

引用格式:董瑞芳,权润爱,项晓,等.量子时间同步技术的发展[J].时间频率学报,2026,49(1):165-174.

量子时间同步技术的发展

董瑞芳^{1,2,3}, 权润爱^{1,2}, 项晓^{1,2}, 刘涛^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:随着时间频率技术飞速发展及其应用领域不断扩大,提高时间同步精度和安全性的需求与日俱增。作为时间同步新体制的量子时间同步是量子光学与时间频率相融合的交叉前沿技术,将为大幅提升授时精度、保障授时安全性提供新一代变革性技术。以国家战略急需为牵引,中国科学院国家授时中心在国内率先开展基于频率纠缠双光子源的量子时间同步研究,以突破传统时间传递精度极限和安全局限。面向量子时间同步长距离高精度实地应用,提出了双向量子时间同步理论模型和实现方案;突破频率纠缠光源及非定域测量等实用化技术,建立双向量子时间同步的量化评估及优化模型,国际首次实现了 54.6 fs@57 300 s 超高精度的 50 km 光纤时间同步演示;研制双向量子时间同步原型系统,成功应用于实地时间同步系统中,同步稳定度达到亚皮秒级,研究成果推动量子时间同步从前沿技术向实际应用发展。

关键词:量子时间同步;频率纠缠双光子源;光纤时间传递

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0165-10

Development of quantum time synchronization technology

DONG Rui-fang^{1,2,3}, QUAN Run-ai^{1,2}, XIANG Xiao^{1,2},
LIU Tao^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the rapid development of time and frequency technology, the demand for improving the accuracy and security of time synchronization is growing day by day. As a new system for time synchronization, quantum time synchronization is an interdisciplinary technology integrating quantum optics and time-frequency, which will provide a new generation of transformative technology for significantly improving accuracy and ensuring timing security. Driven by the urgent needs of national strategies, the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences is a pioneer in China in launching quantum time synchronization studies based on frequency-entangled biphoton sources. To address the long-distance, high-precision applications of quantum time synchronization, a theoretical model of quantum two-way time synchronization was proposed. Via overcoming practical technologies such as generation of frequency-entangled biphoton sources and nonlocal coincidence measurement, ultra-high-precision time synchronization demonstration over 50 km spooled fiber was achieved, with a time deviation result of 54.6 fs@57 300 s. Through optic-electronic control integrations,

收稿日期:2025-09-16;接受日期:2025-11-12

基金项目:国家自然科学基金(12033007)

作者简介:董瑞芳,女,博士,研究员,主要从事量子时间同步和光纤时频传递的研究。

a prototype system for two-way quantum time synchronization was developed, and successfully applied in field time synchronization systems, with synchronization stability reaching the subpicosecond level. Our results have promoted the development of quantum time synchronization from frontier technology to practical applications.

Keywords: quantum time synchronization; frequency-entangled biphotons; fiber-optic time transfer

时间同步技术在分布式系统中实现时间的精确对齐,其精度与安全性不仅是国家授时能力的体现,更是国家战略竞争力的核心要素。利用频率纠缠光源的双向量子时间同步,不仅将现有同步精度提高 1~2 个量级,同时兼具天然加密属性,展现了实现高精度安全授时的巨大潜力。

鉴于量子时间同步技术的战略价值,各个国家和地区相继出台相关计划部署。2020 年起,美国空军持续支持利用量子技术提供高精度 PNT (positioning, navigation, and timing) 服务的解决方案。2023 年北约发布《科学与技术趋势 2023—2043》,提出将重点部署量子授时技术,特别是其在军事和安全领域的应用。2023 年英国发布《国家量子战略》,未来 10 年内投入 7 000 万英镑开发量子 PNT 等关键技术。2023 年我国第 316 期双清论坛围绕建立和维持完备、安全的精密时空基准体系相关的前沿性与应用性问题,凝练了未来 5~10 年重大关键科学问题和核心技术。“突破安全的量子时间传递及同步技术”被列为主要发展目标之一。

中国科学院国家授时中心 (NTSC) 以国家发展高精度安全授时技术的战略急需为牵引,聚焦基于频率纠缠双光子源的量子时间同步实用化开展研究。提出的双向量子时间同步协议已发展为实现高精度安全授时的重要手段;国际首次在 50 km 光纤上演示了 10 fs 级同步精度,展现了在大损耗、强噪声环境条件下的应用优势;成功研制量子时间同步原型系统,形成高精度安全光纤时间同步应用能力。

现对量子时间同步从光源制备、方案创新以及实用化进程的发展历程进行回顾分析。

1 频率纠缠双光子源的制备及量子特性研究

频率纠缠双光子源是量子时间同步应用的重要资源^[1-3]。根据关联类型的不同,频率纠缠双光子源分为频率正关联纠缠双光子源和频率反关联纠缠双光子源。

国家授时中心在频率纠缠双光子源的产生及特性研究方面开展了系统性工作,围绕频率纠缠光

源的制备及优化、纠缠光源的小型化、量子非定域性等方面展开深入研究,取得了一系列进展。

超快激光泵浦产生的频率正关联纠缠双光子源由于其精准的定时信息,且当单光子探测器的触发信号来源于泵浦光的重复频率时,频率纠缠双光子可以被有效探测,暗计数率较低,是理想的时间同步光源之一。

