

引用格式：刘东祥，王玉琢，徐倩，等. 自由空间激光时频传递技术研究进展[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 36-49.

自由空间激光时频传递技术研究进展

刘东祥¹, 王玉琢², 徐倩², 王怡¹

1. 中国计量大学信息工程学院, 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 杭州 310018;

2. 中国计量科学研究院, 北京 100029

摘要: 时频传递技术在现代通信、导航和科学研究中扮演着关键角色, 在基础科学实验、经济民生、国家安全等方面发挥着重要作用。随着高精度光学时钟及其各种应用的发展, 星地时频传递精度越来越成为制约卫星时频传递网络发展的瓶颈, 因此, 开发自由空间激光时频传递技术已经成为未来卫星时频网络发展的关键。自由空间激光时频传递技术相较于微波时频传递技术可以显著提高空间时频传递精度, 与光纤时频传递技术相比具有良好的铺设条件, 适用于航空航天等环境应用。综述了国内外自由空间激光时频传递的研究现状, 并对自由空间激光时频传递技术发展趋势进行展望。该技术将会朝着更高传递精度、网络化以及量子安全化的方向发展。空间激光时频传递技术的不断突破, 不仅将推动现代通信和导航系统的发展, 还对天文观测、地球物理、大型科学工程、物理常数测定等基础科学问题, 具有重要意义。

关键词: 时频传递; 自由空间; 光通信; 光学频率梳; 量子密钥分发

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-01-0036-14

Advances in free-space laser time-frequency transfer techniques

LIU Dong-xiang¹, WANG Yu-zhuo², XU Qian², WANG Yi¹

1. Faculty of Information Engineering of China Jiliang University, Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology Testing of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract: Time-frequency transfer technology plays a key role in modern communication, navigation and scientific research, and plays an important role in basic science experiments, economy and people's livelihood, and national security. With the development of high-precision optical clock and its various applications, satellite-terrestrial time-frequency transfer accuracy has increasingly become a bottleneck restricting the development of satellite time-frequency transfer network, so the development of free-space laser time-frequency transfer technology has become the key to the development of satellite time-frequency network in the future. Free-space laser time-frequency transfer technology can significantly improve spatial time-frequency transfer accuracy compared with microwave time-frequency transfer technology, and has good laying conditions compared with optical fiber time-frequency transfer technology, which is suitable for aerospace and other environmental

收稿日期: 2024-04-16; 接受日期: 2024-06-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB3906503)

applications. This paper reviews the research status of free-space laser time-frequency transmission at home and abroad, and looks forward to the development trend of free-space laser time-frequency transmission technology, which will develop in the direction of higher transmission accuracy, networking and quantum security. The continuous breakthroughs in space laser time-frequency transmission technology will not only promote the development of modern communication and navigation systems, but also have great significance to the basic scientific problems such as astronomical observation, geophysics, large-scale scientific engineering, and the determination of physical constants.

Key words: time-frequency transfer; free space; optical communication; optical frequency comb; quantum key distribution

时间频率是目前测量精度最高的物理量,起初人们通过日晷、方尖碑等装置进行计时,这种装置受环境影响很大。1927年,开始利用石英晶体中的压电振荡特性来实现时间测量,大幅提高了时间的测量精度。1955年,铯原子钟首次问世,1960年,通过束缚氢原子以压缩共振频谱,氢原子钟也被开发出来,直至1966年,法国国家标准实验室制造了第一台铯原子喷泉钟。1972年开始,协调世界时 UTC 正式成为国际标准时间,为了保证 UTC 的可靠性、稳定性和准确性,UTC 的建立需要获得原子钟比对数据,也就是实现全球范围内的守时实验室地面站之间的时频传递。目前,守时型原子钟的天稳定度已达到 10^{-16} 量级,光钟的不确定度可达到 10^{-18} 量级,甚至 10^{-19} 量级。光频标准取代微波原子频率标准,以确定下一代秒定义,已经提上日程^[1]。光频标准时频网络的建立也会推动其他应用的发展,例如广义相对论的测试、对引力波、暗物质的探索等。

随着科学的进步发展,人们对时间的精准度的要求日益增加。迫切需要发展时间频率传递技术以实现远距离高精度的时间频率同步。早期的搬运钟技术因其实验过程繁琐并且比对精度较低而逐步被其他时间传递技术取代。光纤信道时频传递方案虽然具有低损耗、抗外界干扰能力强、可长时间连续运行、覆盖范围广等特点,但受到光纤铺设条件的限制,光纤时频传递难以运用到航空航天环境^[2-4]。随着高稳定高精度时钟基准的快速发展,人们将携带高精度时钟的卫星发射到太空中,通过星载原子钟约束高稳定晶振的方式输出稳定度极高的时钟信号,并通过技术手段传递时频信号

至地面站,带动出现了多种基于 GNSS (Global Navigation Satellite System) 的精密时频传递方法,如单向法、共视法、全视法等^[5-8]。卫星双向传递 (TWSTFT) 技术的两地面站信号传播路径几乎对称,可以抵消大部分电离层扰动、对流层扰动和几何路径不对称等误差延迟。卫星双向传递技术的应用也大大提高了时频比对的准确性和稳定性^[9-16]。

近年来随着光频标准技术的快速发展,我国光频离子钟和光晶格钟的频率不确定度已达到 10^{-18} 量级。全球各卫星导航系统使用了不同种类的星载原子钟,其中星载铷钟占大多数,这些高稳定时钟装配在中轨 (medium earth orbit, MEO) 卫星或更高轨道的卫星上,能够提供较广的覆盖范围,同时保持良好的信号质量和定位精度。然而,低轨 (low earth orbit, LEO) 卫星互联网应用于导航时虽然具有多重覆盖性、空间衰减小、几何构型好等优势,但其受到平台有效载荷重量、功耗等限制,无法配备高稳定的星载铷钟,其时频基准一般依靠高稳晶振实现,并通过 GNSS 接收机的周期性信号进行长周期校正。这种方式的输出信号短期稳定度较低^[17]。近年来,低轨卫星上开始部署芯片级原子钟,这种技术既能满足低成本的要求,又能在一定程度上为低轨卫星提供较长周期内的时间同步精度和时频稳定性^[18]。国际空间站和我国载人航天空间站都属于低轨道航天器^[19],我国空间站高精度时频科学实验系统在实验舱中利用微重力环境,部署了激光器冷却原子钟,通过组合不同特性的原子钟,空间站预计能够建立日稳定度和不确定度在 10^{-17} 量级的空间时频基准。不同时钟组合可以在各时间段内形成互补稳定性,利用

卡尔曼滤波方法将原子钟的信号锁定在晶体振荡器上, 弥补短期稳定性不足, 从而利用低轨空间站精密原子钟信号向北斗卫星进行高精度时间传递, 提高北斗系统性能^[20]。随着星载时钟技术的不断进步, 星地间的时频传递精度越来越成为制约卫星时频网络发展的瓶颈, 由此, 发展新型的高精度自由空间时频传递技术成为未来卫星时频网络的关键所在。

自由空间可细分为大气信道、太空信道和星地信道等, 自由空间通信从地基无线电阶段发展到卫星同步阶段, 随着技术的进步, 信息传输载体也从微波发展到光波。光波通信链路和微波通信链路相比, 光波频率比微波频率高 3~5 个数量级, 具有更高的传输速率, 光波频谱更宽、指向性强, 具有更好的抗干扰能力。因此, 自由空间激光时频传递技术具有高精度、大通信容量、应用范围广等优势, 可满足不断发展的量子频标比对与分发需求, 相关研究人员逐步实现了高精度自由空间时间频率传递。

