

基于量子信号关联函数的测量设备无关型量子密钥分发系统时钟自同步*

刘建强^{1)†} 李行健²⁾ 王丙坤²⁾ 宋成明¹⁾ 武敏¹⁾ 孔德欢¹⁾
吴量¹⁾ 胡建勇^{2)‡} 肖连团²⁾

1) (山西工程科技职业大学, 晋中 030619)

2) (山西大学激光光谱研究所, 量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

(2026 年 5 月 7 日收到; 2026 年 5 月 22 日收到修改稿)

测量设备无关型量子密钥分发是构建广域量子保密通信网络的关键技术. 然而, 现有系统通常依赖额外的专用光纤链路进行时钟同步, 这不仅增加了系统复杂性和部署成本, 更会因同步链路长度失配引入时钟错位, 导致误码率升高. 本文提出并实验验证了一种基于量子信号本身二阶关联特性的共径时钟自同步方法. 该方法将通信双方发送的伪随机位移光脉冲序列的二阶关联函数作为同步判据, 直接从量子信号中实时提取信道延时信息, 并通过可调光纤延时线进行闭环反馈补偿, 从原理上消除了非共路径传输的固有漂移隐患. 在 100 km 光纤链路上, 本方案实现了长期同步精度优于 77.7 ps, 并能够有效跟踪补偿高达 7.8 ps/s 的环境温度导致的线性延时漂移. 本工作为测量设备无关型量子密钥分发系统提供了一种高精度、低复杂度的时钟同步方案, 为推动其实用化部署提供了可行的技术路径.

关键词: 测量设备无关, 量子密钥分发, 二阶关联, 自同步

DOI: 10.7498/aps.75.20260648

CSTR: 32037.14.aps.75.20260648

1 引言

测量设备无关 (measurement-device-independent-type, MDI) 型量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD) 通过引入不可信第三方测量节点, 能够从根本上免疫所有针对探测器的侧信道攻击, 是构建广域量子保密通信网络的关键技术基础之一^[1-3]. 在其演进形态中, 双场量子密钥分发 (twin-field QKD, TF-QKD) 通过巧妙的相位编码与单光子干涉方案, 将安全成码率与信道透过率的

平方根成正比关系提升至突破无中继极限的水平, 大幅拓展了安全通信距离^[4-6]. 这类协议族的独特优势, 使其成为构筑未来覆盖城域乃至洲际的广域量子保密通信网络的核心技术支撑, 对于实现远距离、高安全等级的信息传输具有不可替代的战略意义^[7-9]. 然而, 在迈向实用化的进程中, 高重频运行是提升系统成码率、满足实际数据吞吐需求的必然选择^[10-16]. 随着系统时钟频率的不断提升, 对通信双方光脉冲在中间节点处的时间对准精度提出了极端苛刻的要求. 任何微小的脉冲错位都将导致干涉可见度急剧下降、量子比特误码率飙升, 严重制

* 科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (批准号: 2021ZD0300705)、山西省基础研究计划 (批准号: 202503021211084, 202403021221226, 202403021222349)、山西省高等学校科技创新计划 (批准号: 2024L433) 和山西省高层次人才引进科研启动费 (批准号: RCK202320, RCK202320-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liujianqiang@sxgkd.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jyhu@sxu.edu.cn

约安全密钥的生成^[17-19].

当前, 高速 MDI 型 QKD 系统通常依赖于一条独立的、专用的同步光纤链路来分发时钟参考信号或传输同步脉冲序列. 这一方案不仅显著增加了系统的硬件复杂度和实际部署成本, 更为关键的是, 同步链路和量子信号链路在物理上是分离的. 两者所经历的光纤长度、环境温度及机械应力变化不可能完全一致, 这种非共路径传输必然引入固有的相对时间漂移^[20-22], 使原本校准好的同步关系逐渐失效, 形成持续的脉冲错位. 即使采用复杂的漂移预估与后补偿算法, 也难以从根本上消除这一系统性偏差. 因此, 发展一种不依赖额外专用同步链路、可从根本上规避非共径漂移的自同步技术, 是推动 MDI 型 QKD 从实验室原理验证迈向大规模工程部署亟需解决的关键问题.

针对这一挑战, 本文提出并实验验证了一种基于量子信号自身二阶关联特性的共径时钟自同步方法. 区别于传统的独立同步链路方案, 该方法以通信双方发送的伪随机位移光脉冲序列之间的二阶关联函数作为同步判据, 直接从携带有量子信息的信号光中实时提取信道延时信息, 并通过可调光纤延时线构成闭环反馈, 动态补偿路径延时差. 该方案将同步信息内禀地嵌入量子信号传输过程中, 使同步与信号传输共享完全相同的物理路径, 从而在原理层面杜绝了因路径分离导致的漂移失配问题.

需要指出的是, 本方案与 MDI 型 QKD 系统中已使用的各类时钟同步技术存在本质区别. 当前广泛采用的独立光纤同步方案^[20-22]、波分复用共纤同步方案和时分复用插入同步方案^[23-25]都需要额外的同步光. 而本方案则利用量子信号自身作为同步信息的载体, 通过伪随机时间位移调制和二阶关联理论计算, 直接测量并闭环补偿 Alice 与 Bob 量子脉冲之间的相对延时差, 从物理层面实现了量子信号的自对齐. 这种方案既根除了独立光纤方案的非共径的相对时间漂移, 又完全避免了共纤方案中同步光解复用引入的噪声, 从而在保证高同步精度的同时, 保证了量子信号信噪比.

