

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.04.01

双向量子时间同步研究进展

董瑞芳^{1,2}, 项晓¹, 权润爱¹, 洪辉博^{1,2}, 师冰轲^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 张首刚^{1,2*}

(1. 中国科学院国家授时中心, 中国科学院时间基准及应用重点实验室, 陕西 西安 710600;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 量子时间同步是量子技术与时间频率技术相融合的交叉前沿技术。利用频率纠缠双光子源的内禀非定域时间关联性, 双向量子时间同步不仅能将现有时间同步精度提高1~2个数量级, 同时具备内在安全性优势, 为大幅提升授时精度和保障授时安全性提供了新一代变革性技术方案。重点介绍了中国科学院国家授时中心在双向量子时间同步领域取得的研究进展: 建立了双向量子时间同步准确度评估模型; 在国际上首个报道了10 fs级超高精度量子时间同步实验演示案例; 先后在2 km自由空间+7 km实地光纤混合链路、百km实地光纤链路以及250 km超长距离光纤链路上成功实现了亚皮秒级时间传递演示, 充分验证了该技术在大损耗、强噪声环境中的高精度同步应用能力; 同时, 通过实验研究证实了量子时间传递系统的安全性优势。这些研究成果不仅标志着我国在长距离光纤量子安全时间传递领域取得了重要进展, 更为未来构建大规模量子网络提供了高兼容性的时间同步解决方案。

关键词: 频率纠缠双光子源; 双向量子时间同步; 高精度; 安全性; 授时技术

中图分类号: TB939; O431.2; TH714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 04-0001-11

Research progress on two-way quantum time synchronization

DONG Ruifang^{1,2}, XIANG Xiao¹, QUAN Run'ai¹, HONG Huibo^{1,2},SHI Bingke^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, ZHANG Shougang^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Time Reference and Applications, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Quantum time synchronization is an interdisciplinary frontier technology that integrates quantum technology with time-frequency technology. By leveraging the intrinsic nonlocal time correlation of frequency-entangled biphoton sources, two-way quantum time synchronization not only improves the precision of existing time synchronization by 1~2 orders of magnitude but also possesses inherent security advantages. This provides a new generation of transformative technical solutions for significantly enhancing time service precision and ensuring time service security. This paper focuses on the research progress achieved by the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences in the field of two-way quantum time synchronization: a model for evaluating the accuracy of two-way quantum time synchronization has been established; the first international demonstration of 10-femtosecond-level ultra-high-precision quantum time synchronization was reported; successful demonstrations of sub-picosecond-level time transfer were achieved on a 2 km

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(12033007, 61875205, 12103058, 61801458); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SW-SLH007); 中国科学院青年创新促进会项目(2021408, 2022413)

引用格式: 董瑞芳, 项晓, 权润爱, 等. 双向量子时间同步研究进展[J]. 计测技术, 2025, 45(4): 1-11.

Citation: DONG R F, XIANG X, QUAN R A, et al. Research progress on two-way quantum time synchronization[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(4): 1-11.



free-space + 7 km field fiber hybrid link, hundred-kilometer field fiber link, and a 250 km ultra-long-distance fiber link, fully validating the high-precision synchronization ability of this technology under high-loss and strong-noise environmental conditions; meanwhile, the security advantages of the quantum time transfer system have been experimentally verified. These research achievements not only mark significant progress in the field of long-distance fiber-based quantum secure time transfer in China but also provide a highly compatible time synchronization solution for the future construction of large-scale quantum networks.

Key words: frequency-entangled biphoton source; two-way quantum time synchronization; high-precision; security; time service technology

0 引言

时间(频率)是当前测量精度最高、应用范围最广的基本物理量。授时技术为在广域范围内建立统一的时间频率基准奠定了基础^[1-5],使得时间频率的应用深入到科学研究、国民经济和国防建设等各个领域,并日益发挥着战略性、决定性作用^[6-10]。

随着光纤通信网络的广泛普及,光纤授时技术取得了飞速发展,已成为目前精度最高的地基授时手段。在千km级实地光纤链路上,时间传递误差范围已优于100 ps,长期稳定度达几ps^[11-15]。然而,由于时间信号的调制/解调噪声、光纤散射及色散等因素,光纤时间传递的准确度和稳定度的进一步提高受到限制。为满足皮秒乃至更高精度的时间同步需求,亟须发展新型高精度时间同步技术。另一方面,授时系统的安全性直接关系到国家安全和经济命脉。一旦授时系统遭受欺骗干扰而导致时间基准错误,依赖统一时间基准的国防系统、通信网络、金融市场、电力能源、导航定位等关键领域将面临瘫痪的重大风险^[16-18]。目前,主要采用时间数据加密技术来防止数据层的欺骗干扰,但其安全性依赖于计算复杂度。在物理层,不仅需要确保双向传递及最短延迟,还要求定时脉冲具备发送随机性和测量强相关性^[19],这是现有时间同步技术都无法满足的必要条件。因此,亟须发展新型安全同步技术。

21世纪初,量子时间同步技术应运而生。该技术利用频率纠缠双光子源的内禀时间关联特性以及高灵敏度的量子符合探测方法,不仅可以突破经典散粒噪声测量极限,还可有效克服经典光

纤时间同步方案中调制/解调噪声和探测灵敏度不足等问题,从而将现有时间同步精度提高至少1个量级^[20-21]。此外,量子脉冲的频率纠缠特性可以消除传输介质色散对同步精度的不利影响^[22-23]。更为重要的是,频率纠缠双光子所具有的量子特性——单光子传输的不定时性和双光子的强时间关联性^[24],恰好满足了物理层传递安全性的必要条件,结合量子保密通讯技术,量子时间同步能够实现安全可靠的时间同步^[25-26]。随着技术方案的不断优化和成熟,高精度且安全的量子时间同步技术有望在空间导航、定位及其他关键领域中得到广泛应用。

