Chinese Journal of Scientific Instrument

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311910

光纤时间频率同步技术及应用*

陈雨锋^{1,2,3,4}.王 波^{1,2,3}

(1. 清华大学精密仪器系 北京 100084; 2. 时空信息精密感知技术全国重点实验室 北京 100084;3. 光子测控技术教育部重点实验室 北京 100084; 4. 中国兵器工业导航与控制技术研究所 北京 100089)

摘 要:时间是人类目前测量和复现不确定度指标最高的物理量,代表了人类科技发展的最高水平。光纤时频同步技术经过几 十年的发展,目前已广泛应用于量子计量、射电干涉测量、定位导航、现代通信、电力电网、高能物理、大地测量等诸多领域,成为 人类社会高效运行的重要支撑。得益于光纤时频同步技术的高可靠性和高稳定度,综合原子时"分布式"和"实时性"这一长期 存在的矛盾得到了解决。文章介绍了光纤时频同步技术的发展历史、各技术路径的研究现状,以及基于北京地区光纤时频同步 网生成的分布式实时综合原子时。在此基础上,指出光纤时频同步的发展重点正从技术研究转为大规模网络化应用,开展基于 光网络的多功能、多应用融合研究,实现一体化通信、感知、计算、测量、控制,将是未来的重要发展趋势。

关键词:光纤网络;时间同步;频率同步;光载射频;综合原子时

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Fiber-optic time and frequency synchronization technology and its applications

Chen Yufeng^{1,2,3,4}, Wang Bo^{1,2,3}

(1. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Precision Space-time Information Sensing Technology, Beijing 100084, China; 3. Key Laboratory of Photonic Control Technology (Ministry of Education), Beijing 100084, China; 4. China Ordnance Navigation and Control Technology Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: Time is the physical quantity with the best measurement uncertainty at present, representing the highest level of science and technology. After decades of development, fiber-optic time and frequency synchronization (FOTFS) technology has been widely used in many fields such as quantum metrology, radio interferometry, navigation, modern communication, power grid, high-energy physics, geodesy and so on. It has become a vital support for the efficient operation of human society. Thanks to the high reliability and stability of FOTFS technology, the long-standing contradiction between "distribution" and "real-time" of ensemble time scale has been solved. The paper introduces the development history of FOTFS technology and the research status of each technology path. At the same time, a real-time free-running time scale based on the Beijing FOTFS network is also introduced. Based on this foundation, it is pointed out that the development focus of FOTFS is shifting from technical research to large-scale networked applications. Conducting multi-functional and multi-application integrated research based on optical networks, to achieve integrated communication, sensing, computing, measurement, and control, will be an important development trend in the future.

Keywords: fiber network; time synchronization; frequency synchronization; radio over fiber; ensemble time scale

0 引 言

作为国际单位制的 7 个基本物理量之一,时间是人 类目前测量和复现不确定度指标最高的物理量,代表了 人类文明发展的最高水平,许多物理单位的复现均需溯 源至时间。而频率作为时间的"孪生"物理量,与时间紧 密联系,相辅相成,共同构筑人类社会高效运行的时频基 石。随着量子频标的出现和发展,国际秒定义从原来的 天文定义转到了量子基准^[1],而量子频标的发展进一步

*基金项目:国家自然科学基金(61971259,62171249)、科技部重点研发计划(2021YFA1402102)、清华大学自主科研计划项目资助

收稿日期:2023-09-11 Received Date: 2023-09-11

推动了时间频率同步技术的发展。

光纤具有传输损耗低、传输稳定度高、抗电磁干扰等 特性,是传输时间频率信号的良好媒介。而且,全球光纤 资源丰富,目前铺设的光纤总里程已超过30亿千米,光 纤网络已经成为人类社会最大的基础设施之一^[2]。此 外,光纤时频同步技术还广泛应用于射电干涉测量、高能 物理、定位导航、电力电网、现代通信、大地测量学等诸多 领域[3-13],成为人类社会高效运行的重要支撑技术。以 射电天文观测为例,平方公里阵列(Square Kilometre Array, SKA)是由中国、英国、南非、澳大利亚等 16 个国 家共同参与的国际大科学工程。作为下一代射电望远 镜,SKA 建成后将成为全世界最大、分辨率最高、最灵敏 的综合孔径射电望远镜^[14]。SKA 采用干涉测量技术,将 天线以阵列的形式连接在一起。为了让数百甚至数千个 天线能够像一个望远镜一样连贯地工作,SKA 需要高精 度的光纤时频同步系统,以保证天线阵列在观测时的高 相参以及用于记录数据的时间戳的同时性。

一直以来,受限于原子钟信号传输过程中引入的噪声,空间分散的多个原子钟组难以生成实时综合原子时 信号;而空间集中的原子钟组,虽然能生成实时综合原子 时信号,却无法消除同地钟组的关联影响,进而影响综合 原子时的稳定度。由于上述矛盾的存在,分布式实时综 合原子时的研究基本为空白。随着高精度光纤时频同步 技术的发展,异地原子钟的实时高精度比对得以实现,这 也使得原子钟组的"分布式"和综合原子时的"实时性" 这一矛盾关系有望解决。

本文简要回顾了光纤时频同步技术的发展历史,并 详细介绍了光纤频率同步技术的三种实现方式:光载射 频传输、光频传递以及光频梳传输。接着介绍了现有的 两种主要的光纤时间同步方法:光纤双向时间比对法和 光纤环回法。这两种方法均需先解算光纤链路传输时延 才能实现时间同步,过程较为复杂。进一步介绍了一种 基于时间反转的光纤时间同步方法,不需要解算光纤链 路传输时延就能实现时间同步。最后介绍了光纤时频同 步技术的应用—分布式实时综合原子时生成,解决了原 子钟组的"分布式"和综合原子时的"实时性"这一矛盾。 在此基础上,指出光纤时频同步的发展重点正从技术研 究转为大规模网络化应用,开展基于光网络的多功能、多 应用融合研究,实现一体化通信、感知、计算、测量、控制, 将是未来的重要发展趋势。

光纤时频同步技术的发展历史及分布式 实时综合原子时生成背景

光纤时频同步技术最早可追溯至 20 世纪 70 年代。 1973 年,康宁公司 Keck 等^[15]通过优化制造工艺将光纤 的衰减系数降低至2dB/km,成为低损耗光纤的一个重 要里程碑。低损耗光纤的出现和半导体激光器的发展为 光纤传输提供了良好的传输介质和光源,极大促进了光 纤传输技术的发展,也进一步启发人们思考光纤的潜在 应用方向。