高精度远距离时频传递系统已被广泛应用于国防建设和国民经济相关领域, 如日益庞大和分布化程度不断提高的电力通信、工业自动化和交通运输系统等^[21]。在某些涉及到国家安全、经济生产以及民生生活等场合, 对时间频率同步的安全保密性需求很高。随着量子信息技术的发展, 安全时频传递领域迎来了新的发展方向。将量子信息技术应用于时频传递, 不仅可以提高时频传递的准确度, 还能提高时频传递的安全性。未来自由空间激光时频传递将会朝着更高传递精度、网络化以及量子安全化的方向发展。

本文首先从非相干脉冲激光传递方案和相干激光传递方案两个方面对国内外精密自由空间激光时频传递技术的现状进行总结, 并对该技术与量子通信技术进行结合形成安全时频传递以及未来自由空间激光时频传递的发展进行介绍。

1 原理及解决方案

光纤时频传递技术可以在远距离站点之间实现飞秒级时间同步和 10^{-18} 量级的频率传递精度,

然而受限于地面光纤的铺设条件, 利用光纤信道进行通信实现时频传递难以运用于航空航天等应用环境^[22]。由此国内外许多时频研究人员开展了自由空间激光时频传递研究, 克服了大气湍流影响、光源噪声干扰、传输距离限制、光学系统搭建等问题, 实现了自由空间时间频率高精度传递。

在激光通信系统中, 高稳定性的光源和精确的频率控制是确保通信信号准确传输的关键。而时频传递技术则通过精确地传递时间和频率信息, 为激光通信系统提供准确的时间参考和频率标准。激光通信系统的探测技术主要分为相干测量和非相干测量两种。其中, 传统的非相干测量探测方式又被称为强度调制/直接检测 (IM/DD)。首先, 此探测方式易于进行调制解调, 因为仅涉及激光信号的强度变化, 而无需处理相位或频率信息。其次, IM/DD 方式仅使用了激光信号的振幅参数, 而没有利用到光信号的相位、频率等其他参数, 所以信息承载能力相对有限, 这限制了其在高速、大容量通信系统中的应用。而相干测量技术测量的是差频信号, 利用激光的相干特性, 在接收端光电探测之前先与本振光信号相干, 再进行光电探测。相干探测技术能够感知输入信号的频率和相位等重要信息, 带来的显著优势是其转换增益较高, 能够实现更低的探测极限, 从而提高系统的灵敏度和通信性能。由此相干探测技术在星间、长距离传输或在噪声环境中操作的通信系统中尤为重要^[23]。

按照上述不同的探测测量方式, 自由空间激光时频传递方案也可依此划分, 基于非相干激光测量的有基于角反射器、异步激光器的激光脉冲幅度调制的时频传递方案和连续光载射频传递方案, 基于激光相干测量的有基于相干光相位时频传递方案和基于飞秒光梳的时频传递方案。基于非相干激光技术预计能够达到 $10^{-17}/\text{d}$ 的稳定度, 基于相干激光技术可达 $10^{-19}/\text{d}$ 的稳定度。

2 自由空间激光时频传递研究进展

2.1 基于非相干脉冲激光时频传递方案

2.1.1 激光脉冲幅度调制方案

激光幅度调制时频传递原理如图 1 所示, 时

频信号加载在光载波振幅上,通过自由空间链路传递到接收端,接收端分析来自发射端的信号,求

解时钟差与频率差,并利用激光往返传输补偿时间延迟或相位抖动,以确保系统的性能和可靠性^[24]。

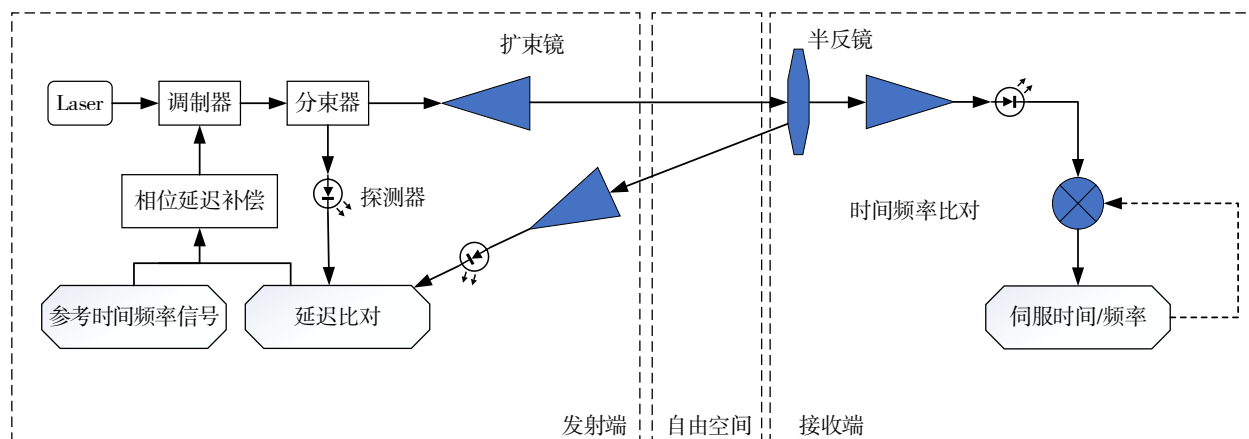


图 1 激光幅度调制的空间激光时频传递原理图

星地激光时间传递 (LTT) 是最早实用化激光脉冲时频传递技术的计划,1988 年由 ESA 支持的 LASSO 项目得以实施,通过在地球同步卫星上安装激光角反射器、激光接收器等设备完成洲际范围内的时频传递。采用卫星激光测距 (SLR) 技术进行星地时钟比对,在 1992 年的美国 McDonald 测月站 (MLRS) 与法国蔚蓝海岸天文台测月站 (OCA) 对比实验中传递钟差精度高于 100 ps,稳定度达到了 $10^{-13}/1\,000\text{ s}$ ^[25-26]。在 2008 年,该计划对北斗一号的 MEO 卫星进行了激光时间频率比对实验,并在 2010 年和 2011 年对 IGSO (inclined geosynchronous orbit) 卫星进行了相同的实验。实现了 300 ps 的单次时间比对精度以及 20 ps/500 s 的比对稳定度^[27]。

20 世纪 90 年代中期,在 LTT 计划基础上发展而来的激光时间比对计划 (T2L2) 由法国国家太空研究中心 (CNES) 和 OCA 共同主导开展,其目的是通过光脉冲在两个测距站和地球卫星之间的传播实现相隔 103 km 以上距离的时钟同步,并达到单次测量精度和准确度均小于 50 ps 的指标^[28-29]。2008 年,随着 Jason-2 卫星发射升空,T2L2 计划时间比对精度优于 100 ps,稳定度达到了 7 ps/30 s,实现了目前最佳性能的远距离自由空间激光时间频率比对^[30-31]。

