光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251013002

基于集成制冷SPAD的时间相位QKD系统

周　雷[1]，蒋连军[1*]，栾　超[2]，于　林[1]，唐世彪[1]

（1. 科大国盾量子技术股份有限公司，合肥 230088；2. 北京控制与电子技术研究所，北京 100192）

摘　要： 为满足量子密钥分发（QKD）系统在复杂信道环境中的实用化需求，文章提出一种基于集成制冷单光子雪崩二极管（SPAD）的时间相位QKD系统。该系统将量子态调制维度转向时间相位域，从物理机制上避免了偏振扰动对QKD系统性能的影响。采用集成制冷SPAD作为单光子探测单元，显著增强了QKD接收设备的温度适应性与长期工作可靠性。所研制的QKD设备最远成码距离达130 km，在100 km与50 km传输距离下的密钥生成率分别为10.01 kbps与60.97 kbps。在模拟信道振动的严苛测试中，系统密钥生成率波动极小，展现出优异的抗扰动能力。该系统已部署于某省级电力调度网的现实环境中，在包含2 km悬空光缆的23 km混合链路上连续稳定运行超过14个月，并保持14.7 kbps的密钥生成率，验证了时间相位编码QKD系统在复杂信道条件下的工程可行性与实用潜力。

关键词： 量子密钥分发；时间相位编码；悬空光缆；单光子探测器

中图分类号： TN219　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0907－05

Time-Bin Phase Encoding QKD System Based on Integrated Cryogenic SPAD

ZHOU Lei[1], JINAG Lianjun[1], LUAN Chao[2], YU Lin[1], TANG Shibiao[1]

（1. QuantumCTek Co., Ltd., Hefei 230088, CHN; 2. Beijing Institute of Control & Electronics Technology, Beijing 100192, CHN）

Abstract: To meet the practical demands of quantum key distribution (QKD) in complex channel environments, we demonstrate a time-phase encoded QKD system using an integrated cryogenic single-photon avalanche diode (SPAD). By shifting quantum state encoding to the time-bin phase domain, the system avoids polarization-related disturbances at the physical level. The integrated cryogenic SPAD enhances both temperature tolerance and long-term reliability of the QKD receiver. Our device achieves secure key distribution over distances up to 130 km, with key rates of 60.97 kbps at 50 km and 10.01 kbps at 100 km. Under simulated channel vibrations, the system maintains stable key rates, confirming strong resilience against disturbances. In a real-world deployment within a provincial power dispatch network, it has operated continuously for more than 14 months on a 23 km hybrid link—including 2 km of aerial fiber, sustaining a key rate of 14.7 kbps. These results demonstrate the engineering feasibility and practical potential of time-bin phase encoding for QKD in challenging channel conditions.

Key words: quantum key distribution; time-bin phase encoding; aerial fiber; single photon detector

收稿日期：2025－10－13.

基金项目：合肥市重大专项定向委托项目（2021DX007）.

* **通信作者：**蒋连军

0 引言

量子通信作为量子信息科学的重要分支，凭借其基于量子力学基本原理的无条件安全性，为解决未来信息社会的安全瓶颈提供了新的方案。与传统通信依赖于计算复杂度的安全性不同，量子密钥分发（QKD）通过在合法通信双方之间建立共享的随机密钥，能够从物理原理上确保信息在传输过程中不被窃听，这对于国防、金融、政务等敏感领域具有极其重要的战略意义[1-3]。

尽管QKD技术在原理验证上已趋成熟，但其走向规模化应用仍面临严峻挑战。现实世界的量子信道环境复杂多变[4-6]。例如，城市间的地埋光缆会因温度变化与机械应力产生缓慢的偏振变化；而架设在电力杆塔上的悬空光缆更会因风振和温差引发快速、随机的双折射扰动。这些因素对基于偏振编码的QKD系统构成了巨大威胁。此类系统对信道偏振扰动极为敏感，不得不依赖复杂的实时偏振反馈控制系统进行补偿，这不仅增加了系统的复杂度与成本，更严重制约了其在恶劣环境下的长期运行稳定性。为攻克这一瓶颈，研究人员转向了对信道干扰不敏感的时间相位编码方案，该方案将信息加载于光子的时间与相位维度，而非偏振态，从根本上规避了光纤中偏振涨落的影响，为构建高鲁棒性的实用化QKD系统开辟了可行路径[7]。