美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的频率与授时系统研究组在1978年提出:可发展基 于光纤的频率和授时信号分发技术,用于降低深空网 (deep space network, DSN)的成本以及提升观测性能。 DSN 的建设目的是利用多天线的连线干涉测量,实现对 航天器的定位、导航和追踪。在干涉测量中,各天线的时 间频率参考信号的同步尤为关键。DSN 一开始利用同轴 电缆和微波链路传输时频信号,但该传输方式存在链路 损耗大、成本高、易受电磁干扰、传输性能受限等诸多问 题^[16]。为了解决上述问题.JPL 在 1980 年建立了一条 1.5 km 的多模光纤链路,并成功实现了 100 MHz 氢钟信 号的传输。传输结果表明:光纤链路可替代之前的同轴 电缆和微波链路,用于实现参考频率信号的分发^[16]。 1986年, JPL 进一步在铺设的长达7 km 的单模光纤上实 现了100 MHz 氢钟信号分发,进一步拓展了光纤分发的 距离。从环回比对的传输稳定度结果可以看出,氢钟的 稳定度没有明显的恶化。JPL 在早期铺设了单模光纤 网,用于将数据处理中心的频率参考分发至远端的深 容站。

光纤传输受温度、应力等因素影响,会引入相位扰动,且随着链路长度的增加,该相位扰动的累积量也会增加。为了降低环境温度对频率传输性能的影响,JPL曾提出采用热不灵敏光纤进行传输,其温度灵敏度是普通单模光纤的1/70。不过该特种光纤成本昂贵,难以用于长距离大规模光纤频率传输网的建设。因此在1989年,JPL开展了基于主动稳相技术的光纤频率传输研究^[17],往运传输探测链路相位扰动,并通过电学相位共轭的方式将链路引入的相位扰动进行反转,再利用高性能压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO)进行链路噪声的预补偿。相关研究工作开启了光纤时频同步技术的先河。

20世纪90年代,激光稳频技术的发展使得稳频激 光器在科学研究和工业生产等领域广泛应用。在当时, 稳定的激光频率参考通常由光学平台上一系列光学器件 组成,难以搬运。因此,将本地端稳定的光频信号通过光 纤传输至远端成为稳频激光实际应用的关键环节。而光 纤链路引入的相位扰动容易恶化激光的相噪,这对于追 求高相噪水平光学频率参考的应用(如光学频率标准和 量子光学)是不可接受的。为了实现光频的稳相传输,美 国天体物理联合实验室(Joint Institute for Laboratory Astrophysics, JILA)研究团队在1994年提出了一种光频 传递方法:通过往返传输光频信号,探测光纤链路往返传 输的总相位扰动,再基于光纤传输良好的互易性,可实现 对链路扰动的补偿^[18]。其补偿方式为反馈控制发射端 的声光调制器。最终的实验结果表明:激光的相噪恶化 能以 mHz 量级的精度进行补偿。该研究团队提出的光 频传递方案为之后基于光频传递的光纤频率同步提供了 重要参考,其反馈控制声光调制器的补偿方式成为光频 传递中链路相位扰动的主要补偿方式。

基于光频传递的光纤时频同步的传输距离长、同步 稳定度高,主要用于异地光钟的比对,助力实现基于光学 频率跃迁的下一代"秒"定义。基于光载射频传输的光 纤时频同步能够在远端复现可直接使用的时频信号,系 统可长期连续运行、可靠性高,目前已广泛应用于射电望 远镜阵列、远程原子钟比对与协同、电力电网、分布式守 时网络构建等领域。目前,随着光纤资源的日益丰富,建 设大规模光纤时频网是未来的一个重要发展趋势。欧洲 目前已开始建设基于光纤网络的时频网(time and frequency over optical networks, TiFOON),旨在发展基于 光纤的时频同步技术,使之成为时间、频率计量的通用工 具,并拓展其在大地测量学、地球观测等领域的应用。我 国也已启动大科学装置"高精度地基授时系统"建设工 作,利用通信光纤网建设覆盖主要城市和重要用户的光 纤时频传递骨干网。

由于基于卫星的时频同步系统同步稳定度受限,综合 原子时一直无法同时具备分布式和实时性这两大特性。 其中,分布式特性使得综合原子时可有效利用各地高性能 原子钟资源,有效避免同地原子钟"同快同慢"的关联影 响;而实时性特性可有效提升综合原子时性能,避免长时 间预测带来的偏差影响。因此,传统的综合原子时主要有 三类:以国际原子时和世界协调时为代表的分布式滞后综 合原子时;以中国科学院国家授时中心的独立原子时为代 表的集中式滞后综合原子时^[19];以美国国家标准与技术研 究院(National Institute of Standards and Technology, NIST) 提出的 AT1 为代表的集中式实时综合原子时^[20]。如果能 兼具分布式和实时性这两大特性,那么产生的综合原子时 可具备高可靠、高性能、关联免疫、保障战略安全等优势, 对守时系统的建设具有重要意义。

光纤时频同步技术的发展为该问题的解决带来了曙 光。与卫星时频同步相比,光纤时频同步的同步稳定度 高、实时性强。清华大学研究团队基于光纤时频同步技 术,首次实现了分布式实时综合原子时生成,解决了分布 式和实时性难以兼具的矛盾。

2 光纤频率同步技术

广义的光纤频率同步有3个主要目的:频率比对、频 率信号传递以及频率信号分发。频率比对一般用于异地 原子钟的比对,主要用于测量频率源之间的相对频率差, 并以此构建分布式守时系统。频率信号传递将高准确度 和高稳定度的频率信号传输至用户单位,以提供精确的 频率基准,是量值传递与溯源的关键环节^[19-20]。频率信 号分发是指将发射端的参考信号分发至系统的多个接收 端,以建立系统内部统一的频率标准,常用于要求高相参 信号的联合测量,如干涉测量领域。典型应用包括深空 探测网络、射电望远镜阵列以及分布式相控阵雷达。无 论是哪种目的,其实现方法都是在远端复现与本地端同 步的频率信号,即频率同步,其技术难点在于对链路噪声 的探测和补偿能力、传输距离、以及网络化应用能力。

根据传输信号的类型,光纤频率同步的实现方式可 分为:光载射频传输、光频传递以及光频梳传输。无论是 何种方式,实现光纤频率同步的关键是补偿光纤链路引 入的相位扰动,从而保证远端复现的频率信号与本地端 的参考信号具有相位一致性,即相位差保持一致。

2.1 基于光频传递的光纤频率同步

在光频传递中,由于探测光纤链路噪声的信号是频 率高达百太赫兹的光频信号,因此对链路噪声的探测灵 敏度高,频率同步稳定度高。而且,窄线宽激光器使得该 方法具有很长的相干长度(2×10⁵ km 以上),因此基于光 频传递的光纤频率同步方法传输距离远,容易实现千公 里量级的光纤频率同步,而且受色散影响程度低,不需要 进行严格的色散控制。

2003年,NIST的研究团队利用 3.45 km 的光纤链路 实现了 JILA 和 NIST 之间光学频率标准的传递和比 对^[21]。在主动补偿光纤链路引入的噪声之后,1 s 的平 均时间上,频率同步的稳定度为 3×10⁻¹⁵。2007年,NIST 的研究团队在 251 km 光纤链路上开展了光频传递实验, 在 100 s 的平均时间上实现了 6×10⁻¹⁹ 的频率传输稳定 度,并进一步理论分析了光纤链路对传输稳定度的影 响^[22]。2012年,德国马克斯·普朗克量子光学研究所 (Max-Planck Institute of Quantum Optics, MPQ)和德国联 邦物理技术研究院(National Metrology Institute of Germany, PTB)开展合作研究,在 920 km 的通信光纤上实现了光频 信号的稳相传输^[23],频率传输稳定度在 1 s 的平均时间为 5×10⁻¹⁵,在 2 000 s 的平均时间为 4×10⁻¹⁹。该研究成果为 建设大尺度光频同步网络奠定了重要基础。