之后捷克的布拉格大学^[32]和德国慕尼黑工业

大学联合提出了作为 T2L2 后续计划的 ELT 计划,该计划旨在利用 SLR 技术实现更高精度水平的星地时间同步,相较于 T2L2 计划的多光子测量模式,ELT 采用单光子测量模式改进了前者测量时引入时延误差的不足,并且 ELT 内部具有时延校正模块,可以保证长期的高精度同步。依托国际空间站 (ISS) 的欧空局的冷原子钟组 ACES 项目采用 ELT 计划,拟在空间钟与地面钟之间建立超高精度时间频率传递链路,可开展一系列基础物理实验包括引力红移验证、局域不变原理等,也将进行许多科学应用包括地面原子钟之间超高精度时频传递、相对论重力测量和地球遥感等,该项目预计可实现几皮秒的同步精度,时间比对不确定度可达 50 ps 量级^[33]。

上述方案中使用的卫星角反射器受到链路衰减的限制,导致时频同步链路距离最远只达月地距离。1996 年, NASA 的 J. J. Degan^[34-35]提出了一种新方案,利用异步应答激光器进行双向链路时频传递。2013 年,美国喷气推进实验室 (JPL)^[36]基于此方案实现了亚毫米级别的测距精度;2014 年,捷克技术大学的 J. Blazej 等人^[37]采用此方案进行了时间频率传递实验,实现了皮秒级别的传递精度。这一方案降低了链路衰减,从而极大提高了时频传递距离,为以后的高轨卫星及深空航天器的精确时间同步提供了新的技术手段。

2.1.2 光载射频传递方案

除了以上方案,还有另一种方式空间光载射频传递方案,该方案发展较晚,传递稳定度为 $10^{-13}/\text{d}$ 量级以上。它将微波信号调制到连续激光载波上,然后在接收端通过拍频的方式再转换微波信号进行测量。

2012 年,美国阿拉巴马汉茨维尔大学(UAH)的 J. Nie 等人^[38]使用二极管激光器作为时钟载体,提供线宽约为 200 kHz,输出功率为 20 mW 的光载波,由晶体控制的射频驱动器产生时钟信号,通过光纤耦合强度调制器编码到光载波上,调制后的激光束通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大到 40 mW 后经过自由空间 60 m 大气信道链路传输后由大孔径光学接收系统收集,然后将信号聚焦在一个高速光电二极管上进行解调恢复出时钟信号,将恢复的时钟信号与在双平衡混频器上直接从射频驱动器导出的参考信号进行比较拍频,然后分别使用快速傅里叶变换分析仪和频率计数器对基带信号的相位噪声与频率稳定度进行测量分析,最终在 80 MHz 时钟频率下,实现了 $1 \times 10^{-10}/\text{s}$ 的频率传输稳定度。

由于环境因素如大气湍流、平台运动、空气漂移等,在自由空间传输链路上,会引入激光束传输时间变化,导致光信号的相位波动和传输射频频率漂移。湍流还会导致光束强度波动,由于功率相位耦合,强度波动会导致射频信号相位波动。所以在自由空间链路传输时,需要进行相位补偿。2015 年,清华大学^[39]采用折射式光学天线、角反射器、集成光纤等器件设计了自由空间光载射频频率同步方案,通过主动相位补偿电路等技术提高系统稳定性,成功实现了对微波光调制频率信号的相位噪声补偿,此方案在 70 m 自由空间链路上达到了 $2 \times 10^{-12}/\text{s}$ 和 $9 \times 10^{-16}/10^4 \text{ s}$ 的频率传递稳定度。该团队在上述方案基础上设计的大口径反射式光学系统,采用温控光纤盘、温控箱体等温控方式实现了大动态范围的快速响应光纤时延控制器,大大降低了 12 km 光纤链路的时延不确定度,该控制器可与自由空间光载射频频率同步系统结合,实现时标信号与多波段频率信号的高稳定同步传输^[40]。

主动补偿方案在复杂性、补偿速度和补偿范围等方面存在缺点,被动补偿方案采用相位共轭补偿原理,无需主动补偿装置即可实现高精度的相位补偿,具有较高的鲁棒性和补偿精度。2019 年,上海大学在室内自由空间频率传递中提出被动相位矫正技术,不同于基于锁相环的主动相位抑制方案,而是采用发送一个往返探测信号的方式,在局部端通过相位共轭精确地获得相位延迟,然后在远端站点得到一个预补偿的参考射频频率,将基带信号与参考信号输入到相位鉴别器中,输出直流电压数据由数字电压表采集,然后进行相位和稳定性分析。此方案不依赖于主动相位补偿,极大地简化了局部和远程站点的结构,还利用了不同波长的前后反射,可有效抑制后向散射影响。实验结果表明,在 124 m 室内自由空间链路上进行频率传输,实现了 $6.8 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $3.2 \times 10^{-17}/1000 \text{ s}$ 的频率稳定传递^[41]。

2.2 基于相干激光时频传递方案

2.2.1 相干光相位传递方案

2008 年,德国马克斯普朗克光学研究所(MPL)的 B. Sprenger 等人利用 1550 nm 半导体激光器为光源形成马赫-曾德尔干涉仪进行相干光传递实验。激光器输出通过单模光纤传输,经准直器分束器准直后分为两束,其中一束通过声光调制器(AOM)以一阶衍射光作为参考,另一束经自由空间信道传输后,由后向发射器反射,两束光最终在快速光电二极管上聚焦重新组合,输出信号使用射频频谱分析仪和频率计数器进行分析。最终实验在 100 m 的自由空间链路中实现了 $1.68 \times 10^{-13}/\text{s}$ 的频率稳定度,表明自由空间相干光链路在短距离时钟比对拥有不错的性能^[42]。2010 年,法国的 K. Djerroud 等人也开展了相干光链路频率传递实验,在没有主动链路噪声补偿的情况下,通过不等臂的外差式迈克尔逊干涉仪进行 5 km 光频传递,利用 AOM 和干涉拍频实现了 $1.3 \times 10^{-14}/\text{s}$ 和 $2 \times 10^{-15}/100 \text{ s}$ 的频率稳定传输。表明系统链路主要受到大气湍流以及望远镜和目标的机械振动的限制,同时也存在高多普勒频移、低预期返回功率、长信号传播