本方案在 100 km 光纤链路上, 实现了长期同步精度优于 77.7 ps, 并能够有效跟踪与补偿高达 7.8 ps/s 的环境温度导致的线性延时漂移. 实验结果表明, 该方法以极低的系统复杂度, 在长距离光

纤信道中实现了数十皮秒量级的高精度时钟自同步. 本工作将信号与同步统一于同一光路, 解决了 MDI 型 QKD 系统非共径时钟漂移问题, 为 MDI 型 QKD 技术的实用化部署提供支撑.

2 基于二阶关联的共径自同步理论模型

为实现无需额外同步链路的共径自同步, 本节建立一种基于光脉冲序列二阶关联特性的理论模型. 该模型从通信双方发射的伪随机位移光脉冲序列出发, 通过分析其在信道动态漂移下的互相关函数演化规律, 建立关联函数特征峰位与路径延时差之间的定量映射, 从而为从量子信号本身实时提取同步信息并提供闭环补偿依据奠定理论基础.

考虑一个典型的 MDI 型 QKD 系统, 发送端 Alice 和 Bob 均以重复频率 f_r 发射光脉冲, 脉冲周期为 $T = 1/f_r$. 若通信双方仅发射严格周期性的光脉冲序列, 其互相关函数在延时维度上将呈现与发射周期相对应的等间距多峰结构, 无法唯一确定路径延时差. 为实现对信道延时的无歧义提取, 本方案对每个光脉冲在固定时钟周期基础上施加一个均值为零的随机时间位移 τ , 且满足 $|\tau| \ll T$. 双方共享一个基于全球定位系统 (global position system, GPS) 的公共时钟参考, 但存在未知的固定初始相位差. 光脉冲经各自长度为 L_A 和 L_B 的光纤信道传输至 Charlie 端的测量装置, 由于环境温度、应力起伏等因素的作用, 光纤信道会引入一个时变的传播延时差 $\Delta t(t)$.

设 Alice 和 Bob 发送的、经过随机位移编码的光场时序信号分别为 $E_A(t)$ 和 $E_B(t)$. 在忽略探测器噪声和抖动等非理想因素的理想情况下, 两者在 Charlie 端的互相关函数可表示为

$$R_{AB}^{(0)}(t) = \langle E_A^*(t) E_B(t+t) \rangle_t, \quad (1)$$

其中 $\langle \cdot \rangle_t$ 表示时间平均. 为描述随机时间位移调制, 可将光场写成脉冲序列的形式:

$$E_A(t) = \sum_n a_n g(t - nT - \tau_{A,n}),$$

$$E_B(t) = \sum_m b_m g(t - mT - \tau_{B,m}), \quad (2)$$

其中 $g(t)$ 为归一化脉冲包络, $\tau_{A,n}$, $\tau_{B,m}$ 分别为 Alice 和 Bob 施加的零均值随机时间位移. 将 (2) 式代

入 (1) 式, 并利用脉冲包络的近似正交性, 可得

$$R_{AB}^{(0)}(\tau) \propto \left\langle \sum_{n,m} \delta(\tau - (m-n)T - \Delta t_0 - (\tau_{B,m} - \tau_{A,n})) \right\rangle. \quad (3)$$

当两路信号完全同步时, 通过对 (3) 式方括号内取统计平均, 零均值随机时间位移会使互相关函数在 $\tau = 0$ 处呈现单一峰值, 其表达式为

$$R_{AB}^{(0)}(\tau) \propto \delta(0). \quad (4)$$

若存在相对延时 Δt , 则函数形态将演变为

$$R_{AB}^{(0)}(\tau) \propto \delta(\tau) + \frac{1}{2} [\delta(\tau - \Delta t) + \delta(\tau + \Delta t)]. \quad (5)$$

即除中心主峰外, 在 $\tau = \pm \Delta t$ 处会出现两个对称的边带峰.

然而, 在实际系统中, 光纤延时 Δt 并非常数, 而是一个随时间缓慢变化的函数 $\Delta t(t)$. 该变化通常可分解为一个线性漂移项与一个随机起伏项之和:

$$\Delta t(t) = \Delta t_0 + \alpha t + \xi(t), \quad (6)$$

式中, Δt_0 为初始固定延时差; α 代表由温度梯度等因素引起的线性漂移速率; $\xi(t)$ 为一个均值为零的随机过程, 用于表征环境扰动引起的快速小幅抖动. 该分解的物理基础在于: 线性漂移项主要源于缓慢的环境温度梯度变化导致的光纤折射率渐变, 其时间尺度通常在分钟到小时量级; 随机起伏项则对应由机械振动、声学噪声等引起的快速扰动, 其典型带宽在 Hz 至数十 Hz 范围. 将二者分别建模, 为后续分别设计前馈预估与反馈补偿策略提供了物理依据.