2013 年,德国 MPQ 和 PTB 在原来 920 km 光频传递 的研究基础上,进一步实现了 1 840 km 光纤链路上的光 频传递,在 100 s 的平均时间上实现了 4×10⁻¹⁹ 的频率传 输稳定度^[24]。

美国 NIST 和德国 PTB 的光频传递的基本原理如 图 1 所示。在图 1 中,发射端的激光器输出的待传输光 频信号可表示为:

$$E_L = \cos(\omega_L t) \tag{1}$$



图 1 光频传递的典型原理示意图 Fig. 1 The typical schematic diagram of the optical frequency transfer

为了简化分析,主要讨论信号的相位变化项,而忽略 信号的幅值项。将 E_L 分成两路,一路作为本地拍频的参 考信号 E_1 ,另一路经过光纤环形器和声光调制器 1 (acousto-optic modulator, AOM)后,再经过光纤链路传输 至接收端,得到信号 E_2 。令 AOM1 的驱动信号为 $\cos(\omega_1 t + \varphi_1), 则 E_2$ 可表示为:

$$E_2 = \cos\left[\left(\omega_L + \omega_1\right)t + \varphi_1 + \varphi_P\right] \tag{2}$$

其中, φ_p 是单程的光纤链路引入的相位扰动。光信 号 E_2 在接收端经 AOM2 移频后得到 E_3 。 令 AOM2 的驱 动信号为 $\cos(\omega_2 t + \varphi_2)$,则 E_3 可由下式表示:

 $E_3 = \cos[(\omega_L + \omega_1 + \omega_2)t + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_p]$ (3) 光信号 E_3 被分成两路,一路为接收端的用户提供可用 的光频信号,另一路由原光纤链路返回至发射端,得到 E_i :

 $E_4 = \cos\left[\left(\omega_L + 2\omega_1 + 2\omega_2\right)t + 2\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_P\right]$ (4)

在发射端, $E_4 和 E_1$ 由光电探测器拍频探测可得到拍频信号 E_{beat} :

 $E_{beat} = \cos[(2\omega_1 + 2\omega_2)t + 2\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_P] (5)$ 利用鉴相器将 E_{beat} 与参考信号 $E_0 = \cos(2\omega_1 + 2\omega_2)t$ 进行混频鉴相(参考信号一般为原子钟信号),得到误差 信号,

$$E_{err} = \cos(2\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_p)t \tag{6}$$

再利用锁相环(phase-locked loop, PLL)对压控振荡 器进行锁相控制,系统稳定锁相时有 $2\varphi_1 + 2\varphi_2 + 2\varphi_p = C, C$ 为常数。接收端复现的光频信号为:

$$E_3 = \cos\left[\left(\omega_L + \omega_1 + \omega_2\right)t + \frac{C}{2}\right]$$
(7)

复现的光频信号 E_3 和发射端激光器输出的光频信号 E_L 保持频率同步。

我国相关单位也陆续开展了光频传递技术的有关研究。华东师范大学研究团队利用亚赫兹线宽的激光器在 82 km 光纤链路上开展了光频传递实验,实现了 4×10⁻¹⁷/s, 4×10⁻¹⁹/10⁴ s 的频率传递稳定度^[25]。中科院国家授时中心 利用级联传输和低噪声光信号放大的方式,在 224 km 光 纤链路上实现了传递稳定度为 3.39 × 10⁻¹⁶/s, 8.36×10⁻¹⁹/10⁴ s 的光频传递^[26]。中科院上海光机所在 96 km 的城市光纤中开展了光频传递实验,并对光频传输 系统的影响因素进行了深入分析,实现了 1.9×10⁻¹⁶/s, 2.2×10⁻¹⁸/10⁴ s 的频率传递稳定度^[27]。

2.2 基于光载射频传输的光纤频率同步

光频传递的同步稳定度高,传输距离远,常用于光钟 的比对,但系统的整体建设成本高。在一些只需要传输 微波原子钟信号的应用中,如射电望远镜阵列,基于光载 射频传输的光纤频率同步是一种高性价比的方式,具有 成本低、系统复杂度低、可靠性高,且能够长期稳定连续 运行等优势。从链路噪声补偿的方式看,基于光载射频 传输的光纤频率同步可分为被动补偿方式和主动补偿 方式。

1) 被动补偿方式

被动补偿方式主要利用频率成倍数关系的射频信号 构建相位共轭关系。相位共轭后的信号再次传输时可实 现链路相位扰动的自动抵消。从频率的倍数关系,被动 补偿主要可分为"1*f*-2*f*"方案^[28-32]和"1*f*-3*f*"方案^[33-36]。 其中,"1*f*-2*f*"方案主要原理如图 2 所示^[32]。图 2 中,1*f* 信号 V_1 在光纤链路中进行往返传输,引入了相位扰动 φ_p 。在发射端,利用混频等操作对 φ_p 实现相位共轭,产 生的新信号 V_3 的频率是 V_1 信号频率的两倍,而 V_3 中跟 光纤链路扰动相关的相位为 – φ_p 。因此,当 V_3 在原光纤 链路中传输时,单程链路所引入的相位扰动为 φ_p ,与相 位共轭的 – φ_p 直接抵消,实现了相位被动补偿。





"1*f*-3*f*"方案的主要原理如图 3 所示。在发射端,信 号 V₃ 的频率是信号 V₁ 的 3 倍。V₃ 经过单程链路引入的 相位扰动和 V_{IJ} 经过3次单程链路引入的相位扰动近似相等,都为 3 φ_p 。因此,在接收端对 $V_{3J,R}$ 以及 $V_{IJ,R}$ 进行混频,可以消除链路扰动 3 φ_p ,实现了相位被动补偿。



Fig. 3 The schematic diagram of the "1f-3f" scheme

2013年,北京邮电大学课题组提出了一种"1f-2f"方案,在10 km 光纤上补偿后相位抖动小于 0.05 rad^[28]。 2015年,清华大学课题组提出了一种"1f-3f"方案,在 10 km 光纤链路上频率传输稳定度可达到:6×10⁻¹⁵/s 以 及 7×10⁻¹⁷/10⁴ s^[33]。2016年,上海交通大学课题组基于 "1f-2f"的被动补偿方案,在45 km 光纤链路上开展频率 传输实验,实现了 10⁻¹⁷/20 000 s 的传输稳定度^[31]。

被动补偿方式原理简单,补偿范围大。由于未使用 主动补偿器件,系统控制难度较低,且当光纤同步链路突 然经历大幅度的扰动时,可很快恢复正常工作状态。但 由于需要对成正整数比例关系的射频信号做混频操作, 容易受混频器泄露和非线性效应影响。而且,由于未对 误差信号进行比例-积分控制,被动补偿方式对链路快速 变化的噪声抑制能力较差。