时间等问题。但在一定条件下,自由空间相干光链路可满足远距离时钟比对和卫星测距等方面需求^[43]。

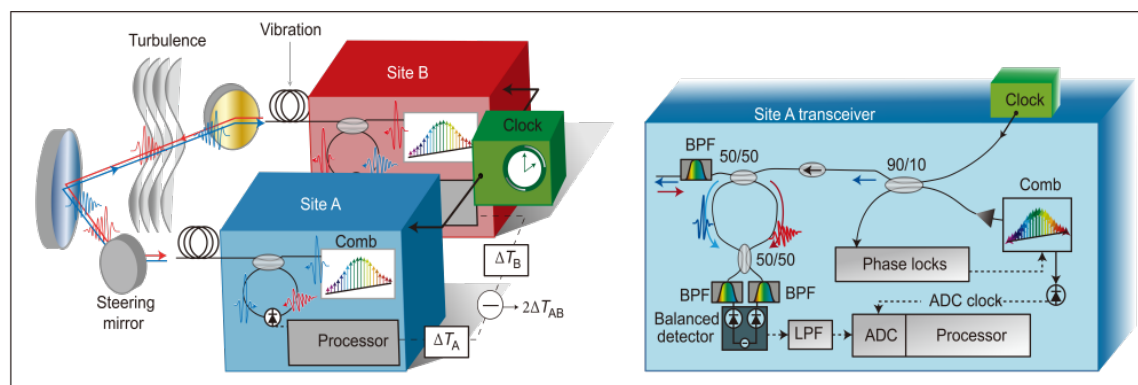
2.2.2 基于光学频率梳的传递方案

光学频率梳是一种由众多频率稳定并且其间隔严格相等的光谱梳齿组成的宽带光谱,在时域上则表现为一系列等间距的超短脉冲输出,其本质上是脉冲重复频率间隔和载波包络相移被精确锁定的锁模超快激光器。光梳的出现,十分方便地弥合微波和光学波长区域之间的频率间隙。由于其出色的相移特性以及在时频域的特质,自发明以来,就在精密测量、光谱分析、激光雷达、远距离通信等众多领域被广泛运用,其技术的成熟推动了线性光学采样(LOS)技术的发展。LOS技术利用双飞秒光频梳系统作为信号源,远端信号光梳产生的飞秒脉冲经过链路传输至本地后与本地本振光梳产生的飞秒脉冲进行干涉,通过拍频处理获取被测量的时间信息,计算出两地时差。这种利用飞秒光频梳的高稳定性进行时间测量的方法,具有极高的测量精度,因此在各个领域得到广泛应用。

随着光学频率梳在地面光纤网络中应用的发展,其在自由空间时频传递领域也不断成熟。美国阿拉巴马汉茨维尔大学^[44]于2010年首次展示了基于光学频率梳的自由空间光载射频传递方案,采用输出波段为1560 nm,重复频率为90 MHz,平均功率为4 MW的飞秒激光器作为发射端,经EDFA放大后发射到大气传输链路,接收端高速二

极管聚焦发射光束以恢复飞秒激光器的重复频率及其谐波,在60 m的自由空间链路中传递实现了 $1 \times 10^{-12}/1$ s的频率稳定度。

利用在超稳激光器和光频梳技术方面的优势,美国国家标准技术研究所(NIST)展开了一系列自由空间激光时频传输的研究。2013年,NIST的研究团队参照微波双向时频传输方案开展了激光双向时频传输(O-TWTFT)方案(图2(a)和(b)),该方案将两观测站的光梳都与本地光学振荡器锁相,通过相干光学频率梳之间的干涉实现线性光学采样以获得飞秒级时延测量,尽管由于大气湍流或2 km链路路上的障碍物而导致信号频繁衰减,但仍实现了在积分时间1000 s下,优于1 fs的时间偏差,系统偏移小于 4×10^{-19} ,传输不稳定性低于 10^{-18} 量级。利用光梳进行O-TWTFT方案与基于卫星的光通信结合可为超精密和准确的全球时间频率分布、全球大地测量和基于卫星的广义相对论实验带来新的可能性^[45]。2018年,该团队提出利用载波相位改进上述方案,在每个站点,光振荡器信号通过多普勒抵消光纤链路传输到自参考频率梳,其相位被映射到光梳上,在双向配置下通过线性光学采样比较了两个光梳的相位和时序。实验在4 km湍流自由空间链路上实现了 $1.2 \times 10^{-17}/1$ s的频率传递精度和7 as/1 s的时间传递精度,表示载波相位O-TWTFT能够在1 s平均时间内连续跟踪远端光振荡器相对光相位的变化,有效地扩展了远端原子钟之间相关光谱等应用在广泛空间网络上的光相位相干性^[46]。



(a)

(b)

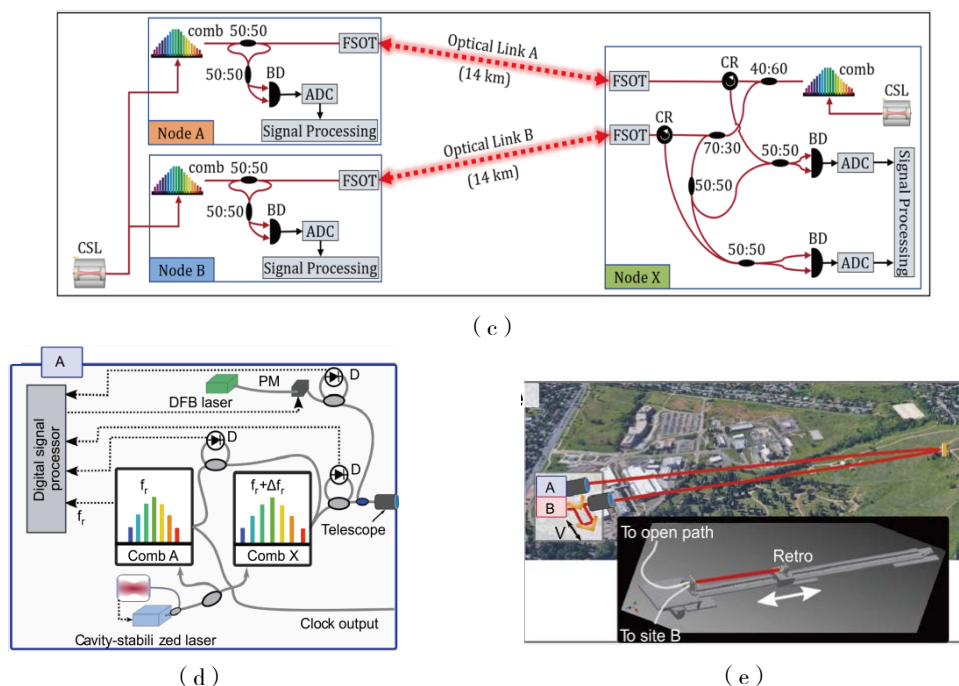


图 2 基于光频梳和 LOS 技术的光钟比对实验原理图

2020 年, 上述 NIST 研究团队继续 O-TWTFT 系统研究, 搭建了长达 28 km 的三节点时钟网络 (图 2 (c)), 三节点网络是一种中继网络, 旨在将频率和定时信息从主节点通过中继节点传输到终端节点, 允许网络跨越 28 km 的室外湍流大气, 同时保持光传输功率低于 5 兆瓦, 为了实现该目标, 每个节点都包含了自参考光梳振荡激光器和 O-TWTFT 收发器。从收发器中发射梳状脉冲, 并在其中检测和比较来自本地和远端时钟的梳状脉冲。尽管中继节点上自由运行的本振相对不稳定, 实验链路也跨越了 28 km 的强湍流空气, 但实验实现了 $8 \times 10^{-17}/10$ s 的频率传递精度, 在 1 s~1 h 的平均时间内, 传递时间偏差低于 1 fs。实验表明三节点网络的成功运行代表着向包括紧凑机载或星载 O-TWTFT 系统的未来网络迈出重要的一步^[47]。

NIST 的研究团队除了进行上述 O-TWTFT 系统改进创新工作外, 还对自由空间激光双向时频传递链路环境影响进行了深入研究。2016 年, NIST 的 L. C. Sinclair 等人^[48]通过 O-TWTFT 在强湍流 12 km 自由空间链路上实现了飞秒级时钟同步, 结果显示在使用自适应光学设备的条件下, 即使链路受到强湍流影响, 自由空间飞行时间的双向互易性仍是保持的, 这得益于 O-TWTFT 对强湍流的