在时间相位QKD系统的工程实现中，其温度适应性与长期可靠性高度依赖于核心器件——单光子探测器。单光子探测器近年来性能水平有长足发展[8-10]，高性能单光子雪崩二极管（SPAD）与热电制冷（TEC）技术进行深度稳定集成的技术瓶颈也被突破[11-12]，核心探测器件集成化工艺技术的进步为实用化QKD系统奠定了坚实技术基础。

本文面向复杂信道环境的工程需求，研制了一种基于集成制冷SPAD的时间相位QKD系统。该系统构建了完整的工程实现方案，突破了单光子探测器集成、时间相位编码等关键技术，极大提升了在复杂环境的适应性。通过对其量子误码率、密钥生成率及抗扰动性能的测试，并在某省级电力调度网的实际场景中完成部署验证，本研究为时间相位QKD系统在复杂信道中的工程化应用提供了参考。

1 技术方案设计

1.1 基于集成制冷SPAD的单光子探测器设计

单光子探测器是QKD系统的关键组成，也是系统工作可靠性的薄弱环节。为提升时间相位QKD系统在非恒温环境下的长期可靠性，本文采用集成制冷单光子雪崩二极管作为核心探测单元。所选用的中电科44所GD6522Q型SPAD模块，采用金属化气密封装结构，将SPAD芯片、热电制冷器与热敏电阻高度集成，实现了工作温度的宽温区恒定控制，并有效抑制了结露与水汽侵蚀，保障了器件的长期稳定性。

围绕该模块自主研制了完整的单光子探测系统，如图1所示。系统集成现场可编程门阵列（FPGA）控制器、偏置与门控电压电路、制冷温控及雪崩信号提取电路。该系统结构紧凑、功能完备，显著提升了探测器的温度适应性、性能一致性与免维护能力，为时间相位QKD系统在复杂环境下的稳定运行提供了关键硬件支撑。

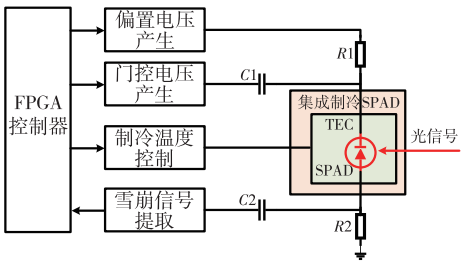


图1 基于集成制冷SPAD的单光子探测器原理框图

FPGA控制器作为单光子探测器的控制单元，主要用于控制偏置电压与门控电压产生及维稳、调节TEC温度、接收雪崩信号，并实时评估探测器工作状态以及在异常情况下采取相应措施保证SPAD工作的安全性；偏置电压产生电路实现给SPAD加载反向偏置电压，所加载的反向偏置电压具备可调、高精度特点，设计加载低于雪崩击穿电压的偏置电压；门控电压产生电路实现门控电压的生成以及幅度可调，门控电压和偏置电压相结合可以使得最终加载到SPAD两端的电压高于或低于雪崩击穿电压，使得SPAD实现雪崩和淬灭两个过程交替；制冷温度控制电路通过检测TEC冷面温度并给TEC加载控制电压完成制冷，实现对SPAD工作温度的冷却以降低热噪声水平；雪崩信号提取电路实现对门控噪声进行抑制，对雪崩信号进行放大，对非预期的信号进行符合过滤，实现噪声抑制和雪崩信号提取。

1.2　时间相位编解码方案设计

悬空光缆在风力作用下的周期性摆动会诱发动态双折射效应，导致光波偏振态发生毫秒级的随机快速漂移[13]。传统偏振补偿系统依赖于机械式或电光式偏振控制器，其响应时间通常在秒至分钟量级，与悬空光缆的扰动速度存在严重的时域失配。时间相位编码将量子态调制维度转向时间相位域，从原理上规避了光纤双折射效应的影响，实现了量子信息传输与光缆机械振动特性的解耦，所设计的时间相位编解码方案如图 2 所示。