在有限测量时间窗口 T_m 内观测到的关联函数, 实质上是理想关联函数在延时变化过程中的时间平均, 即

$$R_{AB}(\tau; T_m) = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} R_{AB}^{(0)}(\tau - \Delta t(t')) dt'. \quad (7)$$

上述分析假设光脉冲为理想 δ 函数、探测器无时间抖动. 在实际系统中, 激光脉冲有限时域宽度为 σ_p , 其包络通常可建模为高斯型函数 $G_p(\tau; \sigma_p)$. 超导纳米线单光子探测器存在时间抖动 σ_d , GPS 时钟源本身抖动为 σ_g . 这些因素共同导致系统的时间弥散响应函数 $J(\tau)$, 其净效应是使关联函数的主峰与边带峰发生平滑与展宽, 从而决定同步精度的理论下限. $J(\tau)$ 可近似为方差 $\sigma_s^2 = \sigma_d^2 + \sigma_g^2$ 的高

斯函数 $J(\tau; \sigma_s)$.

综合动态延时与系统非理想性, 在实际系统中观测到的关联函数 $R_{AB}(\tau)$ 最终由以下表达式描述,

$$R_{AB}(\tau) = \left\{ \left[G_p(\tau; \sigma_p) * R_{AB}^{(0)}(\tau; \Delta t(t)) \right] * J(\tau; \sigma_s) \right\}_{T_m}, \quad (8)$$

其中*表示卷积运算, 下标 T_m 是在时间窗口 T_m 内的平均结果. 该模型表明, 观测到的主峰与边峰会因脉冲展宽和时间抖动而被平滑、展宽, 其峰的位置精确地反映了测量窗口内的平均延时 Δt , 而峰的宽度则决定了系统最终的时间同步精度.

基于上述模型, 系统的理论同步精度 (即延时估计的不确定度) 主要受限于以下几个因素: 探测器与时钟的合成抖动 σ_s 、激光脉冲宽度 σ_p 、关联函数的采样间隔 $\Delta \tau_s$, 以及信道延时在测量时间内的漂移量 αT_m . 在最优估计条件下, 同步误差 $\varepsilon_{\text{sync}}$ 的下界可近似表示为

$$\varepsilon_{\text{sync}} \approx \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_p^2 + \left(\frac{\Delta \tau_s}{2\sqrt{2\ln 2}} \right)^2 + (\alpha T_m/2)^2}. \quad (9)$$

此公式为评估系统性能、优化关键参数 (如脉冲宽度、测量窗口) 提供了理论依据. 通过实时监测关联函数峰位的变化, 可以反馈控制可调光纤延时线, 对漂移量 α 进行动态补偿.

3 实验装置

为验证所提出的时钟自同步理论模型, 我们搭建了一套完整的 MDI 型 QKD 时钟自同步实验系统. 该系统旨在不依赖额外专用同步光纤的前提下, 实现两个独立发送端之间长期、稳定的高精度时钟同步. 整个装置主要由发送端、传输信道以及时间分辨光子探测与反馈控制端三部分构成, 其结构如图 1 所示.

两个发送端 (Alice 与 Bob) 的结构完全对称. 每个发送端的核心是一个任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG, Keysight M8190A), 用于生成精确的基带电信号. AWG 由共享的 GPS 驯服铷原子钟提供的 10 MHz 参考信号驱动, 以此确保双方时钟源具有长期的频率稳定性, 并将初始时间不确定度控制在亚纳秒量级. AWG 被编程产生相同的伪随机二进制序列, 该序列直接决定了光

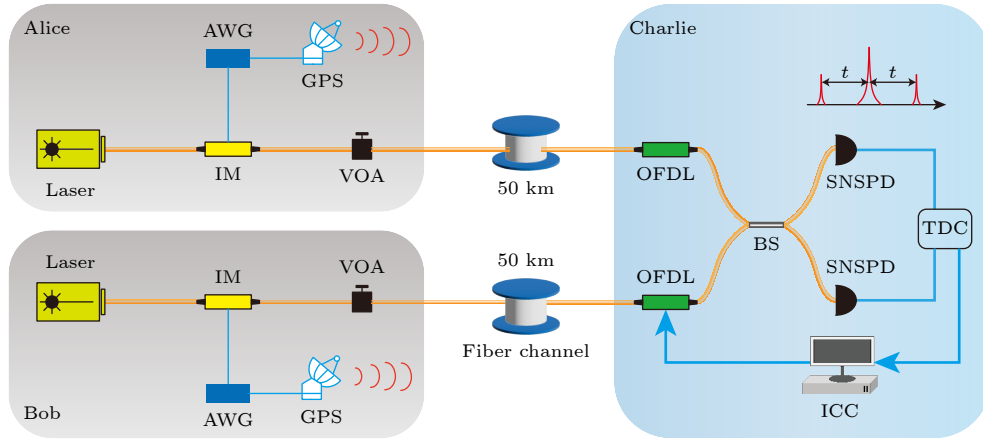


图1 MDI型QKD系统的时钟自同步实验装置. Laser, 激光器; IM, 强度调制器; AWG, 任意波形发生器; GPS, 全球定位系统; VOA, 可调光衰减器; OFDL, 光纤延迟线; BS, 光纤分束器; SNSPD, 超导纳米线单光子探测器; TDC, 时间数字转换器; ICC, 工业控制计算机

Fig. 1. Experimental setup for clock self-synchronization in the MDI-QKD system. Laser, laser signal; IM, intensity modulator; AWG, arbitrary waveform generator; GPS, global position system; VOA, variable optical attenuator; OFDL, optical fiber delay line; BS, beam splitter; SNSPD, superconducting nanowire single photon detector; TDC, time digital converter; ICC, industrial control computer.