2013—2015 年间,国家授时中心采用中心波长 792 nm、脉冲宽度小于 20 fs 的超短脉冲激光泵浦周期极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体制备了通信波段的频率正关联纠缠光源(联合频谱结果如图 1 所示),该光源的纠缠度最大可达 36,双光子的频谱不可分性接近 93%,采用探测效率 10% 的探测器探测,双光子的计数率约 3.2 kcps,为基于 HOM (Hong Ou Mandel) 干涉的时间同步演示提供了较为理想的光源条件^[4-6]。

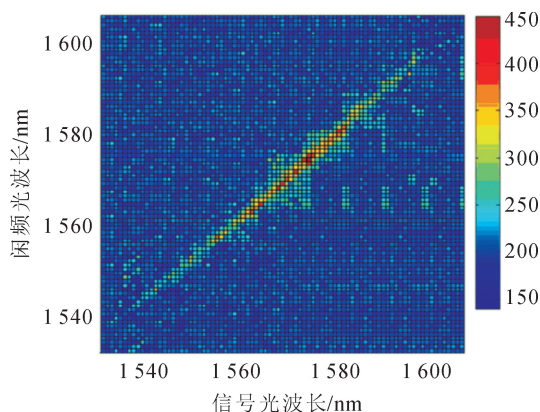


图 1 频率正关联纠缠双光子源的联合频谱分布

在频率纠缠特性的表征方法上,国家授时中心实现了技术创新。2017 年提出了利用马赫-曾德 (Mach Zehnder, MZ) 干涉仪同时表征频谱不可分性与频率纠缠度^[7];由于频率正关联纠缠双光子之间存在固有群延时差, MZ 干涉图出现中心条纹包络及两侧的 HOM 型凹陷。通过测量凹陷深度、间距及包络宽度,可同时获取频谱不可分性与纠缠度,理论与实验结果表明,基于该方法与传统 HOM 干涉及频谱测量方法的结果一致,为频率纠缠特性的高效表征提供了新方案。

由连续激光泵浦非线性介质产生的频率反关联纠缠双光子源也称为能量时间纠缠双光子源,其双光子产生的随机性配合强时间关联特性,使其满足时间同步信号层的安全性必备条件,因此,频率反关联纠缠双光子源受到越来越多的关注与研究。

2014 年起,国家授时中心也逐步开展了频率反关联纠缠双光子源的产生研究,从基础特性探索到实用化光源研发,逐步推动该类纠缠源向高性能、小型化和工程化方向发展。

针对光纤激光经模清洁器后的强度噪声特性进行研究,通过引入声光调制器反馈,将用作自发参量下转换 (SPDC) 泵浦激光的连续激光线宽从 26 kHz 压窄至 16 kHz,有效降低了转化噪声,为频率反关联纠缠双光子源的泵浦光性能提升提供重要支撑^[8]。

2016 年,国家授时中心以连续激光泵浦 PPK-TP 晶体,实现了通信波段的高性能频率反关联纠缠双光子的制备^[9]。实验测得频率反关联纠缠双光子的联合频谱呈现明显的频率反关联特性(联合频谱如图 2 所示),带宽为 0.52 nm,频率纠缠度约 6.19。为长距离量子时间同步应用奠定了基础。

为推动高亮度、集成化频率反关联纠缠双光子源应用,国家授时中心开始研究应用非线性波导器件的光源制备。2018 年,采用 780 nm 分布式布拉格反射镜激光二极管泵浦 II 类准相位匹配周期极化铌酸锂 (PPLN) 波导,实现了频率反关联纠缠双光子源的小型化^[10]。当注入波导的泵浦功率为 44.9 mW 时,双光子的产生率达 18.7 Mcps。该方案通过波导结构将光学平台系统集成到机箱中,大

幅缩减了装置体积,为实用化量子时间同步提供了核心光源。

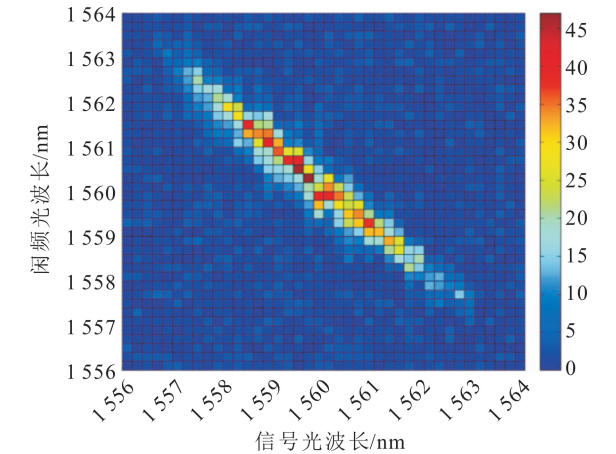


图 2 频率反关联纠缠双光子源的联合频谱分布^[9]

在小型化基础上,2022 年,国家授时中心报道了一款全光纤结构的通信波段频率反关联纠缠双光子源,将所有光学元件集成于 36 cm×21 cm×16.5 cm 的紧凑型机箱中,重量降至 5 kg。全光纤设计将功率波动从±7.6% 降至±1.0%,展现出优异的长期稳定性^[11]。

2024 年,小型化频率纠缠双光子源集成技术再获突破,对系统进一步电控集成^[12],纠缠源的电学和光学元件均集成到 20.4 cm×15.6 cm×8.4 cm 的小机箱中,重量降至 2.5 kg,光源亮度优于法国 AUREA^[13],加拿大 OZ optics^[14],鲲腾量子^[15] 等公司的同类商用产品,且波长稳定性指标(<20 pm) 优于法国 AUREA 的纠缠源(20 pm),光源参数对比见图 3。为现场交钥匙量子通信与时间同步应用提供了可靠的光源。