2) 主动补偿方式

主动补偿方式主要利用探相信号的往返传输探测光 纤链路的相位扰动,再利用锁相环等反馈控制环路对主 动补偿器件进行控制,从而实现射频信号的稳相传输。 根据主动补偿器件,主动补偿方式可分为光程控制方法 以及相位控制方法。光程控制方法主要利用长度可变的 光纤器件作为主动补偿器件,其中利用绕制在压电陶瓷 上的光纤可以补偿快变的链路噪声,利用放置在温控箱 的光纤盘纤可以补偿慢变的链路噪声。2010年,法国 LNE-SYTRE 实验室利用光程控制方法在 86 km 光纤链 路上实现了 1.3×10⁻¹⁵/s, 天稳优于 10⁻¹⁸ 的高稳定度频 率同步[37]。2015年,上海光机所利用光程控制方法在 50 km 光纤上实现了时间频率信号综合传输^[38],其中频 率传输稳定度为 5×10⁻¹⁴/s,2×10⁻¹⁷/10⁴ s。2019 年,重庆 光电技术研究所利用光程控制方法实现了宽频带微波频 率信号的分发^[39]。光程控制方法的传输稳定度高,由于补 偿方式是改变预置光纤的长度,因此该方法可实现同一光 纤链路中多路光信号的同时补偿。但是预置可变光纤延 迟线的补偿范围有限,因而限制了传输距离和应用场景。

相位控制方法主要利用锁相环对压控晶振输出频率

信号的相位进行控制,从而实现光纤链路扰动的补偿。 以清华大学提出的频率同步方案为例进行原理介 绍^[40],如图4所示。该频率同步方案噪声补偿的基本 原理为:往返探测链路噪声,并在发射端利用辅助信号 构造相位共轭关系,再通过锁相环控制 VCO 输出信号 的相位,从而实现噪声的主动补偿。在图4中,锁相介 质振荡器1和2(phase-locked dielectric resonant oscillator, PDRO)均参考100 MHz 原子钟信号,输出的信号分别为 V_{c1} 和 V_{c2} :

$$V_{r1} = \cos(\omega_{r1}t + \varphi_{r1}) \tag{8}$$

$$V_{r2} = \cos(\omega_{r2}t + \varphi_{r2}) \tag{9}$$

PDRO3 参考的是 VCO 输出的 100 MHz 信号, 其输 出信号 V。可表示为:

$$V_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \tag{10}$$

将探测链路噪声的探相信号 V_0 调制到波长为 1 550 nm 波段的激光器上,经过一段长度的光纤链路后 到达接收端。经掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA)放大后分成两路信号,一路沿原光纤链 路传输回发射端,被光电探测器解调后得到 V_2 ;另一路 作为接收端的可用信号 V_1 。 V_2 可表示为:

 $V_2 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + 2\varphi_P) \tag{11}$

其中, φ_p 是探相信号在单程光纤传输时引入的相位 扰动。由于光纤链路具有良好的互易性,因此可认为探 相信号在光纤链路两个方向传输所引入的相位扰动 相等。

在发射端,为了构建相位共轭关系,利用辅助信号 V_{r1} 和 V_{r2} 分别与 V_0 和 V_2 进行混频,得到 V_4 和 V_3 。将 V_4 和 V_3 、将 V_4 和 V_3 输入至鉴相器,可得误差信号 V_{error} :

 $V_{error} = \cos[(\omega_{r_1} + \omega_{r_2} - 2\omega_0)t - 2\varphi_P - 2\varphi_0] \quad (12)$ 其中, ω_{r_1} 和 ω_{r_2} 分别是 V_{r_1} 和 V_{r_2} 的角频率。将该误 差信号输入至锁相环,稳定锁相时有:

$$\omega_0 = (\omega_{r1} + \omega_{r2})/2 \tag{13}$$

$$2\varphi_P + 2\varphi_0 = C \tag{14}$$

式中:C 为常数。令参考信号 $\omega_r = (\omega_{r2} + \omega_{r1})/2$,接收端 可用信号 V_1 可表示为:

$$V_1 = \cos\left(\omega_r t + \frac{C}{2}\right) \tag{15}$$

因此,在接收端复现的频率信号 V_1 与发射端的参考 原子钟信号实现了频率同步。2012 年,清华大学基于该 方案在连接清华大学和中国计量科学研究院昌平园区的 80 km 光纤链路上,实现了 7×10^{-15} /s 和 5×10^{-19} /d 的频 率同步稳定度,能够满足光钟比对以外的绝大部分频率 同步应用的稳定度指标要求^[40]。

2017年,上海交通大学利用相位主动补偿方法,并 采用载波抑制的双边带调制,在实验室 40 km 光纤上实 现 3.9×10⁻¹⁴/s 和 2×10⁻¹⁶/10⁴ s 的频率同步稳定度^[41]。



图 4 清华大学频率同步方案原理示意图



2018年,北京邮电大学利用高性能的锁相环,对实验室1007 km 光纤链路引入的相位扰动进行主动补偿,取得了1.2×10⁻¹³/s和5.1×10⁻¹⁶/20000 s的频率同步稳定度^[42]。2019年,上海交通大学和北京理工大学合作,利用相位主动补偿方法在80 km 光纤链路上实现了传输稳定度为1.3×10⁻¹³/s和1.5×10⁻¹⁷/10⁴ s的频率传输^[43]。

基于锁相环和压控晶振的相位控制方案具有补偿范 围大、原理和系统较为简单、反馈控制方便、同步稳定度 高等优势,且能够长期连续稳定运行,适合长距离频率传 输。该方案的不足在于只能补偿单一频率信号的相位延 迟变化,无法对同一光纤的多路光信号同时进行补偿。

2.3 基于光频梳传输的光纤频率同步

光频梳信号具有多个频率差固定的光频分量,相邻 分量之间的差频即为传输的射频信号。与光频传递相 比,基于光频梳传输的光纤频率同步可在远端产生直接 可用的射频信号。2012年,英国国家物理研究院 (National Physical Laboratory, NPL)开展了基于光程补偿 的光频梳传输研究,其实验系统如图5所示^[44]。在图5 所示的方案中,锁定于氢钟的光频梳信号,其重复频率为 100 MHz。利用光分束器将光频梳信号分成两路,一路留 在发射端,被 AOM 移频 104 MHz。另一路经过单模光纤 和色散补偿光纤往返传输后,环回至发射端,并与移频后 的光频梳信号在光电探测器上进行拍频,得到的拍频再 与锁定于氢钟的 104 MHz 射频信号进行比相,产生的误 差信号对光纤拉伸器和温控光纤盘纤进行反馈控制。最 终,NPL 实现了稳定度为 2×10⁻¹⁸/4 000 s 的光频同步以 及 4×10⁻¹⁷/4 000 s 的射频信号同步^[44]。





