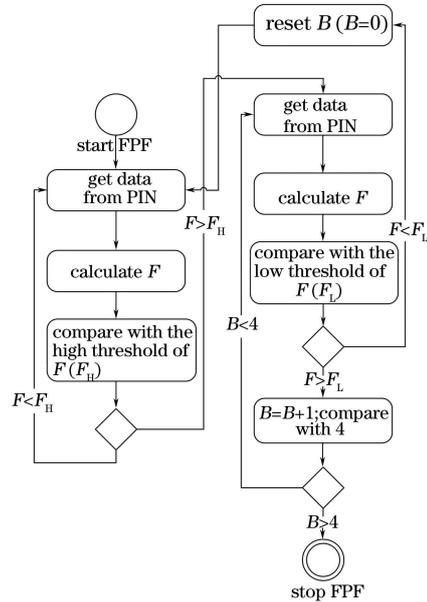


图 6 偏振补偿完成的检验过程

Fig. 6 Judging process whether feedback is finished or not

不同的环境需要进行微调。悬空传输距离增加或者环境恶劣时,过于严格的条件可能会导致偏振反馈次数变多,QKD 成码周期被大量缩减;过于宽松的条件会难以实时补偿光纤中的偏振态改变,导致 QKD 误码率变高,甚至无法成码。由于影响偏振态的因素过多而复杂,对于不同的线路、不同的天气条件^[18]无法定量设置配置值,应在 FPF 系统实地运行时对监测条件进行微调。

因此在 FPF 系统中设计了简单的环境自适应功能。FPF 系统从 QKD 获取成码率数据,用于评价监测阈值的好坏。针对不同的光缆线路和天气状况,FPF 系统能够从实验得到的经验条件开始,增加或减少监测阈值,通过爬山算法迭代寻找成码率最优时的监测条件。对于不同的线路,设备实地运行一段时间(10 d)后,FPF 系统会选取多次测量得到的最优阈值的中位数代替原始实验的经验值,作为该段光缆偏振反馈系统的初始监测条件。对于恶劣天气和长距离悬空光缆,环境自适应设计有较好的效果。图 7 为对于 68 km 悬空光缆是否启用自适应模块的测试结果,各进行 3 d 测试,30 min 统计 1 次成码率。启用自适应模块比仅用实验室估计值不做改变的方案平均成码率高,方差波动小,低成码率的可能性少。

4 测试结果

使用国家电网的较短距离悬空光缆进行系统运行测试,测试选择光纤线路为北京知春里到昌平的

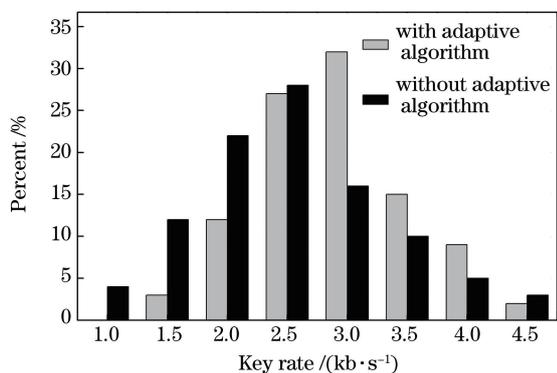


图 7 环境自适应对成码率的影响

Fig. 7 Coding rate with or without adaptive algorithm

光纤, 高压为 220 kV, 全长为 40.5 km, 包含约为 15 km 的悬空部分, 架空高约为 10 m, 总衰减为 10.24 dB. 图 8 为昌平测试时安装 FPF 模块和未安装 FPF 模块的 QKD 成码率结果。可以看出安装了 FPF 模块曲线波动小, 可以平稳成码; 而未安装 FPF 模块依靠信号光自反馈的 QKD 只能偶尔成码。

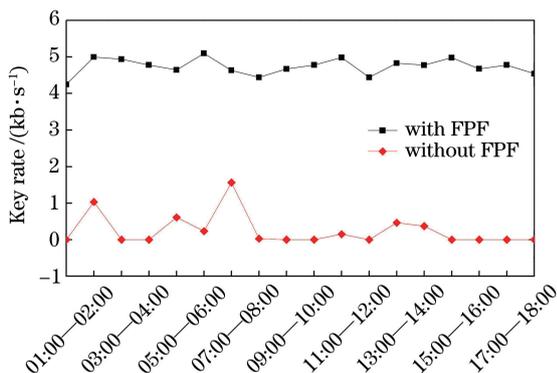


图 8 北京 40.5 km 光缆(包含 15 km 悬空光缆)量子通信成码率

Fig. 8 Coding rate of the quantum communication over 40.5 km fiber link (including 15 km aerial fiber) in Beijing

之后选择长距离的悬空光缆进行反馈效率及成码率测试, 验证扰动频繁时 FPF 系统的调节效果。线路选择从合肥市肥西变电站到肥东变电站的悬空光缆, 悬空光缆长度为 68 km. 该外场实验中, 由于外界扰动一直存在并且不规律, 所以 1 次偏振反馈周期需要的时间也不相同, 具体分布如图 9 所示。

本次测试中, 94.4% 的偏振调节均可以在 5 ms 内完成, 但是在调节过程中, 外界扰动依旧在持续地无规则地影响光纤中光的偏振态, 使偏振态发生快速无规则变化, 进而导致少量偏振反馈的周期被延长到 5 ms 以上。