脉冲的发射时间模式. 具体而言, 每个时钟周期内, 脉冲在标称时间位置的基础上, 被施加一个服从均匀分布、均值为零的随机时间偏移量 τ , 从而实现理论模型所描述的随机位移编码.

该电信号加载至一个带宽为 40 GHz 的铌酸锂强度调制器 (intensity modulator, IM) 的射频端口. 一束来自外腔可调谐激光器的连续光 (中心波长 1550.12 nm, 线宽 <10 kHz) 注入 IM, 被调制为与电信号相对应的伪随机光脉冲序列. 随后, 光脉冲经过一个可调光衰减器, 被逐脉冲衰减至平均光子数低于 0.1 的单光子量级, 以符合 QKD 系统的安全要求. 至此, 这产生了同步初始化后、带有相同随机编码图案的弱相干光脉冲序列.

来自 Alice 和 Bob 的光脉冲序列分别注入长度各为 50 km 的标准单模光纤 (SMF-28) 中, 模拟远距离传输信道. 为研究信道延时漂移的影响并实现动态补偿, 在信道中串入了一个电动的可调光纤延迟线 (optical fiber delay line, OFDL). 该 OFDL 的调节范围为 5 ns, 分辨率为 5 fs, 可多个级联, 用于主动补偿测量得到的路径延时差 Δt . 光纤信道被放置于温控箱内, 通过改变环境温度 (范围 25 至 40 $^{\circ}\text{C}$), 可主动引入可控的、近似线性的群延时漂移, 用以表征和测试系统的漂移跟踪与补偿能力.

两路光信号传输至位于 Charlie 端的测量装置, 分别进入 50/50 光纤分束器 (beam splitter, BS)

的两个输入端口进行干涉. 分束器的两个输出端口分别连接两个高性能的超导纳米线单光子探测器 (SNSPD, single quantum system 探测效率 $>90\%$, 暗计数率 <10 Hz). 探测器的时间抖动 (σ_d) 经独立标定, 典型值约为 26 ps (FWHM). SNSPD 的输出电脉冲信号由一台时间数字转换器 (time digital converter, TDC, SERU HSPC-GT) 进行记录, 其最小时间分辨率 ($\Delta\tau_s$) 为 1 ps.

核心的信号处理流程如下: TDC 连续记录所有探测到光子的时间戳. 实时处理单元 (工业控制计算机) 从缓冲区中读取数据, 并以滑动时间窗口的方式, 持续计算 Alice 和 Bob 两路光子事件序列的互相关函数 (即二阶关联函数 $G_{(\tau)}^{(2)}$). 通过高斯拟合算法精确提取主峰与边峰的位置, 即可解算出实时的路径延时差 Δt .

该系统构成一个完整的数字闭环控制系统. 计算得到的 Δt 与零值 (理想同步目标) 进行比较, 其误差信号经反馈控制器处理后, 施加于电动 OFDL 上. OFDL 通过高精度滑动反射镜, 动态调整 Bob 路径的光学长度, 从而抵消测得的延时差. 该反馈环路以约 30 mHz 的带宽运行, 能够实时跟踪并补偿由环境温度变化引起的慢速漂移, 以及部分高频抖动, 实现系统时钟的自同步.

4 实验结果与分析

本节从三个方面对所提出的自同步理论进行

实验验证: 首先验证伪随机位移序列二阶关联函数对路径延时差的提取能力, 其次测试闭环反馈系统的静态同步精度, 最后检验系统对动态漂移的跟踪补偿性能. 在此基础上, 进一步通过干涉实验评估自同步效果对 MDI 型 QKD 系统性能的实际影响.

由于光纤长度和折射率将会随着环境温度、应力变化而变化, 进而改变光纤的群延时, 这导致系统时钟存在缓慢漂移. 在 25 °C 恒温环境下, 首先对 100 km 光纤链路 (未引入主动漂移) 内不同频率时钟进行了长期漂移测试, 如图 2 所示. 结果表明, 时钟频率越高, 漂移速率越快. 这一趋势与时钟频率越高、脉冲周期越短, 系统对相同量级绝对延时变化越敏感的事实相符.

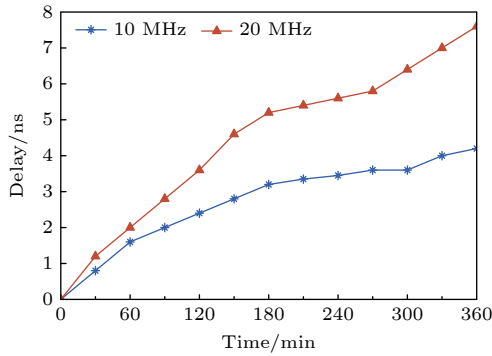


图 2 时钟漂移测试
Fig. 2. Clock drift test.