北京大学在光频梳传递方面开展了深入研究。与光 程补偿方式不同,北京大学提出了一种控制锁模光纤激 光器的腔长和泵浦功率进行链路噪声主动补偿的光频梳 传输方案^[45-46]。并进一步提出了基于被动补偿原理的光 频梳传输方案^[47-48]。北京邮电大学在链路噪声补偿方式 上也进行了相关研究,提出了一种光学一微波锁相的方 案^[49]。光频梳传递容易受色散影响。为了减少单模光 纤的累计色散对传递稳定度的影响,英国南安普顿大学 在 2022 年利用空芯光纤代替单模光纤,在 7.7 km 空芯 光纤上开展光频梳传递。在 4 000 s 的平均时间上实现 了 1.9×10⁻¹⁹ 的光频同步以及 1.5×10⁻¹⁷ 的射频信号同 步,为该课题组当时所已知的光频梳最佳传递性能^[50]。

光频梳信号是链接射频信号和光信号的"桥梁",可 以下转换为射频信号用作各设备的参考信号。因此,基 于光频梳传输的光纤频率同步是未来光钟实际应用的重 要支撑。但是该方案存在设备成本高、系统较为复杂、远 距离传输容易受色散影响等问题。

2.4 长距离光纤频率同步

随着全球光纤资源的日益丰富,建设大尺度光纤时 频网络将是未来的一个重要发展方向。该网络可为下一 代通信 B5G/6G、下一代射电望远镜以及分布式守时授 时网络建设提供重要支撑。由于基于光载射频传输的光 纤频率同步具有成本低、系统复杂度低、可靠性高、能长 期稳定连续运行等优势,因此该技术方案被广泛用于射 电天文观测、分布式授时网络等实际应用中。该技术方 案也是未来大尺度光纤时频网络构建的重要方案。因 此,本节重点介绍国际各研究单位基于光载射频传输所 实现的长距离光纤频率同步性能,其在长距离频率传输 中的主要限制因素包括链路损耗、色散、非理想散射和非 线性效应。这些因素通过影响传输信号的信噪比造成同 步误差。随着传输距离的增加,同步误差的不断累计,进 而限制频率传输稳定度。

基于光载射频的光纤频率同步在扩展距离时主要 有两种方式:一种是利用 EDFA 等光放大器件进行光功 率衰减的及时补偿,该方式为全光传输方式;另一种是 对射频信号进行解调再生,再重新调制到新的激光器 上,该方式为级联传输方式。两种方式如图 6 所示。 在级联传输方式中,每一段的传输距离短,系统调节相 对简单。但级联传输方式通常在链路中间使用一套新 的接收系统和发射系统,导致系统整体建设成本高。 而全光传输方式在链路中间只需要放置双向光放大模 块,建设成本明显降低,但对光放大器的性能和整体增 益优化有较高要求。



图 6 不同传输方式对比示意图



2010年,日本信息与通信研究所(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)以全光 传输的方式在 204 km 的光纤链路上实现了频率同步,同 步稳定度为 5.3×10⁻¹⁴/s, 5.1×10⁻¹⁷/40 000 s^[51]。2015 年, 波兰 AGH 科技大学以全光传输的方式在 490 km 光纤链路 上开展频率同步实验,同步稳定度为 5.3×10⁻¹⁴/10 s. 1.1×10⁻¹⁷/10⁵ s^[52]。2016,中科院上海光机所以级联传输 的方式在430 km 光纤链路上开展频率同步实验,同步稳定 度为2×10⁻¹³/s,1.3×10⁻¹⁶/10⁴ s^[53]。2018年,澳大利亚国 家计量研究院以全光传输的方式在 310 km 的光纤链路上 实现了频率同步,同步稳定度为7×10⁻¹⁴/s,8×10⁻¹⁷/10⁵ s^[54]。 同年,北京邮电大学以全光传输的方式在1007 km 的光纤 链路上实现了频率同步,同步稳定度为1.3×10⁻¹³/s, 5×10⁻¹⁶/20 000 s^[42]。2022 年,法国巴黎天文台以级联传 输的方式在 500 km 光纤链路上开展频率同步实验,同步 稳定度为2×10⁻¹²/s,3.1×10⁻¹⁵/10⁵ s^[55]。同年,上海交通 大学以全光传输的方式在 540 km 光纤链路上开展频率 同步实验,同步稳定度为7.3×10⁻¹⁴/s,1.7×10⁻¹⁶/ 10⁴ s^[56]。2023 年,北京邮电大学基于锁相环相位共轭方 案.利用级联方案在实验室 3 009.8 km 光纤链路上实现 了 8.8×10⁻¹⁴/s 和 8.4×10⁻¹⁷/10⁴ s 的频率传输^[57]。

基于光载射频传输的光纤频率同步在长距离应用 时容易受色散的影响,恶化传输性能。色散的影响主 要体现在两方面:一方面导致接收端解调的射频信号 功率的降低,降低的功率值随光纤链路长度而呈现周 期性变化(功率衰荡效应):另一方面色散可与激光器 噪声相互作用,恶化传输信号的信噪比。常用的色散 补偿方法为色散补偿光纤,但该方法存在插入损耗大、 信号延迟高等问题。而啁啾光纤布拉格光栅 (chirped fiber bragg grating, CFBG)在补偿色散时具有插入损耗 小、信号延迟低等优势,适用于长距离光纤频率同步。 基于此,清华大学研究团队提出了一种色散啁啾控制 增强的双向光放大方法,如图7所示[58]。图7所示的 方法能够同时实现色散补偿、背向瑞利散射抑制和增 益可控的非对称光放大。非对称光放大是指两个方向 的光放大增益存在明显区别。在实际链路中,由于中 继节点两个方向所连接的光纤长度不同,需要放大的 光功率也不同,因此非对称放大是实际链路中一个重 要需求。



图 7 色散啁啾控制增强的双向光放大方法示意图^[58] Fig. 7 The schematic diagram of the bidirectional optical amplification method enhanced by dispersion chirp control

利用该双向光放大方法,清华大学研究团队在 2022 年构建了 500 km 光纤链路,该链路由 50 km—100 km— 150 km—100 km—100 km 共 5 节光纤组成,其中包含了 一段长达 150 km 中间无光放大的链路。链路的每个中 继节点都存在非对称的光放大需求。在 500 km 光纤链 路上以全光传输的方式开展了频率同步实验,为了方便 传输稳定度测试,发射端和接收端放置于同一房间,再利 用频率传输稳定度测试设备 5125A 进行实时测量。在测 试的 14 天时间内,相位时间差始终维持在 3 ps,频率传 输稳定度为1.7×10⁻¹⁴/s,6.7×10⁻¹⁸/d,如图 8 所示^[57],其 中 100 s 处的小鼓包是测试房间温度的周期性波动所导 致的。高稳定度的频率传输结果验证了所提出的色散啁 啾控制增强的双向光放大方法在长距离光纤频率同步的 可行性,且能够有效解决各中继节点非对称放大需求,能 够适用于复杂的实际链路。