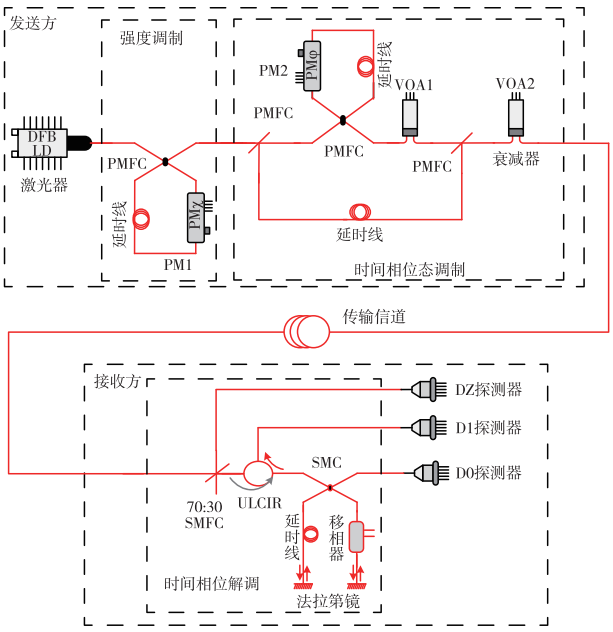


图 2　时间相位 QKD 设备编解码光路

发送端在强度态编码调制上，通过对相位调制器 PM1 加载不同电压可实现不同强度制备。强度调制所使用的萨格纳克（Sagnac）干涉环中两个光脉冲分量都经过了相同的路径，环境对两个光脉冲分量的影响相互抵消，强度调制的稳定性高；在量子态编码调制上，通过采用 Sagnac 干涉环结合不等臂马赫-曾德尔干涉仪（MZI）设计，完成一前一后的脉冲对制备，通过对相位调制器 PM2 加载不同电压实现时间态和相位态制备。接收端采用被动的非平衡基矢解码方案，时间态通过到达时间差完成解码，相位态则通过不等臂 MZI 进行干涉测量解码。可以看出，时间相位编码方案的工作原理和光子偏振状态没有关系，能够免疫光子偏振变化带来的影响，从而保持 QKD 系统在悬空光缆等复杂信道条件下处于稳定工作状态。

2　实际系统验证

基于时间相位编码和集成制冷单光子探测关键技术的突破，本文研制了时间相位 QKD 系统，包括发送型设备和接收型设备，收发双方协同工作，具备“量子态制备-量子态探测-量子密钥分发-量子密钥管理”多层次协同能力，可将双方一致量子密钥推送至应用设备。为全面评估时间相位 QKD 设备性能，搭建了如图 3 所示的时间相位 QKD 设备安全成码和抗扰动能力测试系统。

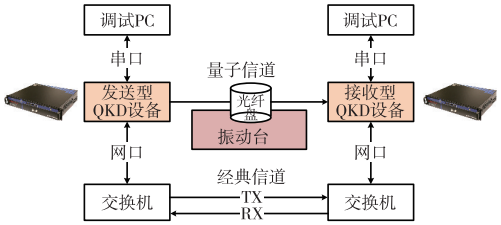


图 3　时间相位 QKD 设备安全成码和抗扰动能力测试

发送型设备与接收型设备通过独立光纤链路（量子信道）和以太网通道（经典信道）实现物理层互联。两型设备分别接入调试计算机（PC），用于模拟管控系统的指令下发与密钥生成效能监测。量子信道基于 GD652 单模光纤盘搭建，通过灵活配置光纤长度模拟长距离光缆的典型传输场景；采用振动台对光纤传输链路进行扰动，模拟光缆受风力载荷引发的周期性摆动与随机形变特征模拟。经典信道采用以太网交换机建立密钥协商数据通道，完成基矢比对、纠错等交互流程的信息传递。

2.1　QKD 系统成码距离验证

通过改变量子信道光纤长度，获得了不同距离下的安全成码率和误码率，如图 4 所示。

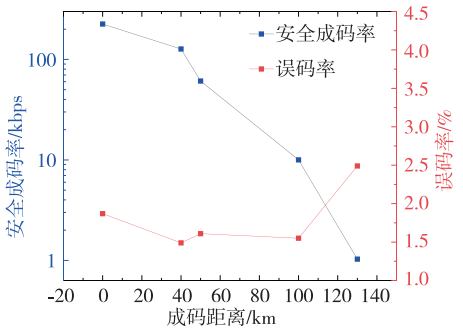


图 4　不同距离下时间相位 QKD 设备安全成码率和误码率

测试结果表明，时间相位 QKD 设备的有效传输距离可覆盖 0～130 km。随着传输距离增加，信道损耗导致光子数减少，系统误码率因噪声占比相对提升而升高，安全成码率随之呈典型衰减趋势。