上述时钟漂移测试表明, 高频时钟在长距离光纤链路中存在不可忽略的缓变延时漂移. 为在不依赖独立同步链路的条件下精确提取这一漂移量, 本方案采用了伪随机位移编码光脉冲序列的二阶关联测量. 图 3 展示了不同延时条件下实测的二阶关

联函数. 在理想同步状态下, 系统两路信号完全同步, 依据 (4) 式, 关联函数呈现单一主峰, 如图 3(a) 所示, 表明 Alice 与 Bob 的量子脉冲已实现高精度时间重合; 当系统存在一定延时差时, 依据 (5) 式, 关联函数呈现清晰的三峰结构, 一个主峰与两个对称边带, 且边带与主峰的间距即为光纤链路的延时差, 如图 3(b) 所示, 可直观地从关联函数峰位置提取出系统两路信号的延时信息; 当光脉冲占空比增加时, 关联函数峰形发生明显展宽, 如图 3(c) 所示, 这结果与 (8) 式的预测符合. 值得注意的是, 由图 3(b) 可知, 两个边带与主峰的间距存在约数皮秒的微小不对称, 其主要来源为探测器两通道间时间响应的微小差异、脉冲序列有限长度带来的关联函数计算偏倚, 以及 GPS 驯服时钟的残余相位波动. 在现有实验条件下, 该不对称性的幅度远小于系统同步精度要求, 不影响延时差的可靠提取. 上述实验结果与理论模型公式的预测相吻合, 验证了二阶关联函数特征峰位与路径延时差之间的定量映射关系.

系统启动并进入闭环锁定状态后, 持续记录反馈环路计算出的剩余延时误差 $\Delta t_{\text{residual}}$, 时长为 2 h. 统计结果如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 残余误差的均方根 (RMS) 为 77.69 ps, 峰值起伏小于 ± 200 ps. 该结果验证了本方案在静态环境下可实现数十皮秒量级的高精度同步, 其精度主要由探测器抖动、拟合算法分辨率及控制环路噪声决定, 与理论模型预测基本一致.

为模拟真实环境扰动, 我们改变温控箱温度, 在光纤链路中引入群延时漂移. 图 4(c) 展示了系统在有主动反馈补偿两种情况下的表现. 在不开

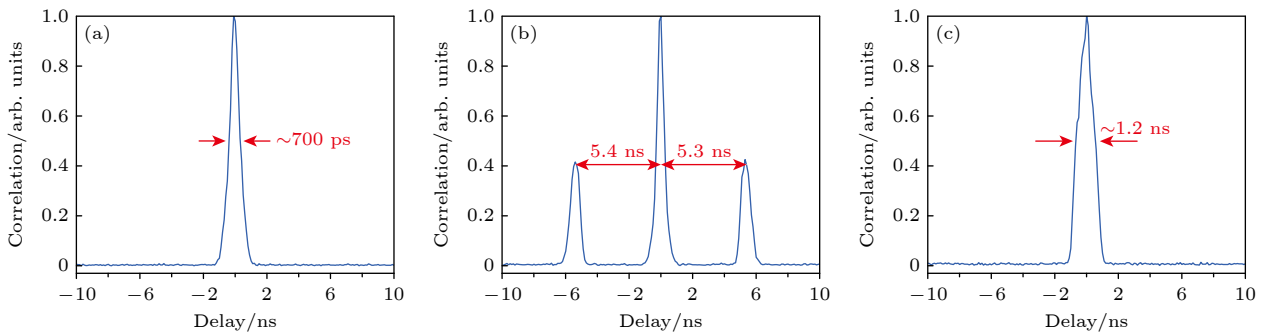


图 3 二阶关联函数特征图 (a) 理想同步状态, 关联函数呈现单峰; (b) 固定延时下, 关联函数呈现清晰的三峰结构 (主峰+对称边带); (c) 脉冲占空比增大, 使关联函数峰形加宽

Fig. 3. Characteristics of the second-order correlation function: (a) In the ideal synchronization state, the correlation function shows a single peak; (b) the three-peak structure (main peak and symmetrical sidebands) of the correlation function at fixed delay; (c) the increases in pulse duty cycle broadens the peak shape of the correlation function.

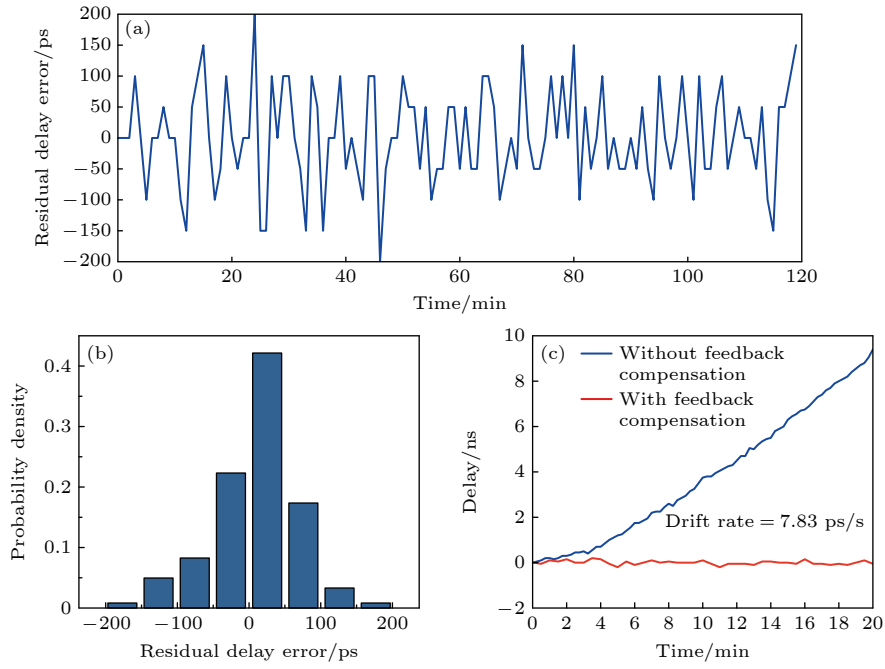


图4 同步性能核心结果图 (a) 静态同步2 h内残余同步误差 $\Delta t_{\text{residual}}$ 的时间序列; (b) 静态同步误差统计直方图; (c) 动态漂移跟踪曲线. 在受控线性温度漂移下, 有/无反馈补偿时, 系统测得的路径延时差 Δt 随时间的变化曲线

Fig. 4. Core results for synchronization performance. (a), (b) Statistics on static synchronization accuracy. The time series and histogram of the residual synchronization error $\Delta t_{\text{residual}}$ within 2 hours. (c) Dynamic drift tracking curve. Time-dependent curves of the measured path delay difference Δt in the system with and without feedback compensation under controlled linear temperature drift.