500 km fiber link

3 光纤时间同步技术

频率同步是为了实现两地的时间间隔一致,确保 两地频率信号的高相参性。而时间同步是为了实现两 地的时刻一致或者时间差准确可知,确保两地事件发 生和记录的同时性。在时间同步系统中,我们定义提 供参考时间信号的一端为主钟端,而需要与参考时间 信号同步的一端为从钟端。理想的时间同步模式为: 主钟端向从钟端发送时间信号,从钟端接收到时间信 号后就能实现时间同步。然而,由于光速的有限性,时 间信号在光纤中传输时会存在时延。因此,在该场景 中,存在两个未知量:主钟和从钟的钟差 T_{offeet} 以及链路 时延 τ_p 。光纤时间同步的技术难点在于钟差和链路时 延的解算方式和补偿能力、链路同步距离及网络化应 用前景。

3.1 光纤双向时间比对法

为了实现时间同步,目前的光纤时间同步方法主要 有两种:光纤双向时间比对法和光纤环回法。这两种方 法都是以解算光纤链路时延为前提,从而实现时间同步。 其中,光纤双向时间比对法需要在两端进行双向时间传 输以及时差测量,具有较高的技术成熟度。为了实现两 端测量的时差数据的交互,一般需要有编码单元和解码 单元以及相应的同步协议。2011年,日本电报电话公司 利用同步数字系统,在175 km的实地光纤上开展双向时 间同步实验,最终实现时间偏差(time deviation, TDEV) 为 20 ps@1 s,长期稳定度优于 1 ns 的时间同步性能,明 显优于卫星共视法的同步性能^[59]。2009年,瑞典 SP 技 术研究所基于同步光网络/同步数字系统,在560 km 光 纤上开展时间双向传输实验,同步性能优于 1 ns^[60]。此 外,有一部分光纤双向时间比对系统直接源于卫星双向 时间比对系统。2013年,法国激光物理实验室利用卫星 双向时间同步系统的调制解调模块,将时间信号编码至 光载波上。最终在 540 km 光纤链路上实现了时间同步, 长期的 TDEV 优于 20 ps^[61]。

2014年,上海交通大学在 IRIG-B 时间信息码的基础 上进行优化,利用商用的光通信收发模块和双工器进行 调制光信号的发送和接收,同时抑制背向瑞利散射光。 两端使用时间间隔计数器进行时差的测量,并将时差进 行编码。最终在 100 km 光纤链路上开展了时间同步实 验,在1秒至1天的平均时间上,时间同步的 TDEV 均优 于 35 ps^[62]。

光纤双向时间比对目前应用广泛的一种方法是 White Rabbit(WR)时间同步方法。WR 技术发展于欧洲 核子研究组织(European Council for Nuclear Research, CERN)在大型强子对撞机(large hadron collider, LHC)方 面的研究工作。LHC 需要高精度的光纤授时网络,而 WR 技术可为数十千米内多达上千个同步需求节点提供 亚纳秒精度的时间同步^[63]。为了促进 WR 技术的发展, CERN 将其开源。目前,WR 技术已应用于我国大型高海 拔空气簇射观测站^[64],强流重离子加速器装置^[65]以及我 国参与的国际大科学工程——SKA 等大科学装置中。经 过多年的优化,WR 同步协议已被正式定为 IEEE 1588-2019 标准协议^[66-67]。

WR 技术能实现亚纳秒精度的时间同步,主要有四个方面的改进:

1)基于精密时间同步协议(precision time protocol, PTP)而非网络同步协议(network time protocol, NTP)实现时间戳数据的交互,并且直接在物理层上产生时间戳^[68-71]。

2)利用同步以太网实现网络内各设备的频率同步, 减少内部晶振的频率偏差而引入的时间同步误差^[72]。

3)使用数字双混频时差法提升两端对时差的测量分 辨率^[73]。

4)为了标校时延的非对称性,WR技术提出了WR 时延模型,可对两端的硬件时延以及链路的非对称性进 行标校^[74-77]。

PTP 的原理如图 9 所示,两端通过频繁交换时间戳 实现对链路时延和钟差的测量,并对从钟端输出的时间 信号进行实时调整,实现时间同步。在图 9 中,主钟端将 时间戳 t_1 通过"同步"消息或随后的"跟随"消息发送至 从钟端。从钟端接收到"同步"消息的时刻为 t_2 ,而发送 "时延请求"消息的时刻为 t_3 。 t_4 是主钟端接收到"时延 请求"消息的时刻,然后通过"时延回复"消息将该时间 戳发送至从钟端。至此,从钟端有 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 共 4 个时间 戳,可下述关系:

$$t_2 = t_1 + \Delta t + \tau_p \tag{16}$$

$$t_4 = t_3 - \Delta t + \tau_p \tag{17}$$

其中, Δt 是主钟端和从钟端的钟差, τ_p 是光纤链路 的单向时延。因此, 可以进一步解算出 Δt 和 τ_p , 从而实 现时间同步。

$$\Delta t = \frac{1}{2} (t_2 + t_3 - t_1 - t_4) \tag{18}$$

$$\tau_{P} = \frac{1}{2}(t_{2} + t_{4} - t_{1} - t_{3})$$
(19)



图 9 精密时间同步协议示意图

Fig. 9 The schematic diagram of the precision time protocol

近年来,光纤双向时间比对法有了新的应用。2022 年,中科院国家授时中心 50 km 光纤链路上实现了双向 量子时间同步。在具有同一参考时钟的情况下,该方案 能实现 TDEV 为 54.6 fs@ 57 300 s 的高稳定度时间同步 结果^[78]。

3.2 光纤环回法

光纤双向时间比对法的两端都具备独立的时钟。而 在一些应用场景,为了降低系统成本,只需将本地端的参 考时间信号同步分发至远端,远端直接从链路中获取时 间信号,而不需要有独立的时钟^[79]。光纤环回法可以解 决时间信号同步分发的需求,其主要原理为:通过往返探 测光纤链路的传输时延,从而确定链路的单向传输时延, 利用反馈控制系统主动预补偿链路时延变化,从而在远 端可获得与参考信号同步的时间信号。

按照传输波长类型,光纤环回法可分为单波长法、双 波长法和三波长法。其中,单波长法是指链路往返探测的 光波长是同一波长。2012年,清华大学提出了一种基于单 波长法的时间同步方案,如图 10 所示。在清华大学至中 国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)往 返 80 km 实地光纤上开展时间同步实验,参考信号与复现 信号的时间差在一天时间内的波动小于 50 ps^[40]。

单波长法能够实现链路两个方向良好的传输时延对称性,不需要对链路上下行传输时延的非对称性进行标校。但由于链路中两个方向传输的波长相同,容易受背向瑞利散射的影响,限制光纤传输距离。双波长法通过 在远端将时间信号探测解调,调制到另一波长的激光器





上再环回,从而可以进一步扩展传输距离。2013年,波 兰 AGH 科技大学提出了一种双波长环回方案,在420 km 光纤链路上开展时间同步实验,在1天的平均时间上,时 间同步 TDEV 优于1 ps^[80]。