	AUREA(法国) ^[1]	OZ optics(加拿大) ^[2]	鲲腾量子 ^[3]	自研设备 ^[4]
中心波长	(1 550±10) nm	1 550 nm	1 560 nm	1 560 nm
光子带宽	<2 nm	3 nm	1 nm	1 nm
光子对产率	0.25 Mcps/mW	>6.7 Mcps/mW	5 kcps/mW	>8.6 Mcps/mW
干涉可见度	99%	98%	\	95%
波长稳定性	20 pm	\	\	<20 pm
[1] https://aureatechnology.com/en/products/twin-photons-source.html [2] https://www.ozoptics.com/ALLNEW PDF/DTS0199.pdf [3] https://www.iqanta.com.cn/productionfo.php?cid=3&id=1 [4] https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2023/5/500630.shtml				

图 3 全光纤通信波段纠缠双光子源性能对比

非定域性是量子光源的独有特性,国家授时中心围绕频率纠缠双光子源的非定域色散消除(NDC)、非定域测量等核心问题取得了一系列突破性成果。

2019年,国际首次非定域地验证了频率纠缠双光子源的独特量子特性。频率反关联纠缠的一对

光子分别经过 62 km 光纤传输和本地的色散补偿模块,利用非定域色散消除特性(基本原理如图 4 所示),并基于事件计时器和互相关算法的非定域测量,实现了 Wasaak 不等式的违背,验证了该纠缠的非定域性^[16]。这项工作为在长距离通信光纤信道严格测试连续变量的非定域性奠定了理论与技术基础。

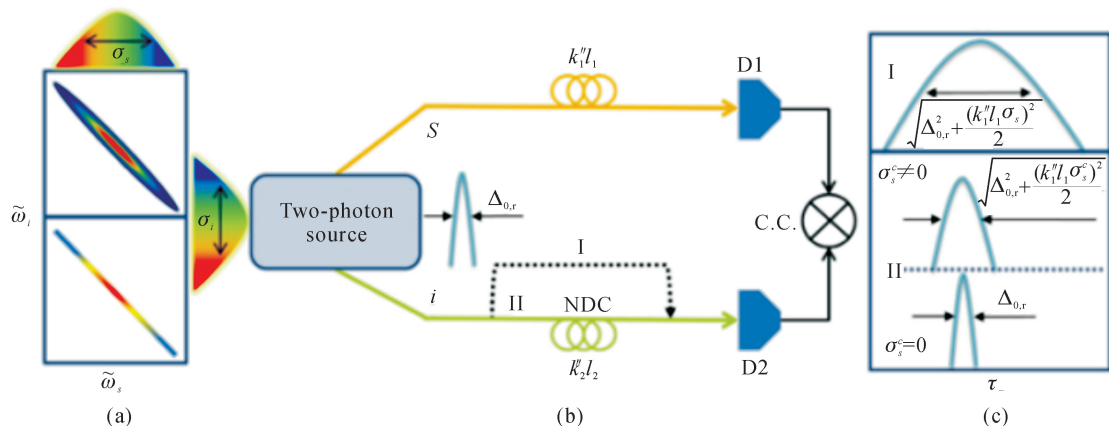


图 4 非定域色散消除的原理示意图^[17]

2020年,建立了有限频率纠缠下 NDC 特性的量化模型^[17],指出双光子频谱关联宽度是色散消除极限的关键制约因素,通过频率正关联与反关联纠缠源的对比实验,验证了最优色散补偿条件与频谱相关系数的直接关联,理论模拟与实验结果的一致性为 NDC 效应的工程化应用提供了定量依据。

在基于非定域性测试的纠缠光源性能优化方面,国家授时中心提出并构建了混合频时光谱仪,结合可调光学滤波器与色散元件,无需额外波长校准和激光触发即可实现纠缠源的频谱测量^[18],对频率反关联纠缠光子的测量显示,联合频谱带宽低至 0.09 nm,频率纠缠度达 26.9,大大降低了测量纠缠光子光谱的成本,为非定域性研究提供了高精度频谱表征工具。

2022年,国家授时中心进一步实现了基于波长调谐的 NDC 优化,通过改变 PPLN 波导温度使信号光波长在 1 537~1 568 nm 范围内可调,在 50 km 光纤传输中,将时间符合宽度从传统局域补偿的 110 ps 压缩至 86.1 ps,且在 48~60 km 光纤长度范围内保持良好补偿效果^[19],证明了 NDC 在动态色散环境中的灵活性与稳定性。

2 量子时间同步方案研究与创新

从 2001 年提出基于频率纠缠光源的量子时间

同步的概念以来,各国学者相继提出了多种协议,包括传送带量子时间同步方案^[20],单向量子时间同步方案^[3]等,国内中国科学院物理所^[21]、清华大学^[22]等也开展了相关的方案研究工作。面向实际应用,需要研究更具可行性的时间同步方案。

国家授时中心自 2011 年在国内率先建立量子时间同步研究实验室起,在量子时间同步的方案创新上不断探索。

2012 年提出了光纤链路色散无关的量子时间同步方案^[23],如图 5 所示,该方案利用频率反关联纠缠源的色散消除特性,可实现两个通过未知长度光纤连接的远程时钟的精确同步,同步精度主要取决于频率纠缠双光子的频谱带宽,参考光纤线圈和光纤链路中温度变化引起的波动。基于该方案对相距 10 km 的两个时钟进行同步,理论上同步精度可优于 1 ps。