在此线路中, 安装了 FPF 的 QKD 设备依然能

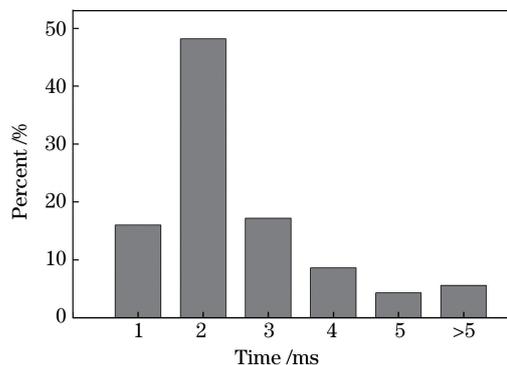


图 9 合肥地区偏振反馈时间概率分布图

Fig. 9 Polarization feedback time probability distribution in Hefei

够保持持续成码, 而未安装 FPF 的 QKD 设备已经无法成码。测试结果如图 10 所示。

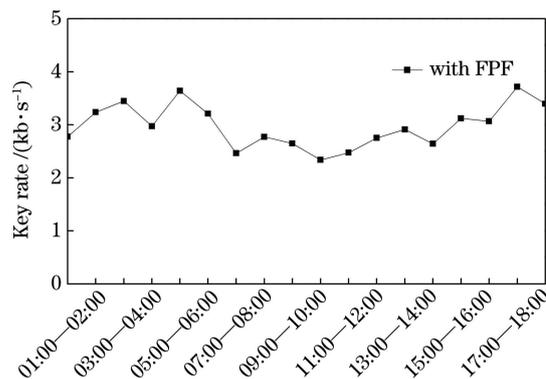


图 10 合肥 68 km 悬空光缆量子通信成码率

Fig. 10 Coding rate of the quantum communication over 68 km aerial fiber link in Hefei

5 结 论

针对较长距离电力悬空光缆这种恶劣环境下的偏振编码 QKD 系统, 因光子偏振态受频繁扰动导致的成码困难的问题, 设计了 FPF 和相应算法进行偏振态维稳。通过一种低成本的、可以广泛应用的解决方案, 实现了较长距离电力悬空光缆中偏振编码的量子密钥分发中偏振态保持的方案设计, 并进行了实验验证。北京、合肥两地的实地实验表明, FPF 模块基本解决了电网中远距离悬空光缆中偏振编码的 QKD 成码困难的问题, 对于其他复杂信道的量子通信有借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] Nezamoddini N, Mousavian S, Erol-Kantarci M. A risk optimization model for enhanced power grid resilience against physical attacks[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 329-338.
- [2] Guo Q L, Xin S J, Sun H B, et al. Power system

- cyber-physical modeling and security assessment: Motivation and ideas[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1481-1489.
- [3] Sridhar S, Hahn A, Govindarasu M. Cyber-physical system security for the electric power grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 210-224.
- [4] Peng C Z, Zhang J, Yang D, *et al.* Experimental long-distance decoy-state quantum key distribution based on polarization encoding[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(1): 010505.
- [5] Zhang H F, Wang J, Cui K, *et al.* A real-time QKD system based on FPGA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(20): 3226-3234.
- [6] Cui K, Wang J, Zhang H F, *et al.* A real-time design based on FPGA for expeditious error reconciliation in QKD system[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2013, 8(1): 184-190.
- [7] Cui K, Wang J, Zhang H F, *et al.* An authentication scheme with high throughput based on FPGA for a practical QKD system[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(23): 4747-4750.
- [8] Waddy D S, Lu P, Chen L, *et al.* Fast state of polarization changes in aerial fiber under different climatic conditions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 1035-1037.
- [9] Xavier G, Walenta N, Faria G V D, *et al.* Experimental polarization encoded quantum key distribution over optical fibres with real-time continuous birefringence compensation[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(4): 045015.
- [10] Muga N J, Almeida A J, Ferreira M F, *et al.* Optimization of polarization control schemes for QKD systems[C]. SPIE, 2011, 8001(2): 80013N.
- [11] Xavier G B, de Faria G V, da Silva T F, *et al.* Two-way quantum communication in a single optical fiber with active polarization compensation[C]// International Conference on Quantum Communication and Quantum Networking. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 125-131.
- [12] Wang J, Zhu Y, Zhou H, *et al.* Simulation research on strategy for wavelength division multiplexing-based compensating photon polarization in optical fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506003.
王剑, 朱勇, 周华, 等. 光纤量子信道的波分复用偏振补偿策略仿真研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506003.
- [13] Wang J, Zhu Y, Zhou H, *et al.* Several kinds of polarization compensation techniques of optical fiber quantum key distribution systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090603.
王剑, 朱勇, 周华, 等. 光纤量子密钥分发系统的几种偏振补偿技术[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090603.
- [14] Born M, Wolf E. Principle of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. 6th ed. Beijing: Pergamon Press, 1980.
- [15] Chen J, Li Y, Wu G, *et al.* Stable quantum key distribution with polarization control[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(9): 5243-5247.
- [16] Nolle L. On a hill-climbing algorithm with adaptive step size: Towards a control parameter-less black-box optimisation algorithm[J]. Computational Intelligence, Theory and Applications, 2006: 587-595.
- [17] Li W W, Zhang X M, Chen K S, *et al.* Application of simulated annealing algorithm on endless polarization controller[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(6): 820-824.
李伟文, 章献民, 陈抗生, 等. 模拟退火算法在无端偏振控制器中的应用[J]. 光子学报, 2005, 34(6): 820-824.
- [18] Wuttke J, Krummrich P M, Rosch J. Polarization oscillations in aerial fiber caused by wind and power-line current[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(6): 882-884.