

激光与光电子学进展

高精度自由空间光学时频基准传输技术研究进展

于连栋*, 朱家圣, 陆洋

中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266555

摘要 自由空间时频基准传输是全球授时与同步、高速宽带通信、卫星编队飞行和空间物理参数监测等应用的关键技术,光钟技术的发展对光学时频基准传输精度提出了更高的要求。本文介绍了国内外自由空间光学时频基准传输技术的研究进展,重点介绍了不同研究机构基于光学频率梳开展的大气湍流相位噪声和空间噪声补偿方法,以满足高精度时间和频率基准的传输要求,最后对自由空间光学时频基准传输技术的应用进行了总结和展望。

关键词 仪器,测量与计量;时频基准传输;自由空间;光学频率梳;光学链路

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222673

Research Progress of High Precision Free Space Optical Time-Frequency Reference Transfer Technology

Yu Liandong*, Zhu Jiasheng, Lu Yang

College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China),

Qingdao 266555, Shandong, China

Abstract Free space time-frequency reference transfer is the key technology in the application such as global timing and synchronization, high-speed broadband communication, satellite formation flight, and space physical parameter monitoring. The development of optical clock technology puts forward higher requirements for the transfer accuracy of optical time-frequency reference. This paper introduces recent research progress on free space optical time-frequency reference transfer technology, especially the phase and space noise compensation methods based on optical frequency comb carried out by different research institutions, to satisfy the high precision time-frequency transfer under atmospheric turbulence. Finally, the applications using free space optical time-frequency transfer technology are summarized and prospected.

Key words instruments, measurement and metrology; time-frequency reference transfer; free space; optical frequency comb; optical link

1 引言

时频基准传输技术在无线通信、时钟比对、定位导航等领域具有广泛的应用^[1-7],目前新型原子钟的频率精度已经达到 10^{-19} 量级,而现有传统的时频基准传输一般采用无线微波传输技术^[8],传输精度较低,无法满足超高精度时频基准的传输、相对论检验、量子精密测量等技术需求。随着光纤技术的发展,基于光纤的光学频率基准传输精度能够达到 10^{-19} @1000 s量级^[9],时间传输精度达到了飞秒量级^[10-11]。然而,受限于光纤的铺设条件,光纤光学时频基准传输无法适用于航空、

航天环境的卫星编队飞行和空间通信等应用^[12]。因此,为了突破传输范围和应用环境的限制,国内外多家高校及研究机构开展了远距离自由空间的光学时频基准传输技术研究,克服了大气湍流、光源噪声和光链路搭建等问题^[13-14],实现了高精度自由空间时间频率基准传输,取得了重要的研究进展。本文从频率基准传输、时间基准传输和时间频率基准传输三个方面对高精度自由空间光学时频基准传输技术的国内外研究现状进行了分析和总结,并对该技术在下一代通信、物理学领域和太空通信的应用进行了介绍。

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-29; 录用日期: 2022-11-04; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2019YFE0107400)、国家自然科学基金(52005147)

通信作者: liandongyu@upc.edu.cn

2 自由空间光学频率基准传输

光学频率基准在远距离自由空间传输时,大气湍流会导致大气温度和密度的随机变化,从而导致大气折射率的随机变化,这种变化会造成频率偏移和光束漂移,频率偏移会导致相位噪声的产生,影响频率基准传输的稳定度,光束漂移会导致光束接收功率的下降,影响传输距离。为了解决上述问题,研究人员开展了利用声光调制器(AOM)进行光学双向传输相位噪声补偿的研究,应对大气湍流造成的相位上的频率偏移,使用四象限光电探测器(QPD)监测光束位置,调整转向镜使光束对齐,应对大气湍流造成的空间上的光束漂移,在此基础上,研究人员基于光学频率梳频率提取技术实现了多模式的频率基准传输,下面本节进行详细介绍。

2.1 相位噪声补偿技术

激光在自由空间中传输由于大气湍流会引入相位噪声,并导致功率不稳定,限制了传输精度和距离。2010年,巴黎天文台的 Wolf 等^[15]采用 1064 nm Nd:YAG 激光器光源开展了 5 km 自由空间光学时频基准传输,如图 1 所示。该系统利用 AOM 使本地光频率偏移 200 MHz,并与远端返回的光束进行拍频,拍频信号产生的差值通过锁相环作用于电压控制振荡器(VCO),实现在大气环境下频率基准传输时的相位噪声监测,该系统达到了 1.3×10^{-14} @1 s 的频率传输稳定度。

上述自由空间光学传输系统虽然没有进行相位噪

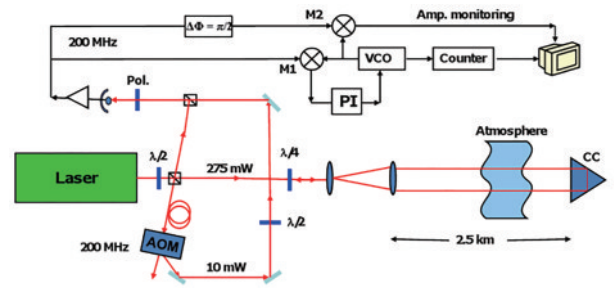


图 1 巴黎天文台的自由空间频率基准传输装置图^[15]
Fig. 1 Free space frequency reference transfer device of Observatoire de Paris^[15]