鲁棒性及与自适应光学的兼容性。2019 年, 上述团队对横向平台运动加上大气湍流空间变化对激光双向时频传递所依据的飞行时间互易性的影响展开研究, 为了模拟由横向平台运动引起的光束路径位移, 该团队采用两个位移间隔 2 km 的光链路取代单一的双向链路实现基于梳状结构的 O-TWTFT 系统, 结果推断表明对于近地轨道而言, 由湍流各向异性和前方角耦合引起的非互易性不会使时间偏差超过几个飞秒^[49]。光学时钟网络有时需要通过移动机载或星载时钟之间的自由空间激光链路来比较同步时钟, 由此上述团队于 2019 年证明了基于光学频率梳的 O-TWTFT 可以在机载或星载光学时钟之间建立自由空间网络 (图 2 (d)、(e)), 以实现精确导航、授时和基础科学探测。实验中两个站点之间的链路连接是使用安装在四轴飞行器或速度高达 24 m/s 的扫频延迟线建立。实验表明, 尽管系统飞行时间互易性被破坏了 50 ps, 多普勒偏移达到 10^{-7} , 但两站点的时间同步时延小于 1 fs, 频率稳定度达 10^{-18} 量级^[50]。

另外在 2018 年, NIST 的 I. Khader 等人^[51]利用现有的光通信系统设计, 使用相位调制、大时间-带宽乘积波形相干检测, 相比于 O-TWTFT, 这种方案能最大限度地减少许多站点与系统连接的硬

件开销,完成了远程时钟主动同步到主时钟上,平均时间从数秒到数小时的时间间隔低于1 ps的时间偏差,在8 h内峰值漂移16 ps。

除了上述 NIST 对基于光学频率梳的时频传递研究外,也有其他研究机构进行了相关研究。针对大气湍流引起的相位噪声、光功率下降等问题,时频研究人员利用 AOM 进行相位噪声补偿,四象限光电探测器(QPD)监测光束位置,调整转向镜使光束对齐,应对光束漂移^[52]。在此基础上,韩国科学技术院(KAIST)的 B.S.Kim 团队于2019年基于光学频率梳实现了多模式相干光的提取。该团队说明了多通道光学合成器的概念,以产生在宽光谱范围内具有超窄线宽的高度稳定的光频率。其主要思想是在充分放大功率的情况下,从锁模光纤振荡器的不同频率位置的光梳中同时提取出多个频率。同时通过自参考 f-2f 干涉仪检测的载波包络偏移概率进行调节,以防止相位噪声在频率模式间传播^[53]。同年,该团队基于此多模式光提取技术进行了18 km的自由空间激光时频传递实验,实验表明,经过相位噪声补偿后,实现了 $10^{-16}/0.1\text{ s}$ 的频率稳定度^[54]。2022年,上述韩国团队提出了梳对梳的自由空间频率稳定传输方案,通过两个独立的梳线相干传输和大气相位噪声的反馈抑制控制1.3 km的自由空间光学链路实现主梳与从梳的同步。结果表明,梳对梳稳定方案可以有效地通过1.3 km的大气无线光通信链路,将高精密光学腔赋予主梳的频率稳定性传递给远端从梳,实验结果表明频率传输稳定度达到 $1.7 \times 10^{-15}/0.1\text{ s}$ ^[55]。

2018年,电子科技大学的侯冬等人提出了基于被动相位结合校正技术的光梳频率自由空间传递方案。基于光纤链路多址频率传输中双向相位补偿技术,该技术抑制了光纤链路任意点复制信号的时序波动,提出了基于被动相位校正技术的飞秒光梳自由空间多址频率传播方案,利用被动相位校正技术在一个光学频率梳中产生一个频率信号,然后任意选择整个60 m自由空间路径的中间点作为多址频率分发点,提取稳定的射频信号。由于被动相位结合校正可以抑制湍流引起的额外时序波动,该方案可以在任意点提取稳

定的2 GHz射频信号。最终实验实现了 $8 \times 10^{-14}/1\text{ s}$ 和 $1 \times 10^{-16}/1\,000\text{ s}$ 的频率传递稳定度,在5 000 s内,时序波动约为224 fs^[56],上述团队还基于被动相位共轭补偿法进行了自由空间52 m链路频率传递实验,在缺少主动相位补偿的条件下,时延抖动被有效消除,最终实验在5 000 s内传递2 GHz频率信号的时延抖动标准差约为280 fs^[57]。

北京无线电计量测试研究所的杨宏雷等人提出了一种基于柔性二进制偏移载波(FlexBOC)调制的自由空间激光光学双向时间传递方法,与现有的基于BPSK调制的光双向时间传输相比,通过综合分析FlexBOC信号中的伪随机噪声码和子载波,实现了在实验室外30 m的自由空间路径上 $4 \times 10^{-12}/1\text{ s}$ 和 $1.3 \times 10^{-15}/10\,000\text{ s}$ 的稳定度。这种方法可以提供相对精度,并在未来的户外计时服务和地星或卫星间时钟网络中显示出潜力^[58]。上述杨宏雷团队在2020年提出一种相参异步光学采样系统,采用窄线宽腔稳激光器作为相参光频率基准来操纵双自参考飞秒激光器,通过研究该系统的相位噪声特性和色散干涉图表征了该系统的相位相干性,研究表明剩余线宽小于0.1 s时,相应的相干时间至少10 s。该团队还通过多外差光谱分析定量地获取了任意波长下的相位相干性^[59]。

张升康团队利用飞秒激光异步光学采样技术也开展了时间双向传递研究,传递两地均搭载一台输出中心波长为1 550 nm飞秒脉冲的光学频率梳,光频梳均与同一铷钟锁定,输出脉冲进行时域内相互扫描,实现飞秒量级线性异步光学采样,以通过低时间分辨率的电子学采样系统。该实验在室外700 m自由空间链路实现了58 fs/1 s的时间传输稳定度。中国科技大学(USTC)潘建伟团队为了验证中近地轨道和地球同步轨道卫星频率传输的可行性,构建了16 km大气链路和一个额外的可调衰减器组成自由空间信道,衰减损耗能够有效模拟卫星到地面链路的情况,通过飞秒光梳与LOS技术实现高信噪比、良好恢复能力。最终实验在链路损耗为72 dB的条件下,实现了 $3 \times 10^{-14}/1\text{ s}$ 的频率传递稳定度,时间传递准确度优于10 fs^[60]。

表 1 各研究单位自由空间相干激光时频传递方案与性能指标对比

Research unit	Experimental programme	Path length/km	Transfer accuracy
MPL ^[42]	coherent optical phase transmission	0.1	$1.68 \times 10^{-13}/1 \text{ s}$
Observatoire de Paris ^[43]	coherent optical phase transmission	5	$1.3 \times 10^{-14}/1 \text{ s}$
NIST ^[45]	O-TWTFT	2	$1 \times 10^{-18}/1 \text{ 000 s}$
NIST ^[46]	Carrier-phase O-TWTFT	4	$1.2 \times 10^{-17}/1 \text{ s}$
NIST ^[47]	three-node network transmission	28	$8 \times 10^{-17}/10 \text{ s}$
KAIST ^[54]	Optical Combs Multi-Mode Light Extraction Technology	18	$3.54 \times 10^{-16}/0.1 \text{ s}$
KAIST ^[55]	Comb-to-comb frequency stabilised transmission	1.3	$1.7 \times 10^{-15}/0.1 \text{ s}$
Beijing Institute of Radio Metrology and Testing ^[58]	FlexBOC-based time-frequency transmission	0.03	$4 \times 10^{-12}/1 \text{ s}$
USTC ^[60]	Modelling satellite-based time-frequency transmission	16	$3 \times 10^{-14}/1 \text{ s}$
USTC ^[61]	Modelling satellite-based time-frequency transmission	113	$2 \times 10^{-15}/1 \text{ s}$