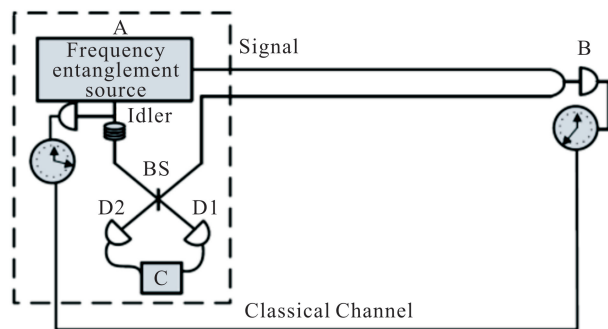


图 5 光纤链路色散无关的量子时间同步方案原理图^[23]

2017 年,国家授时中心将经典双向时间传递思想与量子时间同步相结合,提出了双向量子时间同步方案^[24]。该方案的基本原理如图 6 所示,采用两个频率纠缠双光子源分别对向传输,利用事件计时器记录光子到达时间并通过非定域符合算法提取时间差,通过双向传输的时间差互减得到两地的钟差。由于双向传输抵消了链路延时波动对时间同

步精度的影响,故而该方案为此后量子时间同步的实际应用提供了重要的方案支撑。

2022 年,在双向量子时间同步方案的基础上,国家授时中心进一步提出了简化型双向量子时间同步方案^[25](方案基本原理如图 7 所示),只需要在基准站配置一台频率纠缠双光子源,节约了纠缠光源资源。

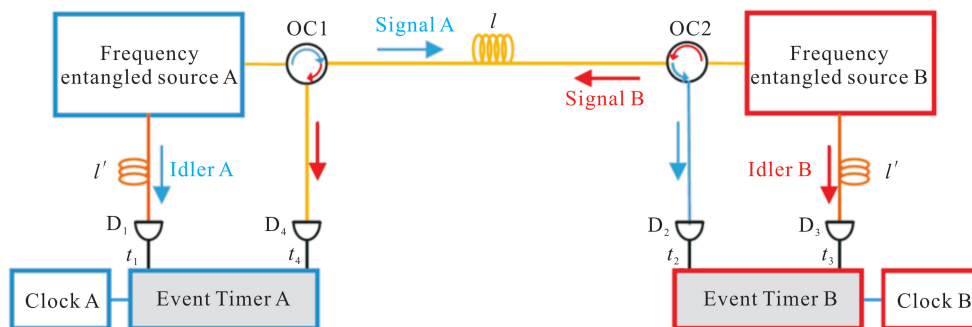


图 6 双向量子时间同步方案原理示意图^[24]

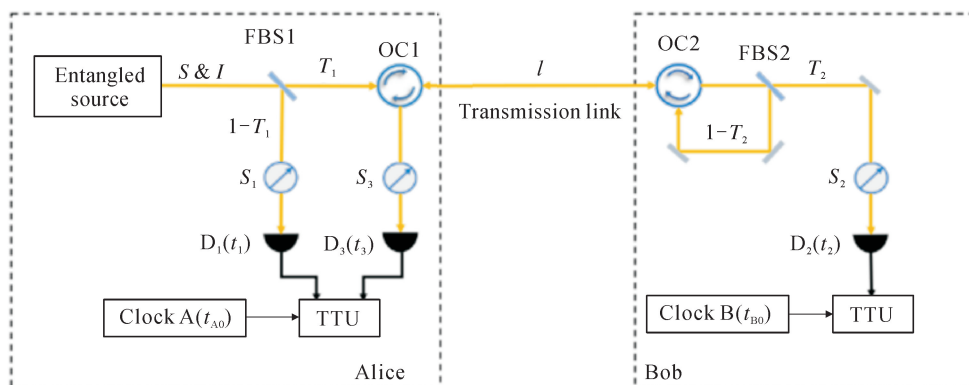


图 7 简化型双向量子时间同步方案原理示意图^[25]

2024 年,国家授时中心将频率纠缠双光子源的非定域性验证用于时间同步系统,提出了安全的量子时间同步方案^[26]。通过建立基于频率纠缠双光子的非定域性验证值(W)的安全阈值模型,并判断经过物理链路传输后的实际非定域性验证值(W')是否在安全阈值范围内(图 8 阴影区域),该方案预期可有效检测时间同步系统物理链路的拦截重发延时攻击。102 km 光纤链路的实验结果证实,即便小至 25 ps 的恶意延迟也能被成功识别(结果如图 8 所示)。这项研究充分展示了量子时间同步系统为各关键分布式系统提供可信时间基准的巨大潜力。

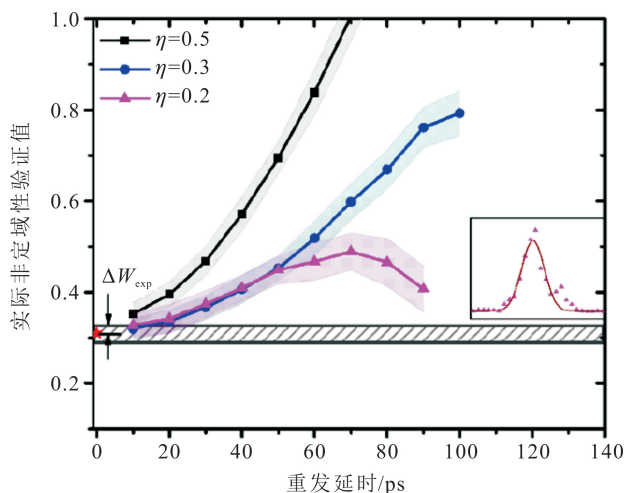


图 8 基于非定域性验证的安全量子时间同步验证结果^[26]