100 km通信距离内，设备成码性能优异，50 km处密钥生成率达60.97 kbps，100 km处为10.01 kbps。即使在130 km的极限距离下，仍能维持1.02 kbps的成码能力，为超远距离应用提供了技术储备。该安全成码传输能力契合大多数光纤网络节点间距在百公里内的拓扑特征，具有广泛的适用性。

2.2 抗信道扰动能力验证

为量化评估时间相位QKD设备的抗扰动性能，依据GB/T 2423系列标准，对承载QKD设备的光纤信道施加了水平/竖直双轴向的振动激励。振动条件涵盖正弦振动（GB/T2423.10-2019第2部分：试验方法 试验Fc）与随机振动（GB/T 2423.56-2018第2部分：试验方法 试验Fh）。采用持续振动环境下的密钥生成稳定性评估方法，通过采集振动前、中、后各10分钟时段的密钥生成率数据，分析时间相位QKD设备在动态扰动条件下的性能稳定性，实验数据见表1。

表1 光纤振动条件时间相位QKD设备密钥生成率

单位：kbps

振动条件	试验前	试验中（水平）	试验中（垂直）	试验后
正弦振动	235.82	232.45	233.27	234.47
随机振动	235.65	234.68	234.65	233.32

测试结果表明，时间相位QKD设备在正弦振动和随机振动的全周期（前/中/后）范围内的密钥生成率稳定性表现优异，其波动幅度始终维持在极低水平，系统展现出极佳的信道适应鲁棒性征，在强振动干扰下未出现性能劣化现象，有效实现了环境干扰与量子信息传输的解耦。

2.3 实际应用场景验证

典型的复杂信道应用场景选择某省级电力调度网中两个主站数据中心之间的同步链路，该场景对密钥实时更新与抗攻击能力有严苛要求，与QKD技术特性高度契合，时间相位QKD设备与现网复杂信道融合部署拓扑如图5所示。

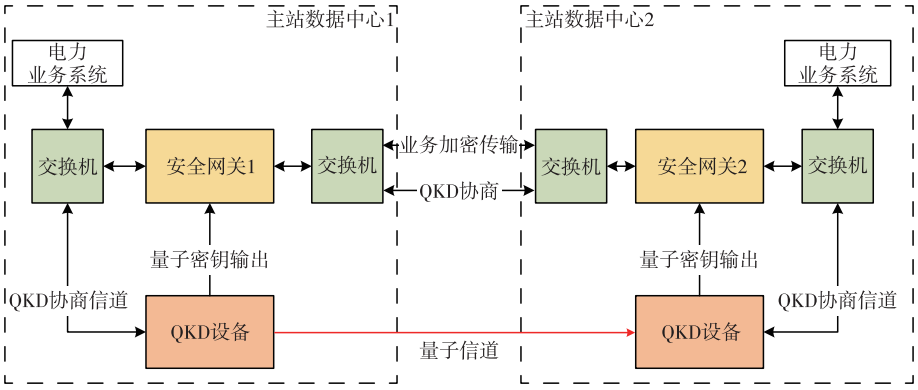


图5 时间相位QKD设备与现网复杂信道融合部署

时间相位QKD设备为两个主站数据中心提供量子密钥服务。量子密钥被注入电力安全网关，用于对跨区同步的调度指令、设备状态等核心业务数据进行加密传输。量子信道全长23 km（含2 km悬空光缆），实测信道衰减为18.6 dB。在此真实复杂环境下，时间相位QKD设备保持了14.7 kbps的稳定密钥生成率，有效保障了业务数据的加密需求。整个系统已连续无故障运行超过14个月，充分证明了时间相位QKD系统在复杂信道下的工程可行性与实践价值。

3 结论

本文面向复杂信道环境下QKD系统实用化的需求，研制了基于集成制冷SPAD的时间相位编码QKD系统。该系统从原理上规避了悬空光缆等场景中动态双折射效应带来的偏振扰动问题，实现了量子信息传输与信道振动特性的有效解耦。所研制的时间相位QKD设备在成码性能、传输距离及环境鲁棒性方面均表现出色：有效成码距离覆盖0～130 km，在典型100 km距离下密钥生成率优于10 kbps；在振动测试中，密钥生成率波动极小，证明了其优异的抗扰动能力。该系统在某省级电力调度网的实际复杂环境中完成了超过14个月的连续稳定运行，充分证明了时间相位QKD系统在真实场景下的高可靠性与工程化可行性。