1 双向量子时间同步研究意义及现状

2017年,中国科学院国家授时中心研究团队提出了双向量子时间同步协议^[27]。相比其他量子时间同步协议,该协议不需要任何平衡锁定机制,能够有效抵消传递路径引入的时延误差,从而实现基于到达时间测量的最高精度的时间同步。此外,该协议充分利用了双向传递的特点以及频率纠缠双光子具有的量子特性——单光子传输的不定时性和双光子的强时间关联性,可以有效规避时间同步系统中可能存在的对称时延攻击,并检测拦截-重发等非对称时延攻击,从而显著提升时间同步系统的安全性。基于双向量子时间同步协议,新加坡国立大学研究团队成功实现了在100 s内达到51 ps同步稳定度的独立频率基准的时钟同步^[28]。同时,该团队还分析了双向量子时间同步方案抵御对称信道时延攻击的安全优势,进一步证明了量子时间同步技术的实用性和安全性^[29]。鉴于双向量子时间同步协议高精度和安全性优势,

该方案被美国航空航天局写入科学研究专题白皮书^[30],美国空军研究实验室将其作为建立量子时钟网络以及在GPS系统失效条件下提供高精度安全时间同步信息的关键技术手段^[31-33],并通过理论建模分析了在高损耗和高噪声信道条件下实现皮秒级授时精度的可行性,为天-地量子网络在全球定位系统失效环境中提供高精度安全授时奠定了基础^[34]。2024年,《中国科学基金》刊登了由孙和平、杨元喜、叶朝晖等人联袂撰写的《精密(量子)测量时代下时空基准研究中的关键科学问题和核心技术》^[35],其中,突破量子时间传递及同步技术被列为未来5~10年时间基准传递体系的主要发展目标,进一步凸显了该技术在时空基准研究中的战略地位。

面向量子时间同步在长距离高精度实地应用中的需求,中国科学院国家授时中心研究团队基于双向量子时间同步方案,开展了一系列具有重要意义的演示验证实验研究。这些研究成果标志着我国在长距离光纤量子安全时间传递领域取得了重要进展,同时也为未来构建大规模量子网络提供了一种兼容性强、实用性高的时间同步解决方案。

2 国家授时中心基于双向量子时间同步的实验研究进展

国家授时中心研究团队在量子时间同步领域取得了突破性进展,并率先在国内开展了基于频率纠缠双光子源的创新性研究。该团队于2017年提出了具有前瞻性的双向量子时间同步方案,并成功构建了相应的量子理论模型^[27]。图1展示了

基于光纤链路的双向量子时间传递原理示意图(传输路径不仅限于光纤介质,也可拓展至自由空间传输)。在具体实施方案中,待同步的2台原子钟分别部署于A、B两地。每个站点均配备频率纠缠双光子源、高精度事件计时器(Time Tagger Unit, TTU)及2台单光子探测器等核心设备。频率纠缠双光子源可产生1对光子,每1个光子(称为信号光子)都有和其唯一对应的孪生光子(称为闲置光子),这2个光子的频谱分布特性具有强关联性。基于频率与时间互为倒数的物理特性,经过传输后的双光子对在到达时间上也呈现出极强的相关性,其时间关联宽度可达到惊人的百飞秒乃至几飞秒量级。这一特性使得纠缠光子对能够作为精确的“天然时间戳”信号,为实现高精度时间信息比对提供可靠保障。光纤环形器(OC1和OC2)和长度 l 的光纤把A、B两地的时间戳信号连接起来,构成双向回路。频率纠缠双光子源A产生的信号光子经光纤链路传输至B地,并由单光子探测器D2探测,闲置光子在本地经过色散补偿介质后由单光子探测器D1探测。类似地,频率纠缠双光子源B产生的信号光子经光纤链路传输至A地,并由单光子探测器D4探测,闲置光子在本地经过色散补偿介质后由单光子探测器D3探测。两地的事件计时器由本地原子钟提供时间频率参考,并用于对各探测器的光子到达时间进行记录,形成时间序列 $\{t_1^{(j)}\}$ 、 $\{t_2^{(j)}\}$ 、 $\{t_3^{(j)}\}$ 、 $\{t_4^{(j)}\}$,其中, $j=1, 2, \dots, N$, N 为测量时间内达到探测器的光子对数。基于记录的时间序列和非定域符合测量^[36],可得到经过纠缠双光子源A和B单向传输后的到达时间差

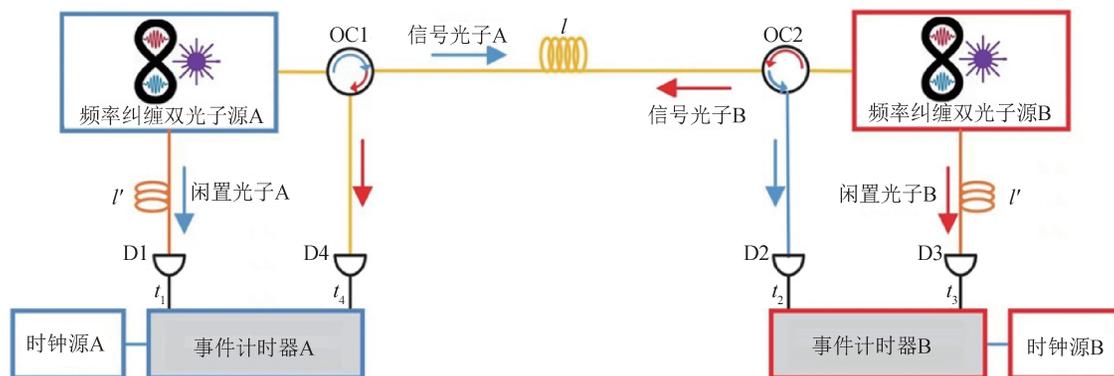


图1 基于光纤链路的双向量子时间传递原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-way quantum time synchronization protocol based on optical fiber link