启补偿时, 测得的路径延时差 Δt 以约 7.83 ps/s 的速率单调变化. 当启用基于关联函数峰位反馈的闭环控制后, 系统能够实时跟踪该变化, 并将残余误差成功抑制在 ± 200 ps 范围内. 该结果充分证明, 本方案所采用的闭环反馈机制能够有效地补偿由环境温度变化引起的线性延时漂移. 需要指出的是, 7.83 ps/s 的漂移速率已覆盖典型架空光缆在昼夜温差显著变化下的最恶劣工况, 表明本方案具备面向实际部署环境的鲁棒性.

时钟同步的最终目标是保障 MDI 型 QKD 系统的量子密钥生成能力. 在基于弱相干态光源的 TF-QKD 等协议中, 通信双方的光脉冲在 Charlie 端分束器处发生单光子水平的光场一阶干涉, 干涉结果直接决定了探测端符合计数的统计分布特征, 进而影响最终的安全成码率. 因此, 两路光脉冲到达分束器时的时间重合度对系统性能具有决定性影响.

为直接评估本自同步方案的效果, 我们在闭环锁定条件下, 通过主动扫描可调光纤延时线, 测量了 Charlie 端两个单光子探测器的符合计数率随路径延时差的变化曲线, 结果如图 5 所示. 在精确同步条件下 (路径延时差 $\Delta t \approx 0$), 两路光脉冲在分束

器处实现最大程度的时间重叠, 光场一阶干涉效应最为显著, 两个探测器的归一化符合计数率降低至 0.065 (未扣除本底噪声). 当人为引入 +500 ps 的固定延时失配时, 两路脉冲的时间重叠显著减弱, 干涉效应基本消失, 归一化符合计数率上升至 0.28. 这一由干涉峰值到近本底水平的明显变化, 定量地展示了两路光脉冲相对延时效对 MDI 型 QKD 系统核心物理过程的直接调制作用.

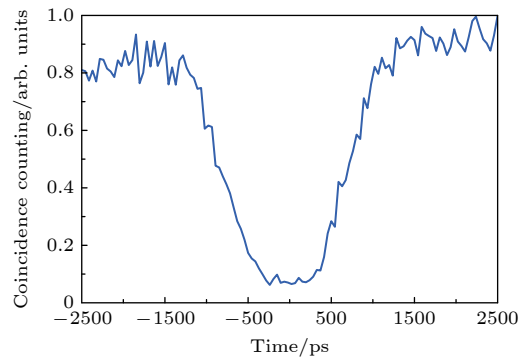


图5 Charlie 端两个探测器的符合计数率随路径延时差的变化曲线. 光场一阶干涉最小值位于零延时差处

Fig. 5. The coincidence count rate of the two detectors at Charlie varies with the path delay difference. The minimum value of the first-order interference of the light field is located at zero delay difference.

本研究通过理论与实验证明, 基于随机位移脉冲序列二阶关联的时钟自同步技术, 能够在不引入额外专用光纤链路的前提下, 利用量子信号自身的统计关联特性实现高精度时钟同步. 其性能极限仍主要受以下因素制约: 1) 探测器时间抖动: 本实验所用 SNSPD 的固有抖动是关联函数峰位提取精度的主要噪声来源; 2) 光子探测率与积分时间: 在单光子量级下, 为获得足够高的关联函数信噪比, 需一定的数据累积时间, 这限制了反馈环路带宽, 使之难以补偿更高频的时域抖动; 3) GPS 共模噪声: GPS 能够长期同步双方时钟的频率, 但其短期相位抖动作为共模噪声, 是无法被关联测量完全消除的, 这决定了本方案在超长时间积分下的同步精度极限.

5 结 论

本文针对 MDI 型 QKD 系统因依赖额外专用同步光纤链路所引入的非共径漂移、系统复杂度增加及部署成本上升等关键问题, 提出并实验验证了一种基于随机位移脉冲序列二阶关联的共径时钟自同步方法. 理论上, 我们建立了一个包含动态光纤信道漂移因素的完整模型. 该模型阐明, 通过对通信双方发送的伪随机位移光脉冲序列进行互相关测量, 可从其关联函数的特征峰位直接、准确地解算出信号路径的实时延时差, 为实现共径传输下的同步奠定了原理基础. 实验上, 我们成功搭建了具备闭环反馈控制能力的自同步系统. 在 100 km 光纤链路上实现了长期优于 77.7 ps(RMS) 的长期同步精度, 并验证了系统对高达 7.8 ps/s 的环境温度导致的线性延时漂移的有效跟踪与补偿能力. 通过光场一阶干涉实验进一步证实, 该同步精度可充分保障 MDI 型 QKD 系统对脉冲时间对准的要求. 本研究摒弃了传统的独立同步链路, 避免了因非共路径传输导致的固有漂移问题, 为高速、长距离 MDI 型 QKD 乃至更广泛的量子通信系统的实用化部署提供了切实可靠且高性能的同步解决方案.