声补偿,但采用的反馈测量理念对后来的高精度时频传输实验方案设计有着重要的影响。2018年,西澳大利亚大学(UWA)的 Gozzard 等^[16-17]使用频率为 193 THz 的连续激光器作为光源,如图 2 所示,在发射端将光信号分为参考光和传输光,传输光信号经过 AOM 调制后发射到接收端,接收端的部分光信号经过 AOM 双向调制后返回发射端,并与参考光拍频产生 $240 \text{ MHz} + \Delta e$ 的测量信号,将该测量信号与本征参考源进行拍频得到大气湍流引入的相位噪声信号 Δe ,从而利用发射端的 AOM 对发射端的传输光反馈控制,实现相位噪声补偿。在此系统基础上,UWA 分别搭建了 150 m 和 600 m 的自由空间测试链路,光学频率基准传输稳定度相比不使用相位补偿技术提高了 3 个数量级,分别达到了 5.7×10^{-18} @1 s 和 8.9×10^{-18} @1 s 的频率传输精度。

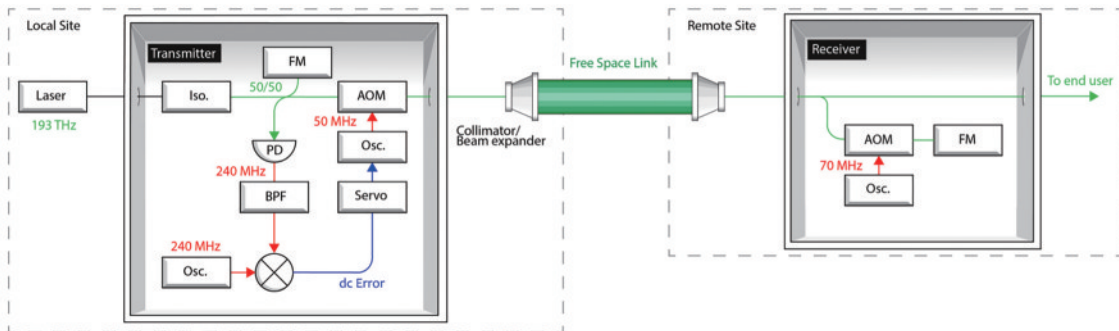


图 2 自由空间相位稳定的频率传输系统^[16]
Fig. 2 Free space phase-stabilized frequency transfer system^[16]

2.2 基于四象限探测的自适应调控技术

2021年,UWA 的 Dix-Matthews 等^[18]在之前搭建的相位补偿系统基础上,设计了基于四象限探测的自适应调控装置,抑制光束经过大气湍流时造成的光束漂移,如图 3 所示。实验中,光信号通过自由空间链路传输,被接收端接收后进行分束,其中一束光进入 QPD,用于检测光束中的空间波动,利用比例积分控制器对主动镜的反射角度进行反馈控制,使入射光束保持在 QPD 的中心位置,从而抑制光束的波动,提高光束的传输效率。实验的本地站点和远程站点分别位

于 UWA 距离 265 m 的两座大楼上,同时站点之间还建立了 715 m 的地下光纤链路,其中光纤链路的设置是为了验证自由空间传输的性能。当自适应调控开启时,该系统频率传输的稳定度达到了 1.6×10^{-19} @40 s。

2.3 基于光学频率梳的多模式光传输技术

高精度光学时频基准传输是高带宽相干光通信的技术保障,为了满足相干光通信对多频率相干光的传输需求,2019年,韩国科学技术院(KAIST)的 Kim 团队^[19]基于光学频率梳实现了多模式相干光的提取,如图 4(a)所示,他们首先将光学频率梳锁定至高稳定光

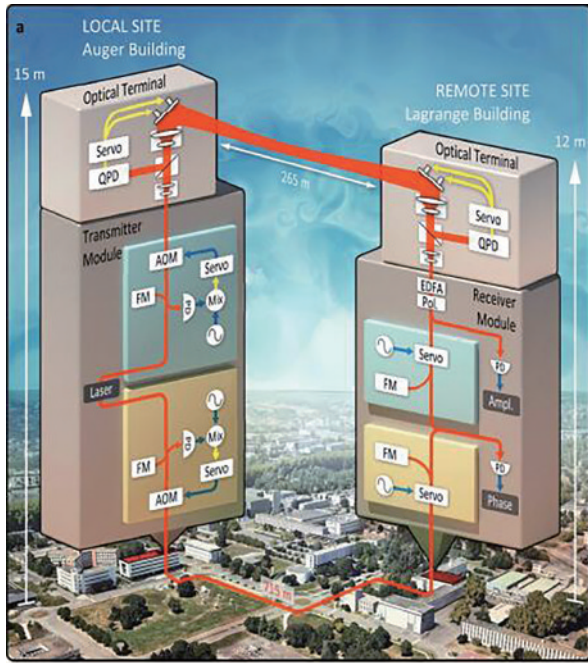


图 3 UWA 的频率基准传输原理图^[18]

Fig. 3 Schematic of frequency reference transfer of UWA^[18]

学腔,其次采用了光纤法布里-珀罗滤波器(FFP)和光纤布拉格光栅(FBG)进行级联式频率提取,再利用分布式反馈式激光二极管(DFB LD)进行中心频率功率放大和边带功率抑制,从而实现高精度窄线宽的光学频率提取。

同年,该课题组基于光学频率梳多模式光提取开展了 18 km 的高精度自由空间光学时频基准传输^[20],如图 4(b)所示。该系统利用光纤将光学频率梳系统提取的波长为 λ_{11} 、 λ_c 、 λ_{12} 、 λ_{13} 的单频光分别引入站点 A 和站点 B,利用光波分复用器(WDM)将不同频率的光合频合束,并经过掺铒光纤激光放大器(EDFA)放大,由 A 站点的光扩束准直模块输出,经过反射镜反射,由 B 站点的光扩束准直模块接收,其中波长为 λ_c 的单频光经过空间光链回路,回到 A 站点,通过锁相环(PLL)回路控制在 AOM 对光学频率的传输误差进行相位补偿,实现高精度光学双向时间频率传输,并通过 B 站点不同频率的相干信号对时间频率基准传输精度进行验证。实验表明,经过相位噪声补偿后,频率稳定度达到 10^{-16} @0.1 s 量级。

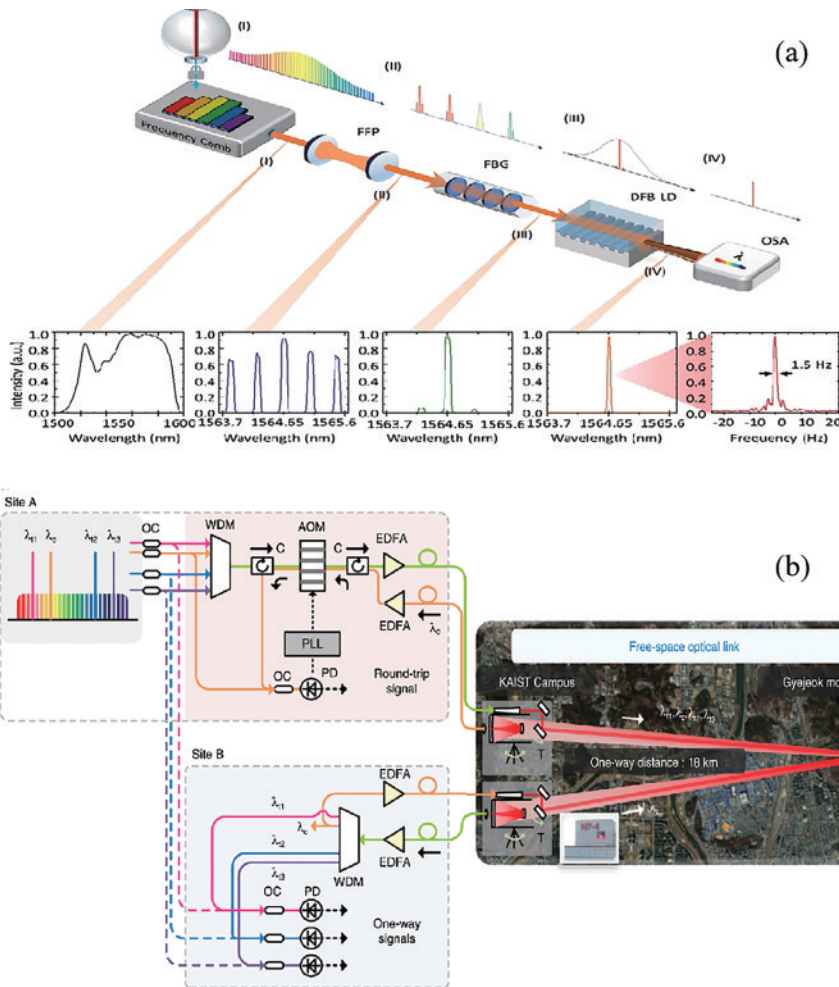


图 4 KAIST 的频率基准传输原理图。(a) 提取模式光原理图^[19]; (b) 18 km 自由空间链路上光学频率基准传输原理图^[20]

Fig. 4 Schematic of frequency reference transfer of KAIST. (a) Schematic of extracting patterns of light^[19]; (b) schematic of optical frequency reference transfer in 18 km free-space link^[20]

为了补偿大气湍流造成的光束漂移,提高光功率传输效率,KAIST在望远镜系统中引入了光束跟踪控制模块^[21]。该模块采用数字CCD相机捕获信标激光进行大范围跟踪控制,调整收发器支架的旋转,使得信标激光始终位于相机的中心位置;采用调整快速转向镜进行高精度小范围跟踪控制,使激光信号聚焦在位置灵敏探测器的中心位置,有效提高了信号光功率的传输效率。2022年,该研究团队通过1.3 km自由空间链路将光学频率梳中提取的两个模式光传输到远程站点,并与远程站点的光学频率梳锁相^[22]。实验结果表明,频率传输稳定度达到 $1.7 \times 10^{-15} @ 0.1 \text{ s}$,该技术能用于远距离地对地或地对卫星的各种应用。

3 自由空间光学时间基准传输

基于光学频率梳的时间基准传输技术为全球授时与同步、光钟网络等研究领域提供重要技术支撑,时间基准传输的稳定度是该技术的关键指标,同时,面向地球-卫星、卫星-卫星等时间基准传输的空间应用需求,研究人员开展了网络化时间基准传输技术研究,本节主要介绍利用线性光学采样(LOS)技术实现时间延迟测量以及多节点高精度时间基准传输的相关研究工作。

2016年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的Sinclair等^[23]基于双光学频率梳LOS技术在12 km的强湍流链路上进行了时钟同步实验,如图5(a)所示。主站点和远程站点均设置有时钟频率梳,主站点还设置有传输频率梳。两个光学时钟时间差的测量通过LOS技术实现,光学频率梳之间的脉冲发生周期性干涉,利用平衡探测器将光信号转换为电信号,模数转换器(ADC)把电信号转换为数字信号,在控制器中计算出时间差^[24-25]。远程站点使用比例积分反馈将时间与主站点的光学时钟同步。站点之间的环外链路用于时钟同步的验证。实验测量时间总共6个月,使用自制光学终端,积分时间100 s后时间基准传输偏差优于10 fs,使用商用自适应光学终端,积分时间2 s后时间基准传输偏差优于1 fs。2019年,该研究团队面向地球-卫星移动时间同步应用需求,开展了双光梳自由空间光钟时间基准传输技术研究^[26]。他们在每个站点设置了两个终端,终端之间的距离可以在0.045~1.100 m之间改变,实现了非等距双向时间基准传输。实验选取了5个不同的终端间隔距离,在自由空间链路为2 km情况下,积分时间在1 ms~1000 s之间时,时间基准传输偏差均优于10 fs。理论上,该实验装置适用于在距离更长的自由空间时间基准传输并保障时间传输精度^[26-27]。

北京无线电计量测试研究所的张升康团队^[28]也对自由空间光学时间传输技术进行了研究,两个站点均设置有中心波长为1550 nm的光学频率梳,并锁相到同一铷原子钟。利用异步光学采样技术,实现了700 m

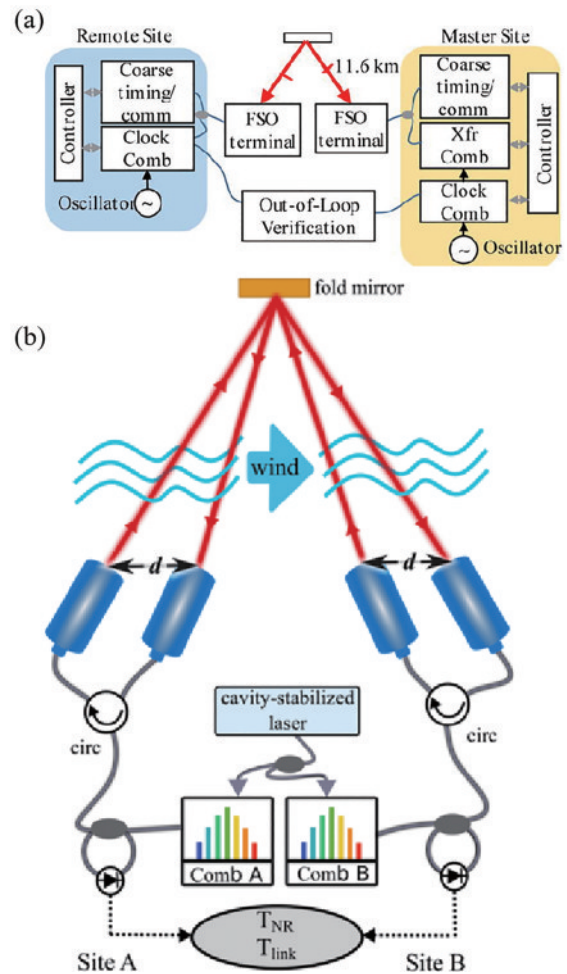


图5 NIST的时间基准传输原理图。(a) 12 km链路上的时钟同步原理图^[23]; (b) 移动平台的时钟同步原理图^[26]

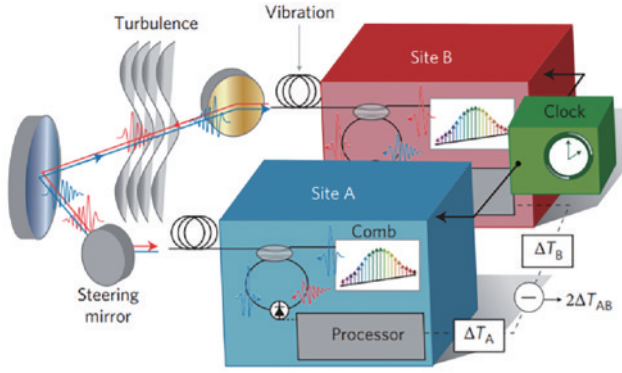
Fig. 5 Schematic of time reference transfer of NIST. (a) Schematic of clock synchronization on 12 km link^[23]; (b) schematic of clock synchronization on mobile platform^[26]

自由空间传输链路时间延迟飞秒级精密测量,时间传输的稳定度达到58 fs@1 s。

4 自由空间光学时间频率基准传输

为满足搭建光学时钟网络、地对卫星以及卫星间的远距离光通信等需求,研究人员开展了自由空间光学双向时间频率基准传输等技术的研究,大多利用双向链路互易性的特点,采用差分混频方法消除大气湍流造成的相位噪声,测得站点间的相对频率传输稳定度,并模拟了地面到太空轨道链路的光学时频基准传输,下面本节对国内外研究进展进行详细介绍。

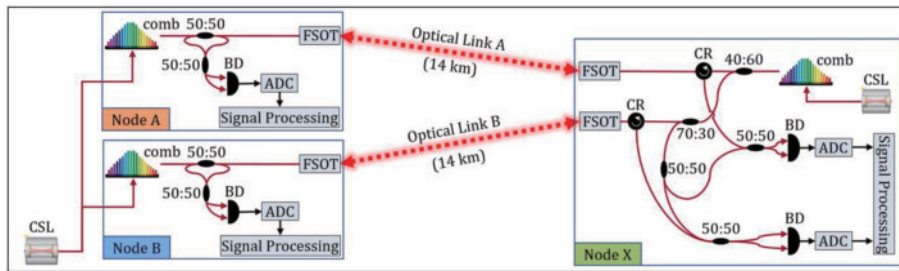
2013年,NIST的Newbury的研究团队^[29]使用光学双向时间频率传输技术,在2 km自由空间链路上进行了光学时钟的比对,如图6所示。两个站点的光学频率梳重复频率分别为100 MHz和100.003 MHz,由于存在0.003 MHz的频率偏差,双光梳脉冲可以产生周期性干涉,根据干涉信号计算出光学时钟的时间

图 6 NIST 的光学双向时频基准传输原理图^[29]Fig. 6 Schematic of optical two-way time-frequency reference transfer of NIST^[29]

差,实现本征信号与传输信号之间的飞秒量级时延测量。实验结果表明,在积分时间为 1000 s 时,传输的稳定度可以达到 10^{-18} 量级以下,时间偏差优于 1 fs。2018 年,该团队进一步改进了实验系统,在自由空间 4 km 的自由空间链路上进行了时频基准传输实验^[30],

时间传输精度达到 $7 \text{ as}@1 \text{ s}$,频率传输精度达到 $1.2 \times 10^{-17}@1 \text{ s}$ 。

2020 年,上述 NIST 的研究团队搭建了 28 km 的三节点网络的光学频率梳双向时频传输系统^[31],如图 7 所示。每个节点均设置有光学频率梳和收发器模块,收发器模块由自由空间光学终端、外差接收器和数字信号处理器构成,时频基准信号从 A 站点发射,经 X 站点中继后,传输到 B 站点。X 站点同时连接 A 站点和 B 站点,因此它的收发器模块包括两个自由空间光学终端和两个外差接收器。实验系统在 2018 年 12 月(冬季)和 2019 年 7 月(夏季)进行了两次测量以验证环境温度对时频基准传输系统的影响。实验表明,在环境温度为 0°C 以下或 30°C 以上时,会出现部分电子设备故障和激光器温度失稳的情况,影响了频率和时间的传输;在环境温度为 $0\sim 30^\circ\text{C}$ 之间时,该系统频率传输精度达到 $8.0 \times 10^{-17}@10 \text{ s}$ 。该团队还将该系统与点对点链路传输系统进行了对比,证明了在远距离自由空间链路中三节点网络系统具备与点对点链路传输系统相同的时频基准传输精度。

图 7 三节点网络光学时频基准传输原理图^[31]Fig. 7 Schematic of optical time-frequency reference transfer in three-node network^[31]

国内一些高校和研究机构也开展了自由空间光学时频基准传输技术的研究。2021 年,中国科学技术大学(USTC)潘建伟团队^[32]模拟了地面到卫星的光学时频基准传输实验。他们首先分析了不同轨道上卫星的参数,发现高轨道链路具有较大的公共视野范围和较低的相对论效应的优势,可以实现稳定的时间频率的比较或传输。为了验证通过中地球轨道或地球静止轨道链路进行时频传输的可能性,他们搭建了一个 16 km 的自由空间光学链路,如图 8(a)所示。装置的两个站点都配置了光学频率梳并锁定到超稳光学腔,通过改变链路损耗模拟地球静止轨道链路光信号传输,在链路损耗为 72 dB 的情况下,频率传输精度达到 $3.0 \times 10^{-14}@1 \text{ s}$,时间传输精度优于 10 fs。2022 年,为了进一步模拟基于卫星的自由空间时频基准传输,该团队搭建了 113 km 自由空间的时频基准传输链路^[33],如图 8(b)所示。该系统中每个终端分别使用了波长为 1540 nm 和 1570 nm 的高功率光学频率梳,两个 LOS 模块,一个光学收发望远镜和一个作为参考的时钟源,采用正交偏振的方法将光信号的接收和发射分开,两

个光学收发望远镜都具有跟踪功能,并且安装了信标激光器。在接收光路中插入了可变形镜来补偿大气湍流造成的光束畸变,从而提高光信号从自由空间到单模光纤的耦合效率,根据光学线性采样信号的峰值电压、有效数据速率和统计损耗分布确定链路损耗,测得在跟踪功能和光束畸变补偿功能开启时,光信号在 113 km 的链路中功率损耗为 66~83 dB 之间,平均损耗为 74 dB。该时频基准传输实验共进行了 3 周,获得了 12 个数据集,每次连续采集时间在 13.6~27.8 h 之间。实验结果表明,链路的时间偏差约为 1 fs,频率基准传输精度为 $3.0 \times 10^{-19}@10000 \text{ s}$ 量级。

2018 年,电子科技大学(UESTC)的侯冬等^[34-35]使用光学频率梳进行了自由空间的时频传输,在 60 m 长的自由空间链路上,5000 s 内的时间波动为 224 fs,分数频率不稳定性为 $8.0 \times 10^{-14}@1 \text{ s}$ 。2021 年,该团队利用可编程串行时间编码/解码器演示了在 120 m 自由空间链路上的时频基准传输方案^[36-37],如图 9 所示。在站点 A,时间编码器首先对时钟信号进行串行编码,然后将编码信号调制到激光器上,经过远处平面镜反

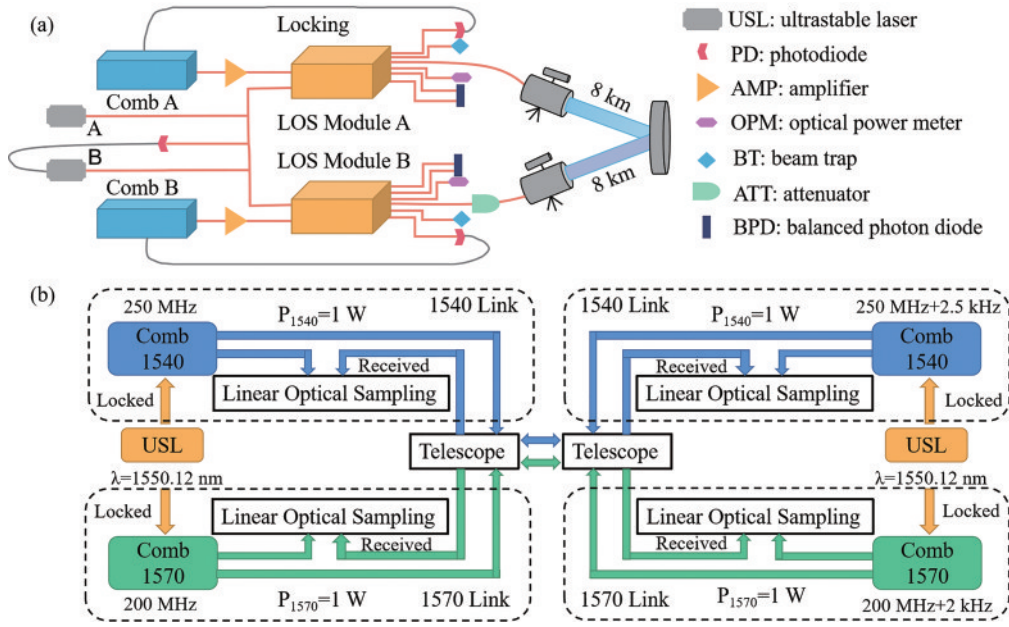


图 8 USTC 的时频基准传输原理图。(a) 模拟地到卫星链路原理图^[32]; (b) 113 km 链路时频基准传输原理图^[33]

Fig. 8 Schematic of time-frequency reference transfer of USTC. (a) Schematic of simulated ground to satellite link^[32]; (b) schematic of 113 km link time-frequency reference transfer^[33]

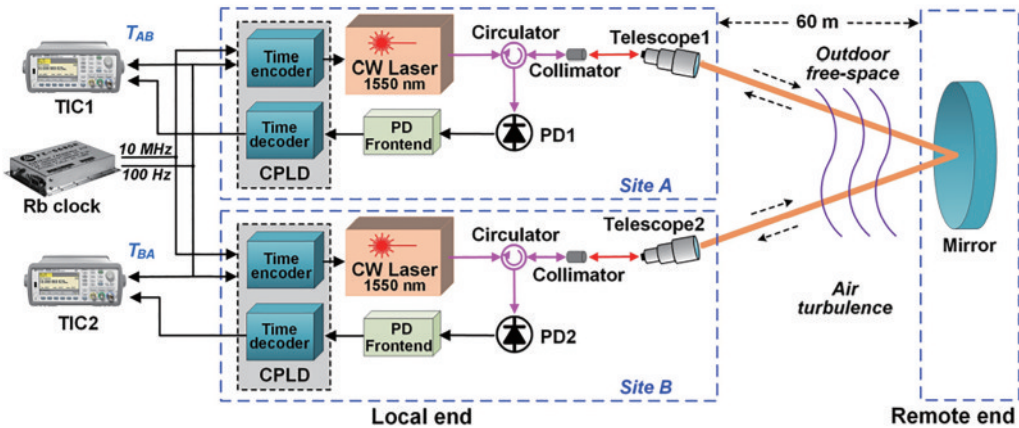


图 9 UESTC 的时频基准传输原理图^[36]

Fig. 9 Schematic of time-frequency reference transfer of UESTC^[36]

射后, 光束被站点 B 的光电二极管接收。利用时间解码器恢复脉冲信号和时间信息, 通过时间间隔计数器 (TIC) 测量本地与接收到的信号之间的时间差, 测量出从站点 B 到站点 A 的时间延迟, 该系统的时间基准传输精度为 70 ps@1 s。

图 10 从传输距离和频率基准传输精度两个方面对国内外主要研究单位在自由空间时频基准传输技术领域的研究现状进行了归纳, 图中 KAIST 测得的频率基准传输精度为积分时间 0.1 s 时测得, 其他均是在积分时间 1 s 时测得, 同时在表 1 中总结了频率基准传输和时频基准传输实验中光源、传输距离和传输稳定性三个方面的参数。可以看到, 尽管我国在高精度自由空间时频基准传输技术研究方向较晚, 在频率和时间传输精度方面和国外先进水平仍有差距, 但在近几年

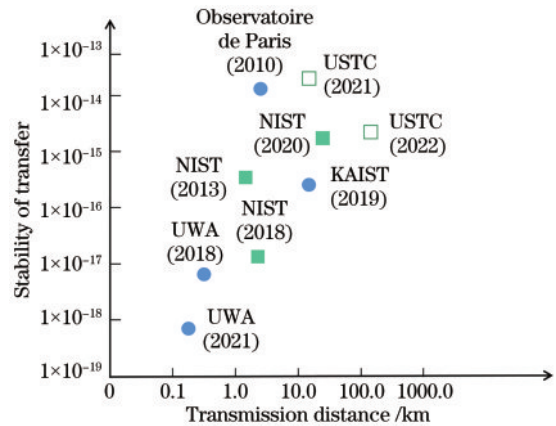


图 10 各研究单位传输距离和传输精度对比图

Fig. 10 Comparison chart of transfer distance and accuracy in each research unit

表 1 各研究单位自由空间光学时频基准传输研究进展

Table 1 Research progress of free space optical time-frequency reference transfer in each research unit

Research unit	Optical source	Path length /km	Transfer accuracy
Observatoire de Paris ^[15]	1064 nm Nd:YAG laser	5	$1.3 \times 10^{-14}@1\text{ s}$
NIST ^[29]	Optical frequency comb	2	$5 \times 10^{-16}@1\text{ s}$
UWA ^[16]	1550 nm continuous laser	0.6	$8.9 \times 10^{-18}@1\text{ s}$
NIST ^[30]	Optical frequency comb	4	$1.2 \times 10^{-17}@1\text{ s}$
KAIST ^[20]	Optical frequency comb	18	$3.54 \times 10^{-16}@0.1\text{ s}$
NIST ^[31]	Optical frequency comb	28	$2.5 \times 10^{-15}@1\text{ s}$
UESTC ^[36]	1550 nm continuous laser	0.12	$1.4 \times 10^{-10}@1\text{ s}$
UWA ^[22]	1550 nm NKT Photonics X15 laser	0.265	$8 \times 10^{-19}@1\text{ s}$
USTC ^[32]	Optical frequency comb	16	$3 \times 10^{-14}@1\text{ s}$
USTC ^[33]	Optical frequency comb	113	$2 \times 10^{-15}@1\text{ s}$

有了快速发展,特别是在传输距离方面有着突破性进展。

5 自由空间光学时频基准传输的应用

5.1 下一代无线通信

下一代无线通信信号的频率为太赫兹级别,使用太赫兹频率的激光进行光通信将会大幅度提升传输速度,相比目前的信号能提升 10 到 100 倍,对远距离的无线通信,高精度自由空间时频基准传输技术可以传输太赫兹信号。德国卡尔斯鲁厄理工学院的 Koos 等^[38]利用 Kramers-Kronig(KK)方案简化接收机,进行相干太赫兹通信。KK 接收机中使用了一个高速肖特基势垒二极管作为包络检测器,代替了原来复杂的电路。实验利用 16 进制正交振幅调制,实现了在 110 m 自由空间链路上以 0.3 THz 的载波频率进行 115 Gbps 的净速率传输。2019 年,KAIST 利用上述相位噪声补偿系统,在自由空间 1.4 km 的链路上进行了相干光通信实验,取得了不错的效果^[20]。2021 年,KAIST 成功合成了频率为 0.1~1.1 THz 的光信号^[39],线宽为 2 mHz,稳定度达到 $3.26 \times 10^{-15}@1\text{ s}$ 。实验中设计的太赫兹合成器,光源是由掺铒光纤振荡器产生的光学频率梳,重复频率为 100 MHz,并稳定到具有超低膨胀系数的光学腔中。利用上述基于光频梳提取多模式相干光的技术提取出一对模式光,通过光混合器转换为太赫兹光。实验利用三对模式光,合成了 0.10、0.66、1.06 THz 三个光束,并测得稳定度达到 $3.60 \times 10^{-17}@82\text{ s}$ 。他们提出的太赫兹合成器相比之前,具有合成频率范围广和频率稳定性高的优势,对下一代无线通信的发展具有重大意义。

5.2 改进超轻玻色子暗物质模型

相对论测地线等高精度基础物理参数测试对时频基准传输技术提出了较高的要求^[40-41],一些模型假设暗物质由超轻玻色子粒子组成,原子钟的频率比对于其中的基本常数的变化很敏感,而目前达到的精度可以进行超轻玻色子暗物质的探测。NIST 在 2020 年搭

建的光学时钟网络中有一条 3.6 km 光纤链路和一条 1.5 km 自由空间链路,在链路上进行 $^{27}\text{Al}^+$ 、 ^{87}Sr 、 ^{171}Yb 三个光学时钟的对比^[42],该网络采用了 5 个光学频率梳和 20 多个相位稳定的光纤链路,测量得出 Al^+/Yb 、 Al^+/Sr 、 Yb/Sr 的频率比都达到了 10^{-18} 数量级。得到的高精度时钟频率比改善了玻色子暗物质模型中的约束条件,使得可探测粒子质量提高了一个数量级。

5.3 面向太空任务的光通信

高精度自由空间时频基准传输技术是实现光通信的基础,因此在太空任务中该技术是必不可少的。美国航空航天局(NASA)早在 2009 年就计划发射月球大气和尘埃环境探测器,它会进行从月球轨道到地面移动终端的高速率激光通信^[43]。2013 年,NASA 进行了月球激光通信实验^[44],并取得了巨大的成功。该系统在下行链路上的传输速率达到 622 Mbps,上行链路的传输速率达到 20 Mbps。月球激光通信演示(LLCD)是世界上第一个成功从月球轨道到地面进行双向激光传输的系统。LLCD 成功后,NASA 又开展了激光通信中继演示(LCRD),实现了从地球静止轨道向地面或低地球轨道的用户进行双工数据传输^[45-46],传输速率达到 2.88 Gbps。