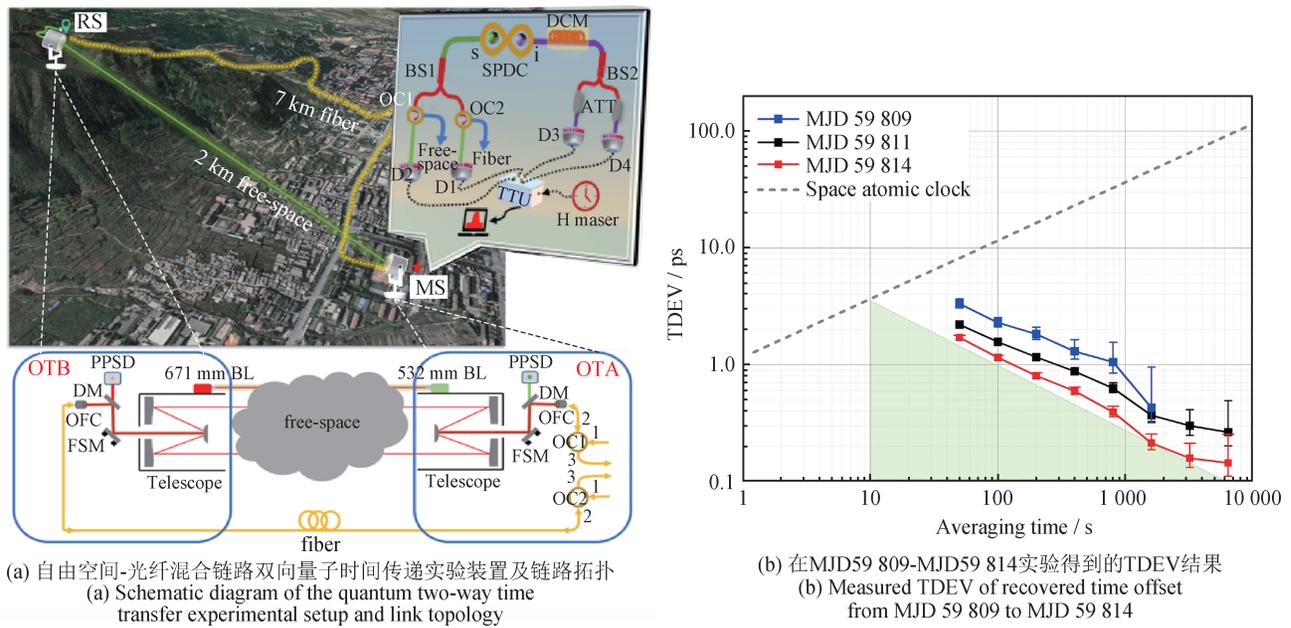
$t_2 - t_1$ 、 $t_4 - t_3$ 。从经典双向时间比对模型出发,假设A、B两地的钟差为 $t_0 = t_B^0 - t_A^0$,双向链路完全对称,则 $t_2 - t_1 = t_0 + \tau_l$, $t_4 - t_3 = -t_0 + \tau_l$,其中, τ_l 为信号光子在传递光纤里的时延。将得到的时间差 $t_2 - t_1$ 和 $t_4 - t_3$ 相减,得到两地的钟差为 $t_0 = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)]/2$ 。

双向量子时间同步协议不需要任何平衡锁定,有效抵消了传递路径引入的时延误差。量子理论模型表明:该协议理论上可在100 km光纤传输距离下实现优于亚皮秒量级的同步精度^[27],不仅展现出卓越的高精度性能,还具备抵御物理链路对称延时攻击的安全特性,因而备受关注。2019年,研究团队在20 km实验室环境中成功演示了双向量子时间同步协议能够实现45 fs@40 000 s的同步稳定度,是迄今报道的最高稳定度的量子时间同步结果^[37]。在非定域性验证及应用方面,研究团队首次在长距离光纤上演示了基于非定域色散消除效应的连续变量非定域性验证,并建立了频率纠缠双光子源关联特性影响非定域色散消除效应的精确量化模型,为克服纠缠损耗、实现安全量子时间同步奠定了理论基础^[38]。此外,研究团队还构建了双向量子时间同步准确度评估模型,深入分析了纠缠源的频谱一致性对同步准确度和稳定度的影响,在50 km光纤上实现了55 fs的同步稳定度和 (1.3 ± 36.6) ps的偏差范围,验证了城域量子时间同步的准确性和稳定性^[39]。为进一步提升系统性能,研究团队提出将双向量子时间同步与频率传递结合的方案,解决了同步精度受本地时钟参考限制的问题,基于该方案,研究团队实现了7 km实地光纤链路的铷钟与氢钟同步,将铷钟的输出稳定度从32 ps@30 s提升到1.95 ps@30 s^[40]。在自由空间量子时间传递方面,研究团队成功完成了2 km自由空间链路上双向量子时间传递演示,在强大气湍流和高达30 dB损耗的条件下,仍能实现144 fs的稳定度,展示了量子时间同步在天地一体化光纤链路中的应用潜力^[41]。面对光纤链路环境复杂、损耗大等挑战,研究团队首次完成了百km级实地光纤双向量子时间传递演示,在损耗超过38 dB、多业务并行的103 km通信光纤上实现了0.28 ps的稳定度^[42];深入研究了光纤双向量子时

间同步对光纤后向散射的鲁棒性,将光纤传递距离扩展至250 km,可容忍损耗达到55 dB^[43];基于非定域色散消除的量子非定域性量化模型,研究团队提出并实验验证了可有效拦截-重发时延攻击的安全量子时间同步方案^[44],解决了量子时间同步的安全性认证问题。这些成果标志着我国在长距离光纤量子安全时间传递领域取得了重要进展。此外,研究团队围绕实用化量子时间同步开展核心技术攻关,成功研制出轻量化、高稳定性的通信波段全光纤能量-时间纠缠双光子源^[45],并将其集成应用于自主研发的一键开机式实用量子时间同步终端系统。下文将主要介绍团队在2 km自由空间+7 km实地光纤混合链路、百km实地光纤链路和250 km超长距离光纤链路上实现的亚皮秒级时间传递演示以及抗拦截-重发时延攻击的安全量子时间同步方案验证等突破性成果。