参考文献

- [1] Lo H K, Curty M, Qi B 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 130503
- [2] Liu Y, Chen T Y, Wang L J, et al. 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 130502
- [3] Yin H L, Chen T Y, Yu Z W, Liu H, You L X, Zhou Y H, Chen S J, Mao Y, Huang M Q, Zhang W J, Chen H, Li M J, Nolan D, Zhou F, Jiang X, Wang Z, Zhang Q, Wang X B, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 190501
- [4] Liu Y, Zhang W J, Jiang C, Chen J P, Zhang C, Pan W X, Ma D, Dong H, Xiong J M, Zhang C J, Li H, Wang R C, Wu J, Chen T Y, You L, Wang X B, Zhang Q, Pan J W 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 210801
- [5] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F, Shields A J 2018 *Nature* **557** 400
- [6] Zhong X, Hu J, Curty M, Qian L, Lo H K 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 100506
- [7] Zhong X, Wang W, Mandil R, Lo H K, Qian L 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 014025
- [8] Park C H, Woo M K, Park B K, Kim Y S, Baek H, Lee S W, Lim H T, Jeon S W, Jung H, Kim S, Han S W 2022 *npj Quantum Inf.* **8** 48
- [9] Xie Y M, Weng C X, Lu Y S, Fu Y, Wang Y, Yin H L, Chen Z B 2023 *Phys. Rev. A* **107** 042603
- [10] Tanaka A, Fujiwara M, Yoshino K ichiro, Takahashi S, Nambu Y, Tomita A, Miki S, Yamashita T, Wang Z, Sasaki M, Tajima A 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 542
- [11] Sibson P, Kennard J E, Stanisic S, Erven C, O'Brien J L, Thompson M G 2017 *Optica* **4** 172
- [12] Tomita A, Yoshino K ichiro, Nambu Y, Tajima A, Tanaka A, Takahashi S, Maeda W, Miki S, Wang Z, Fujiwara M, Sasaki M 2010 *Opt. Fiber Technol.* **16** 55
- [13] Lin Z, Gao Y, Zhou L, Yuan H, Zhu Y, Lin Z, Zhang W, Huang Y, Cai X L, Yuan Z 2025 *Opt. Quantum* **3** 195
- [14] Li W, Zhang L, Tan H, Lu Y, Liao S K, Huang J, Li H, Wang Z, Mao H K, Yan B, Li Q, Liu Y, Zhang Q, Peng C Z, You L, Xu F, Pan J W 2023 *Nat. Photonics* **17** 416
- [15] Zhang L, Wang F X, Fu H Y, Tang X C, Zhang G W, Song H Y, Qian Y J, Li D W, Li D C, Pan D, Guo G C, Han Z F, Long G L 2026 *Opt. Quantum* **4** 89
- [16] Bienfang J C, Gross A J, Mink A, Hershman B J, Nakassis A, Tang X, Lu R, Su D H, Clark C W, Williams C J, Hagley E W, Wen J 2004 *Opt. Express* **12** 2011
- [17] Wang G Q, Wang C Z, Li Y, Han L Y, Li D D, Cai W Q, Yin J, Ren J G, Liao S K, Peng C Z 2025 *Opt. Express* **33** 40579
- [18] Chen S, Wang J D, Zhong P P, Wei Z J, Liu S H 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0727001 (in Chinese) [陈帅, 王金东, 钟平平, 魏正军, 刘颂豪 2011 光学学报 **31** 0727001]
- [19] Wang J D, Wei Z J, Zhang H, Zhang H N, Chen S, Qin X J, Guo J P, Liao C J, Liu S H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5514 (in Chinese) [王金东, 魏正军, 张辉, 张华妮, 陈帅, 秦晓娟, 郭健平, 廖常俊, 刘颂豪 2010 物理学报 **59** 5514]
- [20] Wu G, Zhou C Y, Chen X L, Han X H, Zeng H P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3622 (in Chinese) [吴光, 周春源, 陈修亮, 韩晓红, 曾和平 2005 物理学报 **54** 3622]
- [21] Śliwczyński Ł, Krehlik P, Lipiński M 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 075302
- [22] Tratnik J, Lemut P, Dragonja U, Tratnik J, Batagelj B, Vidmar M 2013 *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)* Alexandria VA, October 28-31, 2013 pp162-165
- [23] Tanaka A, Fujiwara M, Nam S W, Nambu Y, Takahashi S, Maeda W, Yoshino K ichiro, Miki S, Baek B, Wang Z, Tajima A, Sasaki M, Tomita A 2008 *Opt. Express* **16** 11354
- [24] Townsend P D 1997 *Electron. Lett.* **33** 188
- [25] Patel K A, Dynes J F, Choi I, Sharpe A W, Dixon A R, Yuan Z L, Penty R V, Shields A J 2012 *Phys. Rev. X* **2** 041010

Clock self-synchronization technology for measurement-device-independent quantum key distribution*