尽管本研究在系统实用化方面取得了一定成果，未来仍有若干方向值得深入探索。在核心器件方面，需持续攻关以进一步提升SPAD的综合性能，从而提高系统最终成码率与传输极限。在应用生态方面，需推动该系统在更多关键基础设施网络

（如金融专网、政务云等）中的示范应用，并研究与其他安全技术的融合方案，构建多层次、一体化的未来安全通信体系。

参考文献：

[1] Lu C Y, Cao Y, Peng C Z, et al. Micius quantum experiments in space[J]. Reviews of Modern Physics, 2022, 94(3): 035001.

[2] Liao S, Yong H, Liu C, et al. Long-distance free-space quantum key distribution in daylight towards inter-satellite communication[J]. Nature Photonics. 2017, 11, 509-513.

[3] Li D D, Shen Q, Chen W, et al. Proof-of-principle demonstration of quantum key distribution with seawater channel: towards space-to-underwater quantum communication [J]. Optics Communications, 2019, 452: 220-226.

[4] 谢海鹏，钱雨琦，付　炜，等. 电力系统中量子信息学的应用现状及展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(12)：4485-4508.
Xie Haipeng, Qian Yuqi, Fu Wei, et al. Status and prospect of quantum informatics in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4485-4508.

[5] 贾耕涛，倪玮栋，吴佳伟，等. 面向能源互联网的电力量子保密通信关键技术研究及应用[J]. 电力信息与通信技术，2020，18(7)：1-7.
Jia Gengtao, Ni Weidong, Wu Jiawei, et al. Research and application of key technologies of quantum secure communication in energy interconnection [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(7): 1-7.

[6] Jiang L, Li D, Fang Y, et al. Countermeasure against blinding attack for single-photon detectors in quantum key distribution[J]. Journal of Semiconductors, 2024, 45(4): 042702.

[7] Tang Y L, Zhou C, Li D D, et al. Time-Bin phase-encoding quantum key distribution using Sagnac-based optics and compatible electronics[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 26335-26343.

[8] 崔大健，张　承，赵江林，等. 多模光纤耦合InGaAsP/InP单光子探测器模块[J]. 半导体光电，2021，42(3)：327-331.
Cui Dajian, Zhang Cheng, Zhao Jianglin, et al. Multimode fiber-coupled InGaAsP/InP single photon detector module[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(3): 327-331.

[9] 蒋连军，方余强，余　超，等. 微型化自由运行InGaAs/InP单光子探测器[J]. 红外与激光工程，2023，52(3)：80-87.
Jiang Lianjun, Fang Yuqiang, Yu Chao, et al. Miniaturized free-running InGaAs/InP single-photon detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 80-87.

[10] Xu Q, Yu C, Cui D, et al. Compact and fully functional high-frequency sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector module [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2025, 31(5: Quantum Materials and Quantum Devices): 3801007.

[11] 董亚魁，刘俊良，孙林山，等. 基于InGaAs NFAD的集成型低噪声近红外单光子探测器[J]. 红外与激光工程，2023，52(3)：20220907.
Dong Yakui, Liu Junliang, Sun Linshan, et al. Integrated low-noise near-infrared single-photon detector based on InGaAs NFAD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 20220907.

[12] 岳　恒，徐　跃，赵菲菲，等. 一种完全集成的单光子雪崩二极管探测器[J]. 微电子学，2015，45(1)：72-75.
Yue Heng, Xu Yue, Zhao Feifei, et al. A fully integrated single photon avalanche diode detector[J]. Microelectronics, 2015, 45(1): 72-75.

[13] 唐鹏毅，李国春，高　松，等. 针对电力悬空光缆量子密钥分发的高速偏振反馈算法[J]. 光学学报，2018，38(1)：0106005.
Tang Pengyi, Li Guochun, Gao Song, et al. Fast polarization feedback algorithm for quantum key distribution with aerial fiber for power grid[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0106005.

作者简介：

周　雷（1981—），男，吉林省长春市人，博士，高级工程师，主要从事量子通信、电力信息通信等方面研究工作；

蒋连军（1984—），男，安徽省宿州市人，博士，高级工程师，主要从事量子通信、单光子探测等方面研究工作。