从表 1 的数据可以看出, 光学频率梳方案相较于相干光相位传递方案在时频传递中表现出更佳的传输稳定性, 也可以看出我国虽然在自由空间时频传递方向研究较晚, 传输稳定性也与其他研究机构存在一定差距, 但在传输距离上取得了突破性成果。

3 自由空间激光时频传递发展趋势

3.1 提高远距离时频传递能力, 时频传递链路网络化

为了满足更高精度的光学频率标准的分发比对要求, 自由空间激光时频传递正朝着更高精度的方向发展, 利用光学频率梳进行传递比传统的脉冲幅度调制技术更精确。然而, 当前基于光频梳的技术仅适用于短距离和慢速相对运动情况。面对更长距离和更快速度时, 可能会出现双向链路互易性破坏和大多普勒频移等问题。因此, 研究人员需要进一步研究和验证, 解决这些问题后, 光频梳时频传递方案有望在星地和洲际时频传递中得到广泛应用。

2022 年, 潘建伟团队为了模拟基于卫星的自由空间时频传递所面临的真实挑战环境, 在新疆乌鲁木齐市搭建了长达 113 km 的自由空间链路, 具体系统原理如图 3 所示, 该系统两个终端分别位于南山和高崖子, 每个终端都配备了一个超稳定激光器 (USL), 输出两种不同波长的高功率光学频率梳, 中心波长分别为 1 545 nm 和 1 563 nm, 此外, 还采用了 LOS 模块, 可在整个模糊范围内提供飞秒级精度。波长为 1 550.12 nm 的可对比激光器 (USL) 具有 $3 \times 10^{-15}/1 \text{ s}$ 的频率不稳定性, 被用作参考时钟源。与 USL 相位锁定的 OFC 光信号被用作本地采样的载波参考信号。取消折叠式链路设计, 而是采用将两个终端物理分离到 113 km 距离进行链路性能评估, 这样可以更好模拟链路环境。通过对自由空间信道进行频率复用, 建立两个独立的双向时频传递链路, 可以在不受 USL 限制的情况下精确评估链路性能。根据 LOS 的峰值电压、有效数据速率和统计损耗分布确定链路损耗。实验最终在 113 km 的自由空间链路上实现了时频传递, 链路时延标准差为 1 fs, 并在 10 000 s 内获得了优于 3×10^{-19} 的频率传递稳定度^[61]。

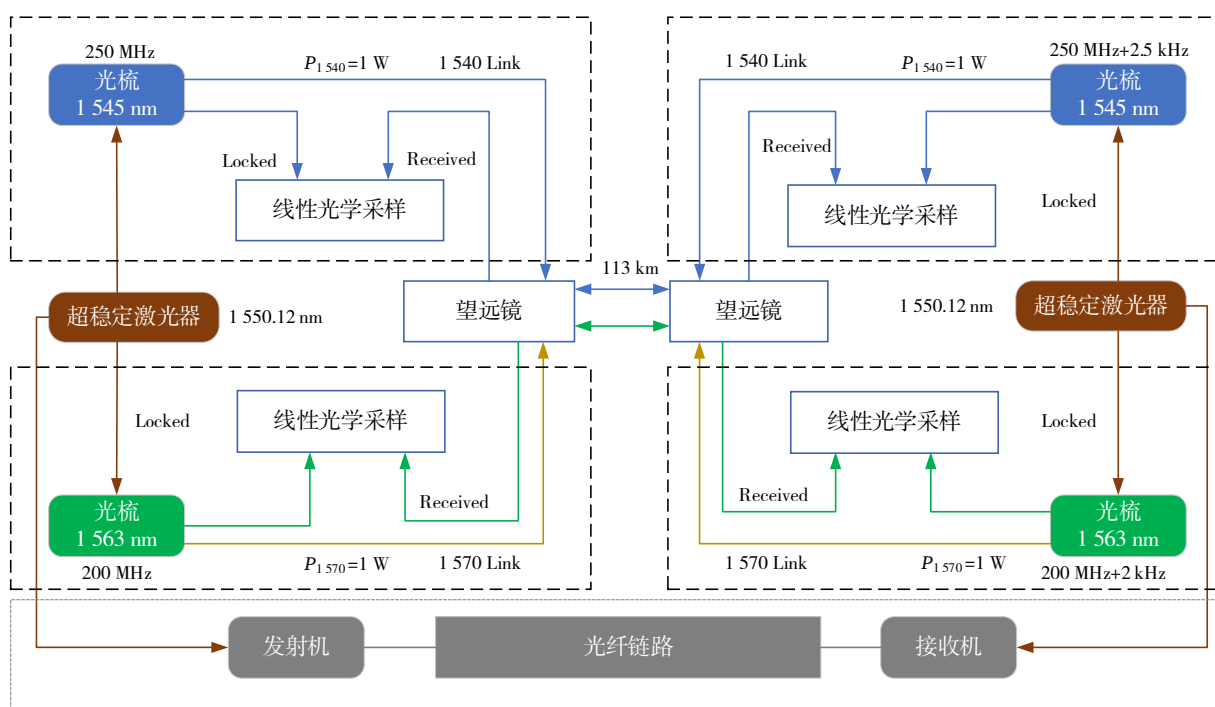


图3 113 km 链路时频传输原理图

这项实验采用了多种关键技术，例如瓦级光学频率梳、正交偏振方案以及高灵敏线性采样，这些已经得到应用和验证，这为基于光频梳的远距离自由空间时频传递奠定了基础。远距离光频梳时频传递预计将结合自由空间链路与光纤链路形成复合光学链路，也将从点对点传输向网络化时频传输方向发展，以针对未来不同网络结构的同步需求，实现不同系统结构和信号信息的传输功能。单一的点对点时频传递已经无法满足一些特定场合的应用需求。时频组网相对于点对点传输具有更强的抗干扰性及更高的可靠性等优势，因此必然会成为未来的发展趋势。低轨卫星互联网已纳入我国“十四五”新基建范畴，我国正加强卫星通信顶层设计，推动高轨卫星中低轨卫星协调发展，推进卫星通信系统与地面通信系统深度融合，形成天地一体的信息网络。

3.2 量子通信技术发展，推动安全时频传递

时频传递技术正朝着更高精度更高性能发展，但相较于基础科学研究及精密测量领域，在应用更加广泛的国防、军事等领域，同步精度并不是首要问题，这些领域对时频同步的安全性要求极高。如果遭到恶意攻击，可能导致时间误差，进而

引发网络瘫痪、设备损坏等严重问题。这不仅会造成巨大经济损失，还可能威胁到国家社会的安全。量子信息技术的发展，为时频传递提供了新思路新方法。

量子密钥分发（QKD）和一次性密钥（OTP）可以为通信提供信息论的安全性指导，由于激光的飞行性质和与当今基于光纤的电信网络的兼容性，激光是实现QKD的最佳选择。虽然QKD已经广泛部署在许多城域光纤网络中，但其大规模实现仍具有挑战性。首先采用完美的单光子源和探测器时，QKD才具有理想的安全性，但理想装置很难实现，装置的缺陷会导致漏洞破坏安全性，研究人员提出了许多安全协议防止设备缺陷，包括诱骗态QKD和测量设备无关（MDI）-QKD。其次大规模部署将导致高信道损耗和退相干，目前有量子中继器和可信中继两种方案，前者在实际运用会受到量子存储器性能限制，后者需要对所有中继节点进行保护才能实现安全通信。2009年，中国合肥市演示了一个实际应用的QKD网络。其中电话语音信号通过量子密钥与OTP进行加密编码和解码，量子密钥还与高级加密标准（ASE）系统结合，大大提高了通信速率。目前中国已建成世界上最长的量子安全通信骨干网，从北京至上

海, 光纤距离超过 2 000 km, 骨干网连接北京、济南、合肥、上海四个城域网, 32 个节点每两个相邻之间进行量子密钥分发。使用接收到的密钥进行异或操作, 并沿线路传递量子密钥, 京沪骨干网与四大城域网一起具有实际应用价值, 目前在银行、证券和保险领域的实际应用正在试验中^[62]。

QKD 密钥速率与信道透射率呈线性关系, 严重限制了其可行传输距离, 长距离光纤信道进行 QKD 密钥速率很低, 相比之下, 自由空间信道衰减没有那么显著, 为实现更远距离乃至全球化的量子通信提供了一种有效的解决方案。2016 年 8 月, 首颗量子科学卫星 Micius 墨子号在中国酒泉发射升空, 量子通信迈入空间领域的研究阶段。Micius 卫星为一颗低轨道卫星, 轨道高度约 500 km, 该卫星上的一个有效载荷上安装了诱骗态 QKD 发射机, 通过向地面站发射量子信号执行下行链路 QKD, 传输距离长达 1 200 km, 其卫星 QKD 方案在 273 s 覆盖时间内的信道效率比光纤 QKD 方案高出约 20 个数量级, 星地下行链路的量子密钥分发实现了 1.1 kbit/s 的成码率, 基于纠缠的星地量子密钥分发实现了下行链路的 3.5 bit/s 的成码率。后续墨子号量子卫星被用作可信中继, 在中国和欧洲多个远程位置之间分发安全密钥, 在 2018 年, 基于墨子号卫星成功建立了第一个洲际量子通信网络, 实现了洲际间的量子密钥分发^[63]。

中国科学技术大学的研究团队开展了双光子 (HOM) 干涉的相关研究, 他们于 2020 年通过开发稳定的自适应光学系统完成了高精度时间同步和远距离的独立光子源之间的频率锁定, 并在 19.2 km 的城市大气信道上实现了与测量设备无关的量子密钥分配 (MDI-QKD)^[64]。此外, 还提出了一种基于卫星的量子安全时间传递 (QSTT) 协议, 以 Micius 量子卫星为基础, 验证了基于 QSTT 的关键技术, 包括卫星到地面的单光子信号时间传递、通过 QKD 生成安全密钥、量子加密数据安全传输等, 证明了量子时间传递的精度可达 30 ps^[65]。2022 年, 相关团队利用自由空间信道演示了在 SPDC 工程中产生的单光子对之间的双光子 (HOM) 干涉。高可见度表明, 即使在自由空间传输后, 单光子的量子特性依然存在, 利用自由空间信道实

现量子干涉是可行的^[66]。

上述量子通信工作为基于卫星和主干光纤网络的全球量子通信网络的构建提供了基础, 将时频传递与量子保密通信相结合, 可以形成新型的安全时频传递策略, 未来可以基于空间量子通信网络来构建更安全的时频传递网络, 推动激光时频传递的应用和发展。

4 结论

本文分别从非相干激光脉冲测量方案和相干激光测量方案两个方面介绍了国内外自由空间激光时频传递技术的研究进展, 并探讨了将时频传递技术与量子通信结合形成安全时频传递的发展趋势。自由空间相干激光时频传递稳定度可以达到天稳 10^{-19} 量级, 远优于自由空间微波时频传递方案, 其传递的灵活性也使得其应用越来越广泛。另外, 时频传递技术也将与许多通信技术结合, 向着激光通信、测距、探测一体化, 星载激光通信终端小型化、微型化, 天地网络化发展。总之, 自由空间激光时频传递以其高精度、高稳定度、高灵活性等优势会在未来的时频传递领域得到越来越广泛的应用, 对精确导航定时、相干相控阵、大地测量、天文观测、大型科学工程、物理常数测定等多个领域具有重要意义。

参考文献:

- [1] 方鹏程. 本地及远程的自参考光钟比对关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 2022.
- [2] 武文俊. 卫星双向时间频率传递的误差研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2012.
- [3] 朱玺. 光纤时间频率同步网络技术及应用[D]. 北京: 清华大学物理系, 2016.
- [4] 袁一博. 光纤网络时间频率传输与同步技术研究[D]. 北京: 清华大学物理系, 2017.
- [5] ESTEBAN H, PALACIO J, GALINDO F J, et al. Improved GPS-based time link calibration involving ROA and PTB[J]. IEEE Transactions on UFFC, 2010, 57(3): 714-720.
- [6] 王晔. 基于 GNSS 共视的远程时间频率溯源的性能提

- 升方法研究[D]. 北京: 北京交通大学交通信息工程及控制, 2018.
- [7] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
- [8] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [9] 杨旭海, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4):1-10.
- [10] 班亚, 袁静, 罗浩. 基于 NIMDO 的精密时间频率溯源系统[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(7): 21-24+76.
- [11] WANG W X, DONG S W, WU W J, et al. Evaluation of Asia-Europe TWSTFT links using the express-80 satellite[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2022, 25(6): 19-24.
- [12] 高喆, 王威雄, 王翔, 等. 基于 Express-80 的卫星双向时间频率传递方法[J]. 导航定位学报, 2023, 11(4): 24-30.
- [13] 杨文可. 高精度站间双向时间频率传递关键技术研究[D]. 湖南: 国防科技大学工学, 2014.
- [14] 张升康, 杨文哲, 王学运, 等. 卫星双向时间频率传递研究进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 11-19.
- [15] 王翔, 宋会杰, 郭栋, 等. 卫星双向时间传递链路性能优化方法研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(4): 254-261.
- [16] LIN H T, HUANG Y J, TSENG W H, et al. Recent development and utilization of two-way satellite time and frequency transfer[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2012, 27(1): 13-22.
- [17] VAN B D, AXELRAD P, PALO S. Design of a high-stability heterogeneous clock system for small satellites in LEO[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3):1-14.
- [18] 闫冰, 张鹏, 赵亚飞. 面向低轨卫星导航的时频基准实现方法[C] // 第十四届中国卫星导航年会——S04 时间频率与精密授时, 济南: 中国卫星导航年会组委会, 2024: 62-67.
- [19] 王翔, 王为. 我国天宫空间站研制及建造进展[J]. 科学通报, 2022, 67(34): 4017-4028.
- [20] 白燕, 陈晓锋, 李玮, 等. 一种低轨航天器与北斗卫星高精度时间传递方法及其初步试验验证[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(8): 177-188.
- [21] 江中泽. 基于光纤的时频传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学电子工程学院, 2022.
- [22] 卢樟健, 蒙艳松, 王国永, 等. 基于光梳的自由空间双向时频传递技术研究现状及趋势[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 1-7.
- [23] 姚渊博. 基于激光的高精度时频传递技术研究[D]. 西安: 中国空间技术研究院西安分院信息与通信工程, 2018.
- [24] 刘旭超, 刘彦丹, 张磊, 等. 时间频率传递技术研究进展[J]. 现代信息科技, 2021, 5(11): 31-34.
- [25] MENG W D, ZHANG H F, HUANG P C, et al. Design and experiment of onboard laser time transfer in Chinese Beidou Navigation Satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6): 951-958.
- [26] PROCHAZKA I, YANG F M. Photon counting module for laser time transfer via Earth orbiting satellite[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56: 253-260.
- [27] 戴辉. 基于墨子号卫星的激光时间传递的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学量子信息物理学, 2018.
- [28] FRIDELANCE P, SAMAIN E, VEILLET C. T2L2-time transfer by Laser link: a new optical time transfer generation[J]. *Experimental Astronomy*, 1997, 7(3): 191-207.
- [29] SAMAIN E, FRIDELANCE P. Time transfer by laser link (T2L2) experiment on Mir[J]. *Metrologia*, 1998, 35(3): 151-159.
- [30] EXERTIER P, SAMAIN E, BONNEFOND P, et al. Status of the T2L2/Jason2 experiment[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(12): 1559-1565.
- [31] SAMAIN E, ROVERA G D, TORRE J M, et al. Time transfer by laser link (T2L2) in noncommon view between Europe and China[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(6): 927-933.
- [32] 孙延光, 徐敏, 陈亚晴, 等. 自由空间激光时频传输研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 43-51.
- [33] 杨文可, 孟文东, 韩文标, 等. 欧洲空间原子钟组 ACES 与超高精度时频传递技术新进展[J]. 天文学进展, 2016, 34(2): 221-237.

- [34] DEGNAN J J. Compact laser transponders for interplanetary ranging and time transfer[C]// Proceedings 10th International Workshop on Laser Ranging. Shanghai: [s.n.], 1996: 11-15.
- [35] DEGNAN J J. Asynchronous laser transponders for precise interplanetary ranging and time transfer[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3-4): 551-594.
- [36] CHEN Y, BIRNBAUM K M, HEMMATT H. Active laser ranging over planetary distances with millimeter accuracy[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(24): 241107.
- [37] BLAZEJ J, PROCHAZKA I, KODET J, et al. Indoor demonstration of free-space picosecond two-way time transfer on single photon level[C]// Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans III, [S.l.]: International Society for Optics and Photonics, 2014: 9224: 92241E.
- [38] NIE J, YANG L, DUAN L. Atmospheric transfer of a radio frequency clock signal with a diode laser[J]. Applied Optics, 2012, 51(34): 8190-8194.
- [39] 陆启明. 空间时频传递中的线性光学采样技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [40] 苗菁. 自由空间时间频率同步[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [41] CHEN Y Q, JIANG M Y, CHENG N, et al. Stable radio-frequency transfer over free space by passive phase correction[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 5503308(1-9).
- [42] SPRENGER B, ZHANG J, LU ZH, et al. Atmospheric transfer of optical and radio frequency clock signals[J]. Optics Letters, 2009, 34(7): 965-967.
- [43] DJERROUND K, SAMAIN E, CLAIRON A, et al. A coherent optical link through the turbulent atmosphere[J]. EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, 2010: 1-6.
- [44] GOLLAPALLI R P, DUAN L Z. Atmospheric timing transfer using a femtosecond frequency comb[J]. IEEE Photonics Journal, 2010, 2(6): 904-910.
- [45] GIORGETTA F R, SWANN W C, SINCLAIR L C, et al. Optical two-way time and frequency transfer over free space[J]. Nature Photonics, 2013, 7(6): 435-439.
- [46] SINCLAIR L C, BERGERON H, SWANN W C, et al. Comparing optical oscillators across the air to milliradians in phase and 10^{-17} in frequency[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(5): 050801.
- [47] BODINE M I, ELLIS J L, SWANN W C, et al. Optical time-frequency transfer across a free-space, three-node network[J]. APL Photonics, 2020, 5(7): 076113(1-8).
- [48] SINCLAIR L C, SWANN W C, BERGERON H, et al. Synchronization of clocks through 12 km of strongly turbulent air over a city[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(15): 151104(1-4).
- [49] SWANN W C, BODINE M I, KHADER I, et al. Measurement of the impact of turbulence anisoplanatism on precision free-space optical time transfer[J]. Physical Review A, 2019, 99(2): 23855(1-7).
- [50] BERGERON H, SINCLAIR L C, SWANN W C, et al. Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 9768-9776.
- [51] KHADER I, BERGERON H, SINCLAIR L C, et al. Time synchronization over a free-space optical communication channel[J]. Optica, 2018, 5(12): 1542-1548.
- [52] 于连栋, 朱家圣, 陆洋. 高精度自由空间光学时频基准传输技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 126-134.
- [53] JANG H, KIM B S, CHUN B J, et al. Comb-rooted multi-channel synthesis of ultra-narrow optical frequencies of few Hz linewidth[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 7652(1-8).
- [54] KANG H J, YANG J, CHUN B J, et al. Free-space transfer of comb-rooted optical frequencies over an 18 km open-air link[J]. Nature Communications, 2019, 10: 12443-12450.
- [55] YANG J, LEE D I, SHIN D C, et al. Frequency comb-to-comb stabilization over a 1.3 km free-space atmospheric optical link[J]. Light-Science & Applications, 2022, 11(1): 2207-2216.
- [56] HOU D, ZHANG D N, SUN F Y, et al. Free-space-based multiple-access frequency dissemination with optical frequency comb[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19199-19205.
- [57] 侯冬, 张大年, 孙富宇, 等. 高精度自由空间时间与

- 频率传递研究[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 219-227.
- [58] YANG H L, WANG H F, WANG X Y, et al. Picosecond-precision optical two-way time transfer in free space using flexible binary offset carrier modulation[J]. *Osa Continuum*, 2020, 3(5): 1264-1273.
- [59] YANG H L, ZHANG S K, ZHAO H, et al. Phase-coherent asynchronous optical sampling system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 37040-37048.
- [60] SHEN Q, GUAN J Y, ZENG T, et al. Experimental simulation of time and frequency transfer via an optical satellite-ground link at 10^{-18} instability[J]. *Optica*, 2021, 8(4): 471-476.
- [61] SHEN Q, GUAN J Y, REN J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km[J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 661.
- [62] ZHANG Q, XU F H, CHEN Y A, et al. Large scale quantum key distribution: challenges and solutions[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 24260-24273.
- [63] 沈奇, 戴辉, 龚云洪, 等. 量子信息技术在时频传递中的应用[J]. 北京电子科技学院学报, 2019, 27(3): 1-9.
- [64] CAO Y, LI Y H, YANG K X, et al. Long-distance free-space measurement-device-independent quantum key distribution[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 1-14.
- [65] DAI H, SHEN Q, WANG C Z, et al. Towards satellite-based quantum-secure time transfer[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(8): 848.
- [66] LI S L, YONG H L, LI Y H, et al. Experimental demonstration of free-space two-photon interference[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11684-11692.