LIU Jianqiang^{1)†} LI Xingjian²⁾ WANG Bingkun²⁾ SONG Chengming¹⁾
WU Min¹⁾ KONG Dehuan¹⁾ WU Liang¹⁾ HU Jianyong^{2)‡} XIAO Liantuan²⁾

¹⁾ (*Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China*)

²⁾ (*State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 7 May 2026; revised manuscript received 22 May 2026)

Abstract

Measurement-device-independent quantum key distribution (MDI-QKD), which introduces the untrusted third-party measurement nodes, is fundamentally immune to all detector side-channel attacks and is a key technology for building wide-area quantum secure communication networks. However, the existing systems typically rely on additional dedicated optical fiber links for clock synchronization between the transmitter and receiver. This not only increases system complexity and deployment costs but also introduces pulse timing misalignment due to length mismatch between the synchronization and signal links, resulting in higher bit error rates. This paper proposes and experimentally demonstrates a common-path clock self-synchronization method based on the second-order correlation properties of the quantum signal. This method uses the second-order correlation function of pseudo-random displacement optical pulse sequences sent by both communication parties as the clock synchronization criterion. It directly extracts the channel delay information from the quantum signal in real time and performs closed-loop feedback compensation via a tunable optical fiber delay line, thus eliminating, in principle, the inherent drift risks associated with non-common-path transmission.

First, we establish a complete theoretical model based on the second-order correlation characteristics of the optical pulse sequences. Starting with the sequences of pseudo-random displacement optical pulses emitted by the two communicating parties, this model analyzes the evolution of their cross-correlation functions under the optical fiber channel dynamic drift. It establishes a quantitative mapping between the characteristic peaks of the correlation function and the path delay difference, thereby laying the theoretical foundation for extracting synchronization information in real time from the quantum signals themselves and providing a basis for closed-loop compensation. Second, we develop a clock self-synchronization experimental system with closed-loop feedback control capabilities. Both the transmitter and receiver use global position system (GPS) reference clocks and employ arbitrary waveform generators to modulate optical pulses with identical pseudo-random time displacement sequences. By measuring the second-order correlation function between the two pulse sequences, the receiver can accurately extract real-time relative delay information of the optical fiber link. This information is then used to dynamically compensate for the delay through feedback control of a tunable fiber delay line,

* Project supported by the Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2021ZD0300705), the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant Nos. 202503021211084, 202403021221226, 202403021222349), the Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi, China (Grant No. 2024L433), and the High-level Talent Introduction Scientific Research Start-up Fund Project of Shanxi Province, China (Grant Nos. RCK202320, RCK202320-1).

† Corresponding author. E-mail: liujianqiang@sxgkd.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jyhu@sxu.edu.cn

thereby achieving adaptive synchronization of the transmitter clock. Finally, we validate the self-synchronization theory experimentally. Under different delay conditions, we measure the second-order correlation function of optical pulse sequences encoded with pseudo-random displacement. The experimental results confirm the quantitative mapping relationship between the characteristic peak positions of the second-order correlation function and the path delay differences. Over a 100 km optical fiber link, we achieve a long-term synchronization accuracy better than 77.7 ps (RMS) and demonstrate that the system can effectively track and compensate for linear delay drifts of up to 7.8 ps/s.

In conclusion, this work abandons traditional independent synchronization links, thereby avoiding the inherent drift problems caused by non-common-path transmission. It develops a high-precision, low-complexity clock self-synchronization technology for MDI-QKD systems and offers a viable technical pathway for promoting their practical deployment.

Keywords: measurement device independent, quantum key distribution, second-order correlation, self-synchronization

DOI: [10.7498/aps.75.20260648](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260648)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260648](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260648)



基于量子信号关联函数的测量设备无关型量子密钥分发系统时钟自同步

刘建强 李行健 王丙坤 宋成明 武敏 孔德欢 吴量 胡建勇 肖连团

Clock self-synchronization technology for measurement-device-independent quantum key distribution

LIU Jianqiang LI Xingjian WANG Bingkun SONG Chengming WU Min KONG Dehuan WU Liang
HU Jianyong XIAO Liantuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 200601 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260648

CSTR: 32037.14.aps.75.20260648

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260648>

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

基于实际探测器补偿的离散调制连续变量测量设备无关量子密钥分发方案

Discrete modulation continuous-variable measurement-device-independent quantum key distribution scheme based on realistic detector compensation

物理学报. 2022, 71(24): 240304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221072>

基于双参数扫描的量子存储辅助测量设备无关量子密钥分发协议

Dual-parameter-scanning-based quantum-memory-assisted measurement-device-independent quantum key distribution protocol

物理学报. 2026, 75(1): 240304 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251171>

基于回归决策树的测量设备无关型量子密钥分发参数优化

Regression-decision-tree based parameter optimization of measurement-device-independent quantum key distribution

物理学报. 2023, 72(11): 110304 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230160>

基于多尺度纠缠重整化假设的测量设备无关量子密钥分发协议

Measurement-device-independent quantum key distribution based on the multi-scale entanglement renormalization ansatz

物理学报. 2026, 75(7): 110304 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251450>

标记单光子源在量子密钥分发中的应用

Overview of applications of heralded single photon source in quantum key distribution

物理学报. 2022, 71(17): 170304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220344>

实用化态制备误差容忍参考系无关量子密钥分发协议

Study of practical state-preparation error tolerant reference-frame-independent quantum key distribution protocol

物理学报. 2023, 72(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231144>