3 量子时间同步演示验证及原型系统研制

伴随量子时间同步方案的提出,相关的演示验证也在同步开展。

2016 年,基于自主研制的频率正关联纠缠双光

子源,国家授时中心率先将美国陆军研究实验室 2004 年提出的基于纠缠双光子 HOM 干涉的量子时间同步^[27]从概念转化为技术(实验装置及结果如图 9 所示),国际首次实现 4 km 光纤上亚皮秒级量子时间同步实验演示^[28],同步稳定度 440 fs @ 16 000 s,揭示了量子时间同步的高精度潜力。

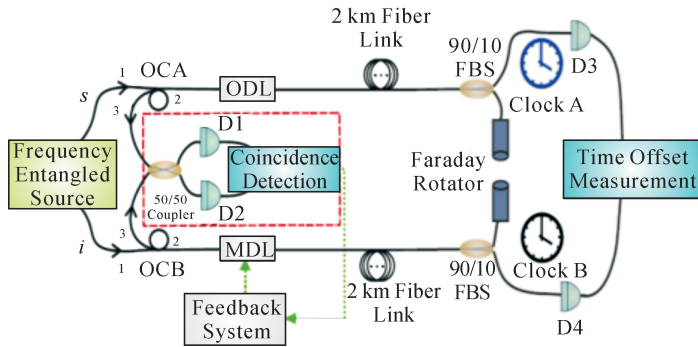


图 9 基于 HOM 干涉的 4 km 量子时间同步实验装置及结果图^[28]

2019 年在量化分析了影响基于 HOM 干涉的量子时间同步系统准确度和稳定度的物理机制基础上,进而将 6 km 光纤上同步稳定度提高到 60 fs @ 25 600 s^[29](结果如图 10 所示),为提高同步精度提供了指导依据。

2021 年,针对长距离光纤 HOM 干涉测量难的问题,提出分段光纤传输方案(如图 11 所示),解决了宽带频率纠缠光源条件下,长距离光纤时延抖动大导致的 HOM 干涉测量难题,20 km 光纤同步稳定度达到 74 fs@48 000 s^[30],接近系统干涉锁定极限,为更远距离、更高精度的分布式量子时间同步应用奠定基础。

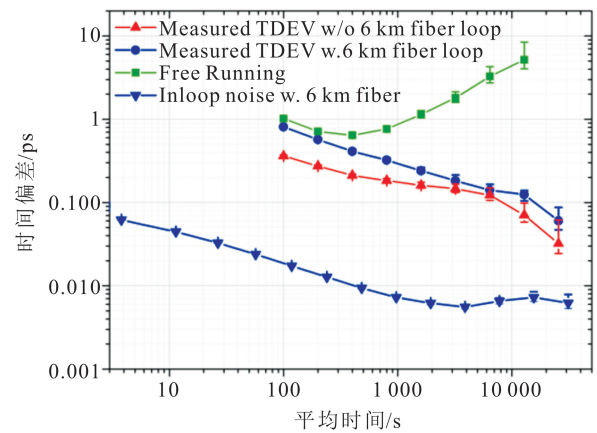
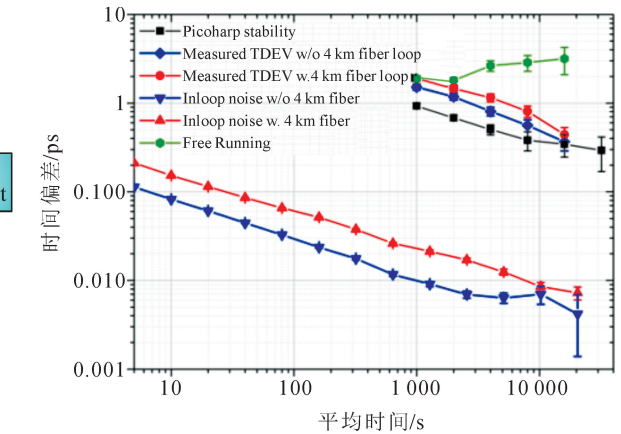


图 10 基于 HOM 干涉的 6 km 光纤量子时间同步结果^[29]

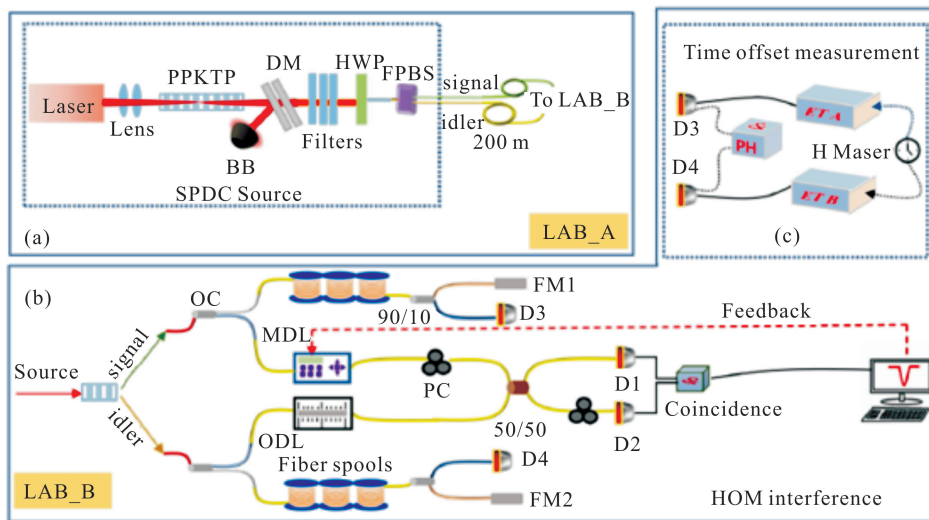


图 11 基于分段光纤传输方案的量子时间同步实验装置图^[30]

双向量子时间同步由于纠缠光子信号沿相同路径相向传输,有效抵消了路径引入的时延误差,且无需平衡锁定,是与现有通信光纤网兼容性好且精度更高的量子时间同步方案。

2019 年,国家授时中心基于创新提出的双向量子时间同步方案及频率纠缠光源(原理验证实验平台实物照片如图 12 所示),首次在 20 km 实验室光纤上演示了双向量子时间同步^[31],同步稳定度达到 45 fs@40 960 s,展现了双向量子时间同步在长距离、高精度时间同步系统的应用潜力。

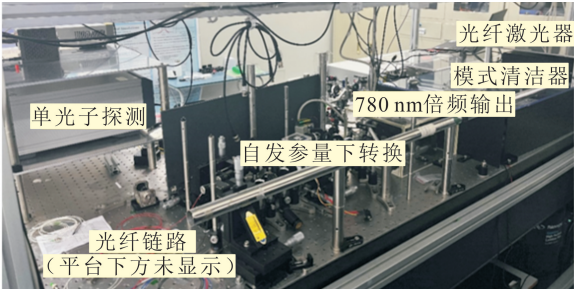


图 12 双向量子时间同步原理验证实验平台实物图(平台尺寸:1.5 m×2.4 m)

2020 年,针对原有非定域符合算法数据利用率低的问题,提出基于直接互相关的非定域符合优化算法,将纠缠双光子的非定域时差测量分辨率从纳秒提升至皮秒,解决了量子时间同步技术实地应用的探测问题^[32]。在此基础上,国家授时中心进一步优化频率纠缠源的频谱特性,建立双向量子时间同步准确度评估模型^[33](系统组成如图 13 所示),成功

演示了 50 km 光纤距离的双向量子时间同步演示,同步稳定度达到 54.6 fs@57 300 s,准确度 1.3 ps±36.6 ps(见表 1),其中主要误差来源于系统评估中较大的色散展宽。上述结果也为实现又准又稳的城域量子时间同步提供技术基础。

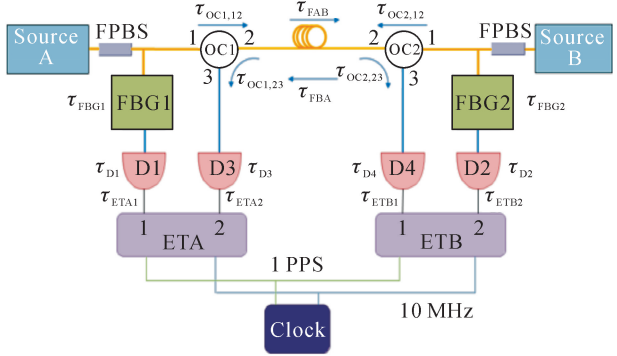


图 13 双向量子时间同步系统各参数评估示意图^[33]

表 1 50 km 光纤量子时间同步系统时间差实测值与评估值

时间差	平均值/ps	标准差/ps
实测值	1 895.0	3.0
评估值	1 896.3	36.5

2023 年,在国家授时中心临潼本部到骊山天文观测站之间的 2 km 近水平自由空间链路(损耗、湍流强度等效于地面到中低轨卫星)和 7 km 实地光纤混合链路(如图 14 所示)上实现亚皮秒级时间同步^[34],验证了高精度的量子时间同步在天地一体时间同步网络中的应用优势。

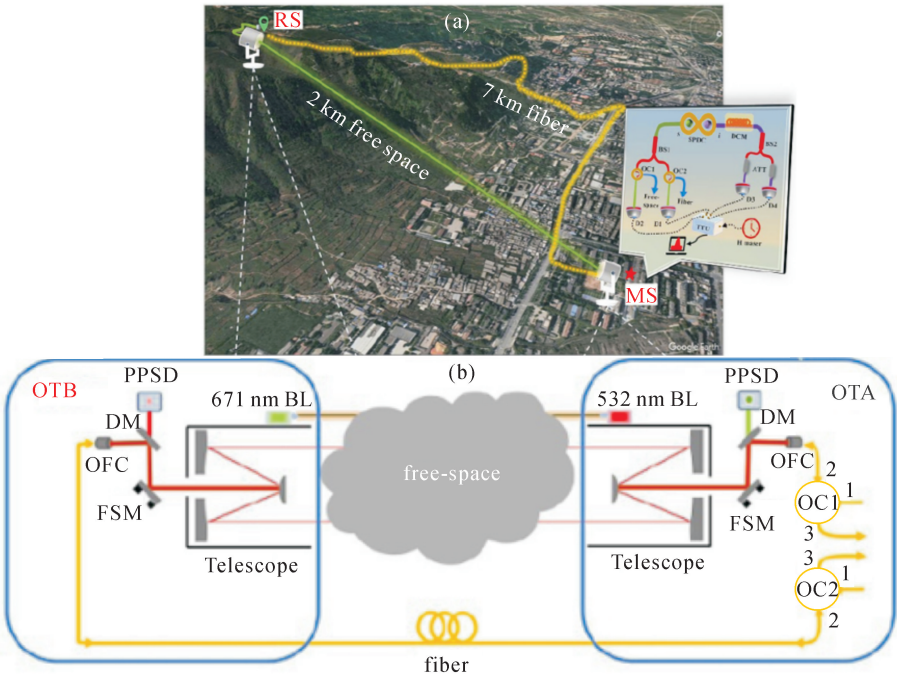


图 14 临潼本部到骊山天文观测站的自由空间和实地光纤混合链路^[34]

与此同时,国家授时中心持续推动量子时间同步系统的实用化进程,成功研制一键开机的双向量子时间同步原型系统^[35](实物照片如图 15 所示),将频率纠缠双光子源单元、单光子探测及打标单元、参考时钟单元等均集成于一个标准 4U 机箱内,通过采用开环光纤微波频率传输技术,配合微跃计进行时间差的动态调控,实现了亚皮秒级的双向量子时间同步($0.69 \text{ ps}@10\,000 \text{ s}$)。目前该系统已成功应用于分布式雷达地面静态组网验证测试,迈出量子时间同步系统实用化的第一步。

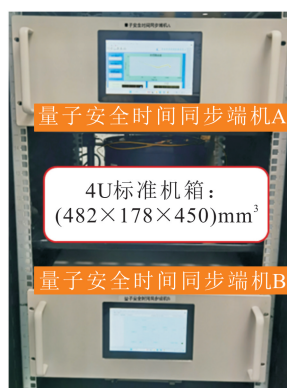


图 15 自主研制的量子时间同步端机

2024 年,双向量子时间同步演示国际首次拓展到了实地百千米光纤距离(实地传输链路见图 16),传输总损耗 38 dB,光纤串扰导致噪声光子比有效光子高一个量级的恶劣条件下,实现亚皮秒级的时间同步稳定度^[36],展示了高精度量子时间同步技术应用于大损耗、强噪声条件下的鲁棒性;为在建的“十三五”国家重大科技基础设施“高精度地基授时系统”——光纤授时系统提供量子增强的高精度、安全时间同步解决方案。

鉴于双向量子时间同步的重要应用价值,国际上各研究机构也开展一系列的演示验证研究。新加坡国立大学将双向量子时间同步协议应用于独立钟量子时间同步演示中^[37];美国空军研究实验室的研究团队在 1.6 km 自由空间分析并验证了双向量子时间同步实现皮秒级星地时间同步的可行性^[38],验证其在天地一体量子网络中的潜在应用价值;德国耶拿大学演示了数十个关联光子情况下实现独立钟间皮秒级时间同步,并在 1.7 km 城市光纤链路开展实验验证^[39],为后续融入多种量子通信网络,实现基于纠缠的安全授时奠定基础。

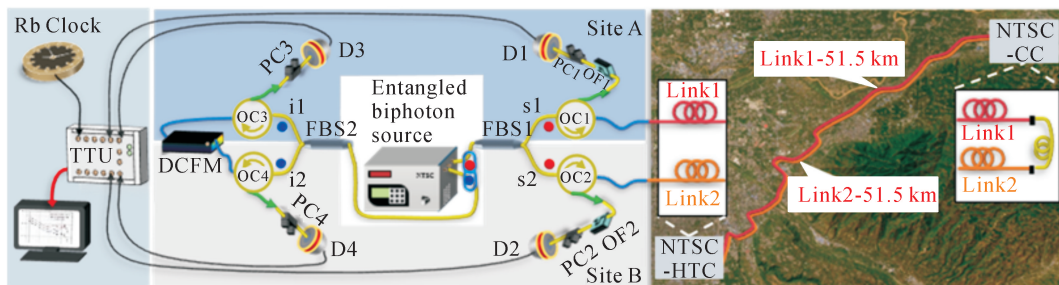


图 16 实地 103 km 光纤链路量子时间同步演示实验示意图^[36]

4 结语

量子时间同步利用频率纠缠双光子源的内禀强时间关联及不可克隆属性,为高精度安全时间同步提供变革性解决方案,面向实际应用,仍需方案创新和技术突破。

国家授时中心系统研究量子特性与经典技术之间的物理等效机制,经十余年攻关,提出量子增强双向时间同步协议,攻克技术应用瓶颈,实现国际首个 10 fs 级精度量子时间同步验证,推进了量子时间同步从基础理论突破、核心器件研制到多场景实地应用验证的全链条创新体系形成,充分展现了量子时间同步的高精度和安全应用优势。

面向国家授时体系发展需求,构建量子增强的高精度安全时间同步新体系是重要发展方向。未来,将聚焦量子安全时间同步长距离组网应用,以提升现有授时系统精度及安全性。随着集成光子学与低噪声探测技术的发展,量子时间同步有望与经典光纤授时网络深度融合,支撑高精度地基授时系统升级,并在国防、通信等关键领域拓展应用。

参考文献:

- [1] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization [J]. Nature, 2001, 412(6845): 417.
- [2] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L, et al.

- Clock synchronization with dispersion cancellation[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(11):117902.
- [3] VALENCIA A, SCARCELLI G, SHIH Y H. Distant clock synchronization using entangled photon pairs[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(12):2635.
- [4] 张羽, 权润爱, 白云, 等. 超短脉冲抽运下频率一致纠缠光源量子特性实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(14):201-206.
- [5] 王盟盟, 权润爱, 邵朝阳, 等. 通信波长频率一致纠缠光源的频谱测量[J]. *物理学报*, 2014, 63(19):134-139.
- [6] QUAN R A, WANG M M, HOU F Y, et al. Characterization of frequency entanglement under extended phase-matching conditions[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2015, 118:431.
- [7] ZHAI Y W, DONG R F, LI B H, et al. Frequency entanglement characterization of short-pulse pumped SPDC biphoton source with a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2017, 50(12):125502.
- [8] 邵朝阳, 侯飞雁, 王盟盟, 等. 光纤激光经过模清洁器后的强度噪声分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(19):115-120.
- [9] HOU F Y, DONG R F, XIANG X, et al. An efficient source of frequency anti-correlated entanglement at telecom wavelength[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2016, 122:128.
- [10] 张越, 侯飞雁, 刘涛, 等. 基于 II 类周期极化铌酸锂波导的通信波段小型化频率纠缠源产生及其量子特性测量[J]. *物理学报*, 2018, 67(14):171-178.
- [11] LIU Y T, XING J J, XIA Z G, et al. All-fiber telecom band energy-time entangled biphoton source [J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(3):132-136.
- [12] LIU Y T, HONG H B, XIANG X, et al. Wavelength stabilization of entangled biphotons using dynamic temperature compensation for quantum interference applications[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2024, 7(12):240-305.
- [13] AUREA Technology. TPS_1550_TYPE_II quantum photon source[Z]. Besancon: Aurea Technology, 2020.
- [14] OZ Optics. DTS0199[EB/OL]. [2025-09-11]. https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0199.pdf.
- [15] 鲲腾量子. 高质量偏振纠缠光源 [EB/OL]. [2025-09-11]. <http://www.iqanta.com.cn/productinfo.php?cid=3&id=1>.
- [16] LI B H, HOU F Y, QUAN R A, et al. Nonlocality test of energy-time entanglement via nonlocal dispersion cancellation with nonlocal detection[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(5):053803.
- [17] XIANG X, DONG R F, LI B H, et al. Quantification of nonlocal dispersion cancellation for finite frequency entanglement[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12):17697.
- [18] XIANG X, DONG R F, QUAN R A, et al. Hybrid frequency-time spectrograph for the spectral measurement of the two-photon state[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11):2993.
- [19] XIANG X, QUAN R A, LIU Y T, et al. Widely flexible and finely adjustable nonlocal dispersion cancellation with wavelength tuning[J]. *Optics Express*, 2022, 30(25):44487.
- [20] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L, et al. Conveyor-belt clock synchronization[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(4):043808.
- [21] WANG J C, TIAN Z H, JING J L, et al. Influence of relativistic effects on satellite-based clock synchronization[J]. *Physical Review D*, 2016, 93(12):065008.
- [22] ZHANG J F, LONG G L, DENG Z W, et al. Nuclear magnetic resonance implementation of a quantum clock synchronization algorithm[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(6):062322.
- [23] HOU F Y, DONG R F, QUAN R A, et al. Dispersion-free quantum clock synchronization via fiber link[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(9):1489-1494.
- [24] HOU F Y, DONG R F, LIU T, et al. Quantum-enhanced two-way time transfer[C]//Quantum Information and Measurement Optica Publishing Group, 2017:QF3A. 4.
- [25] XIA Z G, XIANG X, HONG H B, et al. Comparative analysis of quantum two-way time transfer and quantum round-trip time transfer in consistent spatiotemporal setting[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20):35771.
- [26] QUAN R A, HONG H B, XIANG X, et al. Enhancing quantum time transfer security: detecting intercept-resend attacks with energy-time entanglement[J]. *New Journal of Physics*, 2024, 26(9):093012.
- [27] BAHDER T B, GOLDING W M. Clock synchronization based on second-order quantum coherence of entangled photons[C]//Quantum Communication, Measurement and Computing. Melville: AIP Proceedings, 2004, 734(1):395.
- [28] QUAN R A, ZHAI Y W, WANG M M, et al. Demonstration of quantum synchronization based on second-order quantum coherence of entangled photons[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):30453.
- [29] QUAN R A, DONG R F, ZHAI Y W, et al. Simulation and realization of a second-order quantum interference-based quantum clock synchronization at the femtose-

- cond level[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3):614.
- [30] LIU Y T, QUAN R A, XIANG X, et al. Quantum clock synchronization over 20-km multiple segmented fibers with frequency-correlated photon pairs and HOM interference[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(14):144003.
- [31] HOU F Y, QUAN R A, DONG R F, et al. Fiber-optic two-way quantum time transfer with frequency-entangled pulses[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(3):023849.
- [32] QUAN R A, DONG R F, XIANG X, et al. High-precision nonlocal temporal correlation identification of entangled photon pairs for quantum clock synchronization[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(12):123109.
- [33] HONG H B, QUAN R A, XIANG X, et al. Demonstration of 50 km fiber-optic two-way quantum clock synchronization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(12):3723-3728.
- [34] XIANG X, SHI B K, QUAN R A, et al. Quantum two-way time transfer over a hybrid free-space and fiber link[J]. *Quantum Science and Technology*, 2023, 8(4):045017.
- [35] HONG H B, QUAN R A, XIANG X, et al. Quantum two-way time transfer over a 103 km urban fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(8):1479-1485.
- [36] SHI B K, XIANG X, CAO M T, et al. Development of prototype system for quantum two-way clock synchronization [J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(10):104002.
- [37] LEE J, SHEN L, CERÈ A, et al. Symmetrical clock synchronization with time-correlated photon pairs[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(10):101102.
- [38] LAFLER R, EICKHOFF M L, NEWHEY S C. Two-way quantum time transfer; a method for daytime space-Earth links[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 22:024012.
- [39] SPIESS C, TÖPFER S, SHARMA S, et al. Clock synchronization with correlated photons [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(5):054082.