2.1 2 km 自由空间+7 km 实地光纤混合链路上双向量子时间传递实验

自由空间-光纤混合链路上的双向量子时间传递实验装置及部署情况如图2(a)所示,该混合链路包含2 km自由空间(2 km-free space)和7 km实地光纤(7 km-field fiber)。双向量子时间传递系统的主站(Maser Station, MS)和远程站(Remote Station, RS)分别位于中国科学院国家授时中心园区(Central Campus of National Time Service Center, NTSC-CC)临潼和骊山天文台。2个站点均配备了180 mm口径的光学终端(Optical Terminal, OTA&OTB),用于建立自由空间双向光链路。此外,2个站点之间部署了通信光纤,实测链路损耗为2.5 dB。待同步的2个虚拟站点均部署在MS,并共享一个基于自发参量下转换(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC)产生的频率纠缠双光子源、原子钟(H maser)、TTU及用于补偿光纤色散的色散补偿模块(Dispersion Compensation Module, DCM)。这些设备为2个虚拟站点提供共享的时间基准和测量支持。通过2个光学环形器(OC1&OC2)的协同工作,系统实现了自由空间上行(对应光纤下行)和自由空间下行(对应光纤上行)光子的双向传输,最终所有信号均返回MS进行精确的时延测量与分析。



注：简化儒略日(Modified Julian Day, MJD)。

图2 双向量子时间传递实验装置、链路拓扑图及实验结果

Fig.2 Experimental setup, link topology diagram, and experimental results for bidirectional quantum time transfer

在实验过程中，通过调整 OTA&OTB 中的光学跟瞄装置，可以在一定程度上优化自由空间信道损耗，从而提升有效光子计数。经优化光学跟瞄，上行链路和下行链路平均损耗分别降低至 23 dB 和 27 dB。采用动态非定域色散消除技术^[46]优化双光子符合宽度，图 2(b) 中蓝色、黑色和红色点线分别展示了 3 个夜晚的实验结果。在最优条件下，红色点线所示的时间传递稳定度 (Time Deviation, TDEV) 达到 1.71 ps@50 s, 144 fs@6 400 s。经过 10 s 平均时间后，时间传递稳定度优于现有的空间微波钟^[47-48]，完全满足空间微波钟之间时间比对与同步需求。该工作展示了双向量子时间传递系统在面临大链路衰减和强大气湍流等极端条件时，

仍能够保持稳定运行的能力，为量子增强的时间传递方案在天地一体化光链路中的应用可行性提供了有力证明。

2.2 百 km 实地光纤链路上双向量子时间同步实验

百 km 实地光纤链路的双向量子时间同步实验装置及链路拓扑如图 3 所示。待同步的 2 个虚拟站点 (site A 与 site B) 均部署在国家授时中心航天城园区 (Hangtiancheng Campus of National Time Service Center, NTSC-HTC)，并共享一套完整的量子时间设备，包括频率纠缠双光子源 (Entangled biphoton source)、原子钟 (Rb Clock) 与 TTU。实地光纤链路总长 103 km，由国家授时中心 NTSC-CC 与 NTSC-HTC 之间连接的 2 条 51.5 km 实地光纤链路构成，

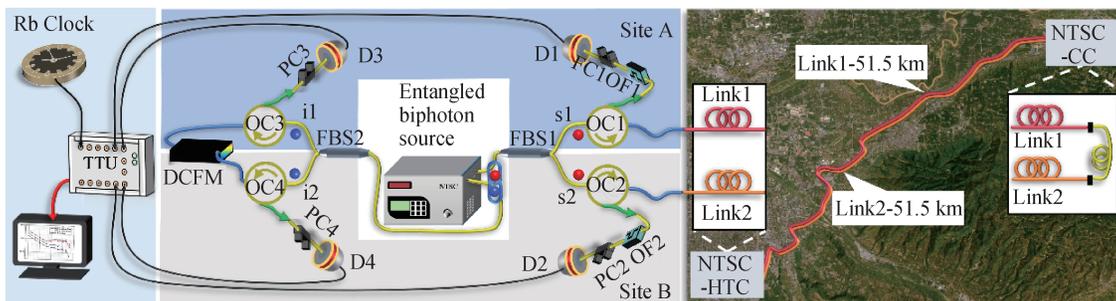


图3 基于百 km 实地光纤链路的双向量子时间同步实验装置及光纤链路拓扑图

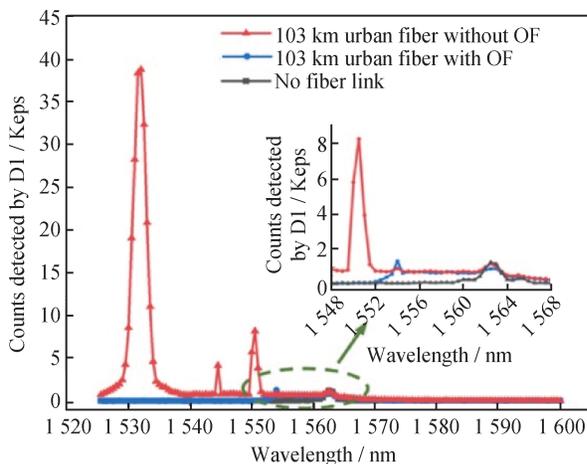
Fig.3 Experimental setup and link topology diagram of the two-way quantum time synchronization over the hundred-kilometer field fiber optic link

链路损耗为 29 dB。由于系统中色散补偿光纤模块 (Dispersion Compensation Fiber Module, DCFM)、器件 (包括偏振控制器 PC1-4、光纤环形器 OC1-4 等) 的衰减与单光子探测器的量子效率等贡献, 该系统的总损耗达 38 dB。

光纤链路所在光缆同时承载 1 550 nm 光频传递、微波频率传递、时间传递等多项光纤时频传递业务以及网络业务, 这不可避免地会对光纤中传递的信号光子产生串扰。这种串扰噪声不仅会淹没信号光子, 还会导致单光子探测系统达到饱和和状态。