双波长法可以实现长距离光纤时间同步,但由于色散的影响,不同波长的光信号在同一光纤传输时存在时延差。因此,双波长法需要对链路上下行传输时延差进行标校。针对该问题,上海交通大学在2020年提出了一种链路时延免标校的三波长环回方案^[81]。通过构造具有一定数量关系的三波长,可实现链路传输时延非对称性的自动抵消。但是该方案系统复杂度高,在长距离光纤时间同步场景中更具性价比。

3.3 基于时间反转的光纤时间同步

无论是光纤双向时间比对法还是光纤环回法,均需 解算链路传输时延才能实现时间同步。但时间同步的本 质目的是两端时间信号保持一致或时间差准确可知,链 路传输时延只是辅助计算的工具。如果能够不需要解算 链路传输时延就可以实现时间同步,那么系统的复杂度 将明显降低。针对该问题,清华大学研究团队在 2023 年 提出了一种基于时间反转的光纤时间同步方法^[82]。利 用在主钟端的时间反转,链路时延可在往返传输过程中 自动抵消,因此从钟端不需要解算链路传输时延便可测 得两端钟差,从而实现时间同步。该方案的同步原理如 图 11 所示。在图 11 中,主钟端的时间信号为 t_w,从钟端 的时间信号为 t_{M} + Δt , Δt 为两端的钟差。首先, 在同步请 求过程中,从钟端向主钟端发送时间信号,该时间信号经 链路传输后在主钟端探测解调,得到的时间信号可表示 为 $t_{M} + \Delta t + \tau_{P}$,其中 τ_{P} 为链路传输时延。利用时间间隔 计数器对该信号和主钟端信号 $t_{\rm M}$ 进行时差测量,得到时 差 $\Delta t + \tau_p$ 。利用该时差值对 t_M 进行时间反转,在下一个 脉冲时间信号中可得到反转后的信号 t_{M} - ($\Delta t + \tau_{P}$)。该 信号再次经过光纤后,链路传输可自动抵消。在从钟端 可探测解调得到 $t_M - \Delta t_o$ 再次经过时差测量,可得到 2Δt。因此,基于时间反转的光纤时间同步方法不需要







该方法在 230 km 光纤链路上的时间同步性能如 图 12 所示。在图 12 中,红线为该方法在 230 km 光纤链 路上的时间同步性能,在平均时间 1 000 s 时,时间同步 TDEV 为 2 ps。黑线是 230 km 链路上距离主钟端 50 km 处的时间同步下载的性能,在平均时间 1 000 s 时,时间 同步 TDEV 为 3 ps。





基于时间反转的光纤时间同步方法由于不需要解算 链路传输时延,因此可避免两端的数据层交互以及编解码 器的使用,有效降低系统的复杂度。而且,该方法同步过 程简单,实现同步的方式直接而有效。利用快速切换的光 开关技术和分时复用技术,可为多个远程用户站点提供时 间同步服务。此外,由于在光纤中传输是物理时间信号, 并非编码时间数据,因此可在链路中实现多点下载功能。

4 光纤时频同步技术的应用——分布式实时综合原子时生成

4.1 北京地区光纤时频同步网构建

基于光纤时频同步技术,将中国计量科学研究院昌

平园区、北京卫星导航中心和北京无线电计量测试研究 所共4台氢原子钟通过商用光纤在清华大学复现,并与 清华大学实验室的氢原子钟进行实时比对。如图 13 所 示为构建的北京地区光纤时频同步网,由4个单位5台 原子钟组成^[83]。其中A、B两氢钟位于中国计量科学研 究院昌平园区(NIM-CP),氢钟C位于北京卫星导航中心 (Beijing Satellite Navigation Center, BSNC),氢钟D位于 北京无线电计量测试研究所(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, BRIM),氢钟E位于清华大 学(Tsinghua University, THU)。



图 13 北京地区光纤时频同步网示意图^[83] Fig. 13 The schematic diagram of Beijing time-frequency synchronization network

4.2 同地氢钟相关性测试

利用北京地区光纤时频网,可开展对同地氢钟的相 关性测试实验。被测试的两台氢钟为中国计量科学研究 院的 A、B 氢钟。两台原子钟 A 和 B 之间的相关系数用 $\gamma_{AB}(\tau)$ 表示,定义为 A、B 之间相关项的一半与两钟各自 的绝对稳定度乘积的比值,即:

$$\begin{split} \gamma_{AB}(\tau) &= \frac{C_{AB}(\tau)}{2\sigma_{A}(\tau) \cdot \sigma_{b}(\tau)} \\ \text{相关系数具有以下性质:} \\ 1) 对称性: \gamma_{AB}(\tau) &= \gamma_{BA}(\tau); \end{split}$$
(20)

2) $|\gamma_{AB}(\tau)| \leq 1$ 。当 $\gamma_{AB}(\tau) = 1$ 时, A、B两钟线性正 相关;当 $\gamma_{AB}(\tau) = -1$ 时, A、B两钟线性负相关;当 $\gamma_{AB}(\tau)$ = 0时, A、B两钟不相关。 $|\gamma_{AB}(\tau)|$ 越大, 表示 A、B两钟 的相关性越大。

经过连续 59 天的测试,基于式(20)计算得到的两氢 原子钟在不同平均时间的相关性如图 14 所示。从图中 可以看出,相关系数 $\gamma_{AB}(\tau)$ 在平均时间小于1000 s 时一 直保持在0 附近。而在平均时间1000 s 之后, $\gamma_{AB}(\tau)$ 保 持正值并迅速增长,至平均时间约 10⁵ s 时,相关系数增 长至超过0.8,达到峰值。在平均时间超过10⁵ s 后,相关 系数开始回落,在平均时间5天时,该相关系数回落至 0.5左右。





4.3 分布式实时综合原子时生成

分布式实时综合原子时可将异地原子钟构成钟组, 实现钟组成员间的关联免疫,避免同地原子钟的相关性 对综合原子时的影响。基于北京地区光纤时频同步网, 在清华大学复现了其他三家单位的氢钟信号,以清华大 学本地的氢钟信号为参考,一共利用4台异地的氢钟信 号实现了分布式实时综合原子时(time scale on fiber network,TSFN)^[84]。其核心算法是在 NIST 的 AT1 算法 的基础上进行优化,增加了干扰免疫等算法,使其更适合 于实际系统。干扰免疫算法通过测量得到的原子钟相位 数据判断原子钟或传输链路的健康状态,通过控制权重 和修饰钟差的方式,避免综合原子时出现跳变,保证其信 号连续平稳。

TSFN 系统里 4 台原子钟在连续 224 天测试时间中 的权重变化如图 15 所示^[84]。各原子钟的权重在经过了 约 20 天的"假稳定"状态之后,进入了稳定状态。稳定状 态从约 2.7×10⁶ s 时开始,此后的时间各原子钟均处在 "正常状态"而非"干扰状态"时,它们的权重虽有上下浮 动,但基本保持稳定。