6 结 论

本文分别从时间基准传输、频率基准传输和时间频率基准传输这三个方面,介绍了国内外在自由空间光学时频基准传输方面最新的研究进展,重点介绍了不同研究机构基于光学频率梳开展的大气湍流相位噪声和空间噪声补偿方法。相比单模式激光,光学频率梳时频基准传输技术能够同时实现时间基准和多模式频率基准传输,具有更加广泛的应用场景。目前,自由空间光学时频基准传输已经达到了很高的精度,未来该技术会进一步向着光源小型化、链路系统网络化和更远的传输距离发展,在高精度授时和同步、太空通信和空间物理参数监测等应用中得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Riehle F. Optical clock networks[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 25-31.
- [2] He Y B, Baldwin K G H, Orr B J, et al. Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 138-146.
- [3] Li B H, Rizos C, Lee H K, et al. A GPS-slaved time synchronization system for hybrid navigation[J]. *GPS Solutions*, 2006, 10(3): 207-217.
- [4] Levine J. A review of time and frequency transfer methods[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S162-S174.
- [5] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, et al. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(2): 021101.
- [6] Takano T, Takamoto M, Ushijima I, et al. Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 662-666.
- [7] Gozzard D R, Howard L A, Dix-Matthews B P, et al. Ultrastable free-space laser links for a global network of optical atomic clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(2): 020801.
- [8] 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.
Hou D, Zhang D N, Sun F Y, et al. Research on high-precision free-space time and frequency transfer[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2018, 41(3): 219-227.
- [9] Deng X, Liu J, Jiao D D, et al. Coherent transfer of optical frequency over 112 km with instability at the 10^{-20} level[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(11): 114202.
- [10] Kim J, Cox J A, Chen J, et al. Drift-free femtosecond timing synchronization of remote optical and microwave sources[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 733-736.
- [11] Calonico D, Bertacco E K, Calosso C E, et al. High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642-km fiber link[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(3): 979-986.
- [12] 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): 170004.
Sun Y G, Xu M, Chen Y Q, et al. Research progress on free-space laser time-frequency transfer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170004.
- [13] Sinclair L C, Giorgetta F R, Swann W C, et al. Optical phase noise from atmospheric fluctuations and its impact on optical time-frequency transfer[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(2): 023805.
- [14] Robert C, Conan J M, Wolf P. Impact of turbulence on high-precision ground-satellite frequency transfer with two-way coherent optical links[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(3): 033860.
- [15] Djerroud K, Samain E, Clairon A, et al. A coherent optical link through the turbulent atmosphere[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, April 13-16, 2010, Noordwijk, Netherlands. New York: IEEE Press, 2010.
- [16] Gozzard D R, Schediwy S W, Stone B, et al. Stabilized free-space optical frequency transfer[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(2): 024046.
- [17] Dix-Matthews B P, Gozzard D R, Karpathakis S F E, et al. Ultra-wideband free-space optical phase stabilization[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(5): 1610-1614.
- [18] Dix-Matthews B P, Schediwy S W, Gozzard D R, et al. Point-to-point stabilized optical frequency transfer with active optics[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 515.
- [19] 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.
- [20] 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: 4438.
- [21] Yang J, Kang H J, Lee K, et al. Phase-stabilized free-space link for optical frequency transfer[J]. *Optics Communications*, 2022, 504: 127481.
- [22] 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: 253.
- [23] 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.
- [24] Deschênes J D, Sinclair L C, Giorgetta F R, et al. Synchronization of distant optical clocks at the femtosecond level[J]. *Physical Review X*, 2016, 6(2): 021016.
- [25] Sinclair L C, Swann W C, Deschênes J D, et al. Optical system design for femtosecond-level synchronization of clocks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9763: 976308.
- [26] 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): 023855.
- [27] Ellis J L, Bodine M I, Swann W C, et al. Scaling up frequency-comb-based optical time transfer to long terrestrial distances[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(3): 034002.
- [28] 付洋, 吴寒旭, 杨文哲, 等. 自由空间飞秒激光双向时间传递[C]//第十三届中国卫星导航年会论文集. 北京: 中国卫星导航学术年会, 2022: 93-95.
Fu Y, Wu H X, Yang W Z, et al. Two-way femtosecond laser time transfer via a free-space link[C]//Proceedings of the 13th China Satellite Navigation Annual Conference. Beijing: China Satellite Navigation Conference, 2022: 93-95.
- [29] 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): 434-438.
- [30] 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.

- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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): 661-666.
- [34] 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.
- [35] Guo G K, Hou D, Sun F Y, et al. Laser-based atmospheric radio-frequency transfer with sub-picosecond timing fluctuation using single phase compensator[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 526-530.
- [36] Ren J W, Hou D, Li Z, et al. Outdoor atmospheric optical two-way time transfer with serial time code[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(4): 045102.
- [37] Tian J, Li X L, Ji Z Y, et al. Sub-hundred-femtosecond atmospheric radio-frequency transfer with frequency comb using fast optical phase compensation[C]//2021 IEEE 21st International Conference on Communication Technology, October 13-16, 2021, Tianjin, China. New York: IEEE Press, 2021: 1500-1503.
- [38] Harter T, Füllner C, Kemal J N, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(10): 601-606.
- [39] Shin D C, Kim B S, Jang H, et al. Optical cavity-referenced terahertz synthesizer with 15-digit short-term stability[EB/OL]. (2022-05-06) [2022-09-30]. <https://www.researchsquare.com/article/rs-1088136/v1>.
- [40] Derevianko A, Pospelov M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks[J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 933-936.
- [41] Wcisło P, Ablewski P, Beloy K, et al. New bounds on dark matter coupling from a global network of optical atomic clocks[J]. *Science Advances*, 2018, 4(12): eaau4869.
- [42] Beloy K, Bodine M I, Bothwell T, et al. Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network[J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 564-569.
- [43] Boroson D M, Scozzafava J J, Murphy D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD)[C]//2009 Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, July 19-23, 2009, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 23-28.
- [44] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8971: 89710S.
- [45] Cornwell D M. NASA's optical communications program for 2017 and beyond[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 10-14.
- [46] Biswas A, Srinivasan M, Rogalin R, et al. Status of NASA's deep space optical communication technology demonstration[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 23-27.