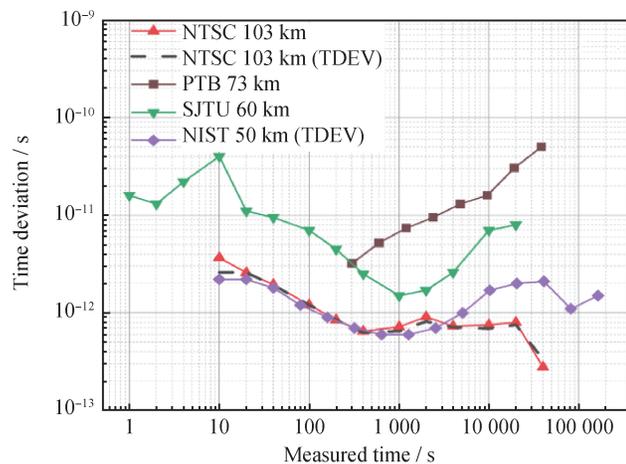
在本实验中, 首先对串扰噪声的光谱分布特性进行分析, 结果如图 4(a) 中红色曲线所示。分析表明: 串扰噪声主要来自光缆中其他光纤链路上连接的掺铒光纤放大器, 其噪声波段集中分布在 1 530 nm 附近。为了有效抑制串扰噪声, 在接收信号光子的单光子探测器前端插入通带为 $(1\ 560 \pm 6.5)$ nm 的光纤滤波器 (Optical Fiber Filter, OF), 从而显著

降低了噪声水平, 如图 4(a) 中蓝色曲线所示。为比较噪声滤除情况, 无光纤链路情况下的探测信号光子光谱分布特性如图 4(a) 中黑色曲线所示。此外, 实地光纤链路中存在由温度、应力等环境因素引入的扰动。在该条件下, 实现的时间同步稳定度为 $3.67\ \text{ps}@10\ \text{s}$ 、 $0.28\ \text{ps}@40\ 000\ \text{s}$, 如图 4(b) 中红色曲线所示。为了直观地比较量子时间同步相比经典时间同步方法的时间稳定度性能, 图 4(b) 中还列出了部分已被报道的同等光纤长度条件下经典时间传递稳定度结果, 包括 50^[49]、60^[50]、73 km^[51] 等的链路长度。通过对比可以发现, 双向量子时间传递系统在对称性和长期时间稳定度方面均表现出显著优势。同时, 实验还评估了时间同步的准确度指标, 得到的同步偏差为 $(1.3 \pm 13.6)\ \text{ps}$ 。该实验不仅为未来复杂环境中的时间同步实验提供了重要参考, 还验证了双向量子时间同步技术在长距离实地光纤网络中的实际应用潜能。



(a) 三种情况下, 用于接收探测信号光子的单光子探测器 D1 探测到的光子光谱分布

(a) Spectral distribution detected by single photon detector D1 receiving detection signal photons in three transmission cases



(b) 103 km 实地光纤上双向量子时间传递时间稳定度实验结果及其与同等链路长度下经典双向时间传递稳定度比较

(b) Comparisons of the time transfer stability in terms of TDEV of 103 km urban fiber with the classical TWTT systems of same urban fiber link distance

注: 中国科学院国家授时中心 (National Time Service Center, NTSC); 德国物理技术研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB); 上海交通大学 (Shanghai Jiao Tong University, SJTU); 美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST); 双向时间传递 (Two-Way Time Transfer, TWTT)。

图 4 光纤链路中串扰噪声的光谱分布特性

Fig.4 Spectral distribution characteristics of crosstalk noise in urban fiber optic links

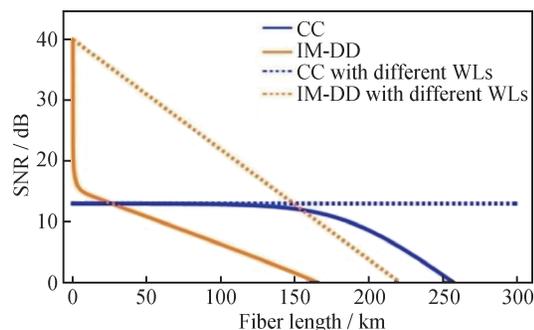
2.3 250 km 光纤链路上双向量子时间同步实验

在无中继放大的光纤时间同步系统中, 最长传输距离主要受限于接收端可容忍的最低探测信

噪比。根据 KREHLIK P 等人的研究, 在经典的基于强度调制-直接探测 (Intensity Modulation-Direct Detection, IM-DD) 方案的光纤时间传递系统中, 可

容忍的最低探测灵敏度为 -30 dBm^[52]。此外，为了抑制光纤中的受激布里渊散射噪声等非线性效应，传输的光载波信号功率通常需低于 10 mW。在双向系统中，当采用相同波长的光载波时，光纤损耗与固有的瑞利后向散射噪声共同作用，导致最长传输距离限制在 100 km左右。即使在采用双向异波长并加入光滤波器以抑制后向瑞利散射噪声的条件下，最长传输距离也无法突破 200 km，这一限制已成为实现无中继放大的超长跨距光纤时间传递的关键瓶颈。如图5所示，本实验通过理论分析对比了在后向瑞利散射噪声抑制前后，基于频率纠缠双光子源的量子时间传递和基于IM-DD的经典时间传递系统中的光信号信噪比随光纤长度的变化。

在量子时间传递系统中，传递光子的信噪比通过有效-偶然符合计数比(Coincidence-to-Accidental Rate)来表征。与经典时间传递信号的信噪比随传输距离显著下降的特点不同，量子时间传递对光纤后向散射噪声及光纤损耗表现出更好的鲁棒性。研究表明：当采用双向异波长且加入光滤波器以抑制后向瑞利散射噪声后，量子时间传递系统的光子信噪比几乎不受传输距离的限制。该研究团队进一步设计并开展了基于 250 km超长距离

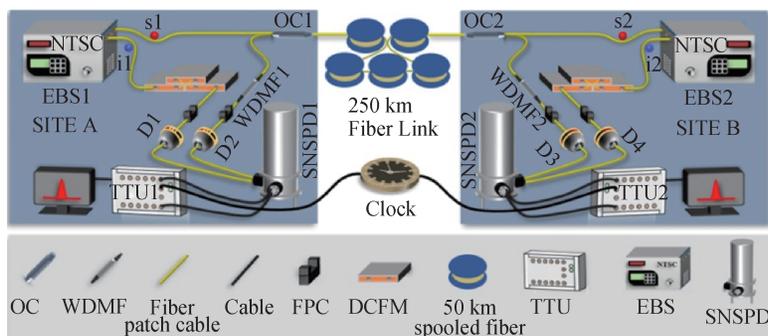


注：波长合集(Wavelengths, Wavelengths, Wavelengths)。

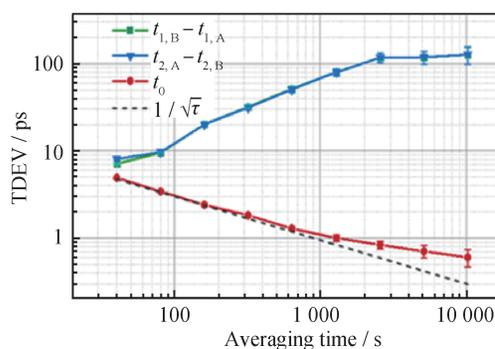
图5 通过双光子符合计数(Coincidence Count, CC)测量和IM-DD方法获得的信噪比随光纤长度变化示意图

Fig.5 Changing curves of signal-to-noise ratio versus fiber length by using two-photon CC measurement and IM-DD

光纤链路的双量子时间同步实验，实验装置示意图如图6(a)所示。在总损耗 55 dB的情况下，系统实现了 4.9 ps@ 40 s和 0.6 ps@ $10\ 240$ s的时间稳定度，测试结果如图6(b)所示。随着系统优化和超低损耗光纤技术的应用，双向量子时间同步的光纤传输距离预计可超过 300 km。该工作标志着长距离光纤量子时间传递研究取得了重要进展，其不仅展示了双向量子时间同步在长距离光纤中对抗反向散射噪声的优异性能，还为构建具有兼容性和潜在量子安全性的大规模量子网络提供了一种全新的解决方案。



(a) 基于 250 km光纤链路双向量子时间同步传递实验装置的示意图
(a) Schematic diagram of the experimental setup for quantum two-way quantum time transfer over 250 km-long fiber optic link



(b) 实验得到的TDEV结果
(b) Measured results of experimental TDEV

图6 250 km超长距离光纤链路的双量子时间同步实验

Fig.6 Two-way quantum time synchronization experiment of 250 km ultra long distance fiber optic link

2.4 抗拦截-重发延时攻击的安全量子时间同步方案验证

非定域色散消除特性是频率纠缠双光子源独有的非定域性。将频率纠缠双光子源的这一非定

域性与量子时间同步系统相结合，可在实现高精度时间同步的同时保障时间同步系统的安全性。本节介绍了一种基于频率纠缠双光子源的非定域性验证的安全量子时间同步方案，该方案可用于

检测系统中的拦截-重发延时攻击。通过建立理论模型，推导出了表征频率纠缠双光子源非定域性的参量(W)与拦截-重发延时攻击量之间的量化关系。该量化关系表明： W 会随着拦截-重发延时攻击量的增大而增大，因而可以作为检测和预警拦截-重发延时攻击的参量。在无攻击情况下，非定域参量的基准值为 W_0 ，当 $W > W_0$ ，表明系统遭受了延时攻击。实验中， W 的测量会受到系统相关的测量误差(ΔW)的影响，利用该误差值作为安全阈值，当 $W - W_0 > \Delta W$ 时，表明系统发生了延时攻击。

为了验证该方案的可行性，研究团队在102 km光纤链路上开展了实验研究，实验装置如图7(a)所示。拦截-重发延时攻击模块由2个光纤分束器(Fiber Beam Splitter, FBS)和1个电动光学延迟线组

成，如图中灰色框内所示，其中， η 为被拦截-重发的信号光子比例。无攻击条件下，频率纠缠双光子源发出的一对光子分别经过本地的色散补偿模块及102 km光纤传输后，其非定域参量值 $W_{\text{exp}} = 0.310$ ，测量误差为 $\Delta W_{\text{exp}} = 0.019$ ，据此建立安全阈值，如图7(b)中阴影部分所示。随后该团队分别研究了 η 为0.5、0.3、0.2情况下 W 随拦截-重发延时攻击量的变化关系，结果如图7(b)所示。实验结果表明：当拦截-重发延时攻击的延时量大于25 ps时，3种情况下测得的非定域性参量值均超出安全阈值范围，充分验证了本方案在检测拦截-重发延时攻击的可行性。此外，本方案还可以通过优化非定域色散消除及采用低抖动的单光子探测器来进一步提升检测性能。

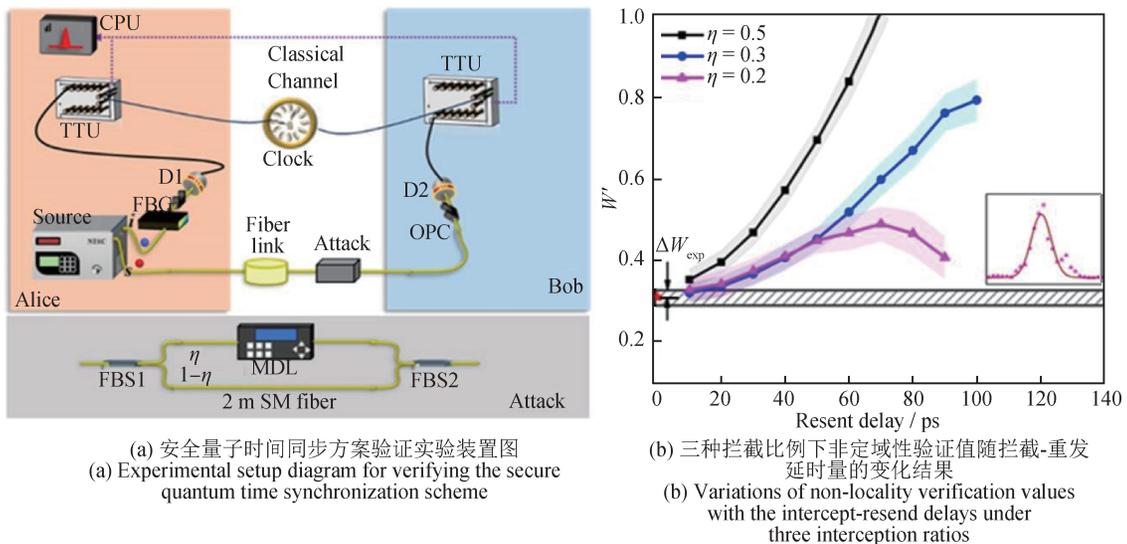


图7 102 km 光纤链路的抗拦截-重发延时攻击实验研究

Fig.7 Intercept-resend delay attack experiment of 102 km fiber optic link

3 结论

量子时间同步作为一种新兴的高精度、高安全性时间同步技术，正展现出重要的应用价值，并已引起国际社会的高度关注。国家授时中心的研究团队在国内率先开展了基于频率纠缠双光子源的量子时间同步研究，并取得了一系列的研究进展。自2017年提出双向量子时间同步方案并建立量子理论模型以来，我国在关键技术和实验验证方面不断取得进展。2022年至今，团队成功在

2 km 自由空间 + 7 km 实地光纤混合链路、百 km 实地光纤链路和 250 km 超长距离光纤链路上实现了亚皮秒级时间传递演示，并在 102 km 光纤链路上实验验证了抗拦截-重发延时攻击的安全量子时间同步方案，解决了安全性认证的关键问题。这些成果标志着我国在长距离光纤量子安全时间同步领域取得了重要进展。随着高精度、远距离、高安全性的量子时间同步技术的不断成熟，其必将在提升国家授时系统的安全性和精准性方面发挥至关重要的作用。

参考文献

- [1] BLOOM B J, NICHOLSON T L, WILLIAMS J R, et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71–75.
- [2] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, DAS M, et al. Cryogenic optical lattice clocks [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 185–189.
- [3] FLOWERS J. The route to atomic and quantum standards [J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1324–1330.
- [4] SCHIOPPO M, KRONJÄGER J, SILVA A, et al. Comparing ultrastable lasers at 7×10^{-17} fractional frequency instability through a 2 220 km optical fibre network[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 212.
- [5] KOKE S, BENKLER E, KUHL A, et al. Validating frequency transfer via interferometric fiber links for optical clock comparisons[J]. *New Journal of Physics*, 2021, 23(9): 093024.
- [6] TILBURG K V, LEEFER N, BOUGAS L, et al. Search for ultralight scalar dark matter with atomic spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(1): 011802.
- [7] TAKANO T, TAKAMOTO M, USHIJIMA I, et al. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 662–666.
- [8] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. *Nature*, 2018, 564(7734): 87–90.
- [9] DELVA P, LODEWYCK J, BILICKI S, et al. Test of special relativity using a fiber network of optical clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(22): 221102.
- [10] MARION H, DOS SANTOS F P, ABGRALL M, et al. Search for variations of fundamental constants using atomic fountain clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(15): 150801.
- [11] LOPEZ O, KANJ A, POTTIE P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(1): 3–6.
- [12] LOPEZ O, KÉFÉLIAN F, JIANG H F, et al. Frequency and time transfer for metrology and beyond using telecommunication network fibres [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 531–539.
- [13] KREHLIK P, SLIWICZYNSKI Ł, BUCZEK Ł, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(10): 2844–2851.
- [14] LESSING M, MARGOLIS H S, BROWN C T A, et al. Frequency comb-based time transfer over a 159 km long installed fiber network [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22): 221101.
- [15] GUO X, HOU B, LIU B, et al. Time transfer in a 1 839-km telecommunication fiber link demonstrating a picosecond - scale stability [J]. *Chinese Physics Letters*, 2024, 41(6): 064202.
- [16] BISHOP M. A security analysis of the ntp protocol version 2 [C]// *Proceedings of the Sixth Annual Computer Security Applications Conference*, Tucson, AZ. USA: IEEE, 1990: 20–29.
- [17] SHEPARD D P, HUMPHREYS T E, FANSLER A A. Evaluation of the vulnerability of phasor measurement units to gps spoofing attacks [J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2012, 5: 146–153.
- [18] KERNS A J, SHEPARD D P, BHATTI J A, et al. Unmanned aircraft capture and control via GPS spoofing [J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(4): 617–636.
- [19] NARULA L, HUMPHREYS T E. Requirements for secure clock synchronization [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 12(4): 749–762.
- [20] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Quantum-enhanced positioning and clock Synchronization [J]. *Nature*, 2001, 412(6845): 417–419.
- [21] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Advances in quantum metrology [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 222–229.
- [22] FRANSON J. NONLOCAL Cancellation of dispersion [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(5): 3126–3132.
- [23] O'DONNELL K A. Observations of dispersion cancellation of entangled photon pairs [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(6): 063601.
- [24] RUBIN M, KLYSHKO D, SHIH Y, et al. Theory of two-photon entanglement in type- II optical parametric down-conversion [J]. *Physical Review A*, 1994, 50(6): 5122–5133.
- [25] GIOVANNETTI V, LLOYD S, MACCONE L. Quantum cryptographic ranging [J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2002, 4(4): S413–S414.

- [26] TROUPE J, LAMAS-LINARES A. Secure quantum clock synchronization [C]// Proceedings of SPIE: Advances in Photonics of Quantum Computing, Memory, and Communication XI, San Francisco. Bellingham: SPIE, 2018: 105470L 8 pp.
- [27] HOU F Y, DONG R F, LIU T, et al. Quantum-enhanced two-way time transfer [C]// 2017 Conference on Quantum Information and Measurement (QIM), Paris. Washington: OSA, 2017. DOI: 10.1364/QIM.2017.QF3A.4.
- [28] LEE J, SHEN L, TROUPE J, et al. Symmetrical clock synchronization with time-correlated photon pairs [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115 (10): 101102.
- [29] LEE J W, SHEN L J, CERÈ A, et al. Asymmetric delay attack on an entanglement-based bidirectional clock synchronization protocol [J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(14): 141101.
- [30] TROUPE J, HALDAR S, AGULLO I, et al. Quantum clock synchronization for future NASA deep space quantum links and fundamental science [EB/OL]. [2022-09-29]. <https://arxiv.org/abs/2209.15122>.
- [31] HALDAR S, AGULLO I, BRADY A J, et al. Towards global time distribution via satellite-based sources of entangled photons [J]. Physical Review A, 2023, 107(2): 022615.
- [32] LAFLER R, EICKHOFF M L, NEWY S C, et al. Two-way quantum time transfer: a method for daytime space-earth links [J]. Physical Review Applied, 2024, 22 (2): 024012.
- [33] HALDAR S, AGULLO I, TROUPE J E. Synchronizing clocks via satellites using entangled photons: effect of relative velocity on precision [J]. Physical Review A, 2023, 108(6): 062613.
- [34] LAFLER R, LANNING R N. Quantum time transfer: a practical method for lossy and noisy channels [J]. Physical Review Applied, 2023, 20(2): 024064.
- [35] 孙和平, 杨元喜, 叶朝辉, 等. 精密(量子)测量时代下时空基准研究中的关键科学问题和核心技术 [J]. 中国科学基金, 2024, 38(1): 172-181.
SUN H P, YANG Y X, YE Z H, et al. Key scientific frontiers and core technologies in space-time reference research in the era of precision (quantum) measurement [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2024, 38(1): 172-181. (in Chinese)
- [36] QUAN R N, DONG R F, XIANG X, et al. High-precision nonlocal temporal correlation identification of entangled photon pairs for quantum clock synchronization [J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91 (12): 123109.
- [37] HOU F Y, QUAN R N, DONG R F, et al. Fiber-optic two-way quantum time transfer with frequency-entangled pulses [J]. Physical Review A, 2019, 100(2): 023849.
- [38] LI B H, HOU F Y, QUAN R N, et al. Nonlocality test of energy-time entanglement via nonlocal dispersion cancellation with nonlocal detection [J]. Physical Review A, 2019, 100(5): 053803.
- [39] HONG H B, QUAN R N, 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.
- [40] QUAN R N, HONG H B, XUE W X, et al. Implementation of field two-way quantum synchronization of distant clocks across a 7 km deployed fiber link [J]. Optics Express, 2022, 30(7): 10269-10279.
- [41] XIANG X, SHI B K, QUAN R N, et al. Quantum two-way time transfer over a hybrid free-space and fiber link [J]. Quantum Science and Technology, 2023, 8 (4): 045017.
- [42] HONG H B, QUAN R N, XIANG X, et al. Quantum two-way time transfer over a 103 km urban fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(5): 1479-1486.
- [43] SHI B K, HONG H B, XIANG X, et al. Quantum two-way time transfer over a 250 km direct fiber-optic link [J]. Optics Express, 2024, 32(25): 43805-43814.
- [44] QUAN R N, 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.
- [45] 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): 032701.
- [46] XIANG X, QUAN R N, LIU Y T, et al. Widely flexible and finely adjustable nonlocal dispersion cancellation with wavelength tuning [J]. Optics Express, 2022, 30(25): 44487-44495.
- [47] LIU L, LV D S, CHEN W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled 87Rb atoms [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2760.
- [48] MARLOW B L S, SCHERER D R. A review of commer-

- cial and emerging atomic frequency standards [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(6): 2007-2022.
- [49] BARNES C, HATI A, NELSON C, et al. Practical evaluation of a 50 km fiber link utilizing a commercial modem [C]// 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), Piscataway. New Orleans: IEEE, 2016: 1-4.
- [50] ROST M, PIESTER D, YANG W, et al. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps [J]. Metrologia, 2012, 49(6): 772-778.
- [51] CHEN Z F, ZUO F X, HU L, et al. Time synchronization system based on bidirectional time-division multiplexing transmission over single fiber with same wavelength [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0906005.
- [52] KREHLIK P, SLIWICZYNSKI L, BUCZEK L, et al. Optical multiplexing of metrological time and frequency signals in a single 100 - GHz - grid optical channel [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68(6): 2303-2310.

(本文编辑: 李成成)



第一作者:董瑞芳(1977—),女,中国科学院国家授时中心研究员,博士生导师,主要从事量子时间同步和高精度时间频率传递研究。迄今在 Nature Physics, Science Bulletin, Laser & Photonic Reviews 等学术期刊发表论文 140 余篇,授权发明专利 48 项,主持多项国家自然科学基金重点/面上项目等。入选国家高层次人才计划“青年拔尖人才”、陕西省中青年科技创新领军人才、中国科学院三八红旗手;获第十四届陕西省青年科技奖。



通信作者:张首刚(1966—),男,中国科学院国家授时中心主任,研究员,博士生导师,围绕自主、安全和高性能的国家时频体系发展,长期从事量子时间测量、天文时间测量和时间频率传递研究,曾获国家杰出青年科学基金、新世纪百千万人才工程国家级人选,享受国务院政府特殊津贴专家,授权中外发明专利 89 件,发表学术论文 300 余篇,合作专著 2 部。目前作为首席科学家,承担“空间站高精度时频实验系统”和国家重大科技基础设施“高精度地基授时系统”研制任务。