为了分析 TSFN 综合原子时的稳定度,采用了"N角帽法"^[85-86]和"相关性钟组法"^[87]两种方法分别求解了综合原子时与钟组内其他各原子钟的独立稳定度。如图 16 所示。图 16(a)为利用"N角帽法"求解的独立稳定度。由于该方法不需要去除原子钟的频率漂移项,因此图中各原子钟的稳定度在平均时间约 10⁵ s之后均向上翘起,这是由频率漂移导致的。图 16(b)为利用"相关性钟组法"求解的独立稳定度。由于"相关性钟组法" 需要去除原子钟的频率漂移,图 16(b)的所有结果均不



图 15 四台氢钟在实验期间的权重变化^[84] Fig. 15 The weight changes of the four H-maser clocks during the experiment

10-12 Η, Н, -Η, Η, 10 TSFN 阿伦偏差 10-14 10-15 100 101 10^{2} 103 10^{4} 106 10 平均时间/s (a)利用"N角帽法"解算出的独立稳定度[84] (a) Individual frequency stabilities calculated with the N-cornered-hat algorithm 10-12 Η Н, Η, 10-1 Η, TSFN) 第 10-14 第 10-15 10-16 100 10^{1} 10^{2} 10^{3} 10^{6} 10^{4} 10 平均时间/s (b)利用"相关性钟组法"解算出的独立稳定度[84] (b) Individual frequency stabilities calculated with the correlated clock-ensemble algorithm 图 16 解算出的各氢钟和 TSFN 的独立稳定度^[84]



含频率漂移,因此图中阿伦偏差在10⁵ s 后不上翘。利用 两种不同算法得到的结论基本一致。

图 16 为两种不同方法解算出的综合原子时和钟组 内各原子钟的独立稳定度。可以看出,平均时间 3 000 s 之后,生成的综合原子时的稳定度优于钟组内任一原子 钟的稳定度。连续测试期间,链路的传输故障并未影响 综合原子时的连续稳定,验证了所提出的分布式实时综 合原子时生成方法的可行性和可靠性。研究成果为解决 综合原子时的"分布式"和"实时性"之间长期存在的矛 盾提供重要参考,并在实验上初步证明了利用光纤网络 进行守时的可行性和优越性。

5 结 论

本文简要回顾了光纤时频同步技术的发展历史,并 分别总结了光纤频率同步技术和光纤时间同步技术各自 的技术路径。其中,光纤频率同步技术主要从基于光频 传输的光纤频率同步、基于光载射频传输的光纤频率同 步和基于光频梳传输的光纤频率同步三个方面进行介 绍。光纤时间同步技术主要从光纤双向时间比对法、光 纤环回法、基于时间反转的光纤时间同步三个方面进行 介绍。本文最后介绍了清华大学分布式实时综合原子时 生成的研究进展。

光纤时频同步技术在技术原理上已经取得了长足的 发展,未来需提升其工程化应用的成熟度,发挥其在同步 精度上的优势,进一步拓展光纤网络这一重要基础设施 在通信之外的功能,构建可服务于国家重要需求的大规 模光纤时频同步网络。同时,需发展更为成熟的时频安 全监测与保障体系,保证时频同步网络的安全性,并进一 步开发基于光网络的大规模感知技术,在同一光网络中 进行多功能、多应用融合,实现一体化通信、感知、计算、 测量、控制。

参考文献

- BROWN R J C. Revision of the international system of units (Background paper) [J]. Analytical Methods, 2019, 11(12): 1577-1579.
- [2] BALLATO J. Optical fiber: Through the looking glass[J]. Optics and Photonics News, 2022, 33(1): 32-40.
- [3] MATVEEV A, PARTHEY C G, PREDEHL K, et al. Precision measurement of the Hydrogen 1S-2S frequency via a 920 km fiber link [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(23): 230801.
- [4] JIANG Z, CZUBLA A, NAWROCKI J, et al. Comparing a GPS time link calibration with an optical fibre selfcalibration with 200 ps accuracy [J]. Metrologia, 2015, 52(2): 384-391.
- [5] GUTIÉRREZ-RIVAS J L, TORRES-GONZÁLEZ F, ROS
 E, et al. Enhancing white rabbit synchronization stability and scalability using P2P transparent and hybrid

clocks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7316-7324.

- [6] ZHANG Z H, GONG S P, DIMITROVSKI A D, et al. Time synchronization attack in smart grid: impact and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 87-98.
- [7] LIANG Y Q, WANG X J, LI J Q, et al. IEEE 1588based timing and triggering prototype for distributed power supplies in HIAF [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5502309.
- [8] RIEHLE N. Optical clock networks [J]. Nature Photonics, 2017, 11(1): 25-31.
- [9] HE Y B, BALDWIN K G H, ORR B J, et al. Longdistance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. Optica, 2018, 5(2): 138-146.
- [10] CLIVATI C, AIELLO R, BIANCO G, et al. Commonclock very long baseline interferometry using a coherent optical fiber link[J]. Optica, 2020, 7(8): 1031-1037.
- [11] SLIWCZYNSKI L, KREHLIK P, IMLAU H, et al. Fiber-Based UTC dissemination supporting 5G telecommunications networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(4): 67-73.
- [12] NIELL A, BARRETT J, BURNS A, et al. Demonstration of a broadband very long baseline interferometer system: A new instrument for high-precision space geodesy [J]. Radio Science, 2018, 53 (10): 1269-1291.
- [13] ANTONELLO M, BAIBUSSINOV B, BENETTI P, et al. Precision measurement of the neutrino velocity with the ICARUS detector in the CNGS beam[J]. Journal of High Energy Physics, 2012, 11: 049.
- [14] GRAINGE K, ALACHKAR B, AMY S, et al. Square kilometre array: The radio telescope of the XXI century[J]. Astronomy Reports, 2017, 61(4): 288-296.
- [15] KECK D B, MAURER R D, SCHULTZ P C. Ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides [J]. Applied Physics Letters, 1973, 22(7): 307-309.
- [16] CALHOUN M, HUANG S, TJOELKER R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deepspace network and antenna arrays[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(10): 1931-1946.

- [17] PRIMAS L E, LOGAN R T, LUTES G F. Applications of ultra-stable fiber optic distribution systems [C].
 Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control. 1989; 202-211.
- [18] MA L S, JUNGNER P, YE J, et al. Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other timevarying path[J]. Optics Letters, 1994, 19(21): 1777-1779.
- [19] LEVINE J. Invited review article: The statistical modeling of atomic clocks and the design of time scales[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(2).
- [20] 董绍武, 屈俐俐, 袁海波, 等. NTSC 守时工作: 国际 先进, 贡献卓绝[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 129-137.

DONG SH W, Q L L, YUAN H B, et al. Outstanding timekeeping activities of NTSC[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 129-137.

- [21] YE J, PENG J L, JONES R J, et al. Delivery of highstability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(7): 1459-1467.
- [22] NEWBURY N R, WILLIAMS P A, SWANN W C, et al. Coherent transfer of an optical carrier over 251 km [J].
 Optics Letters, 2007, 32(21): 3056-3058.
- [23] PREDEHL K, GROSCHE G, RAUPACH S M, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. Science, 2012, 336(6080): 441.
- [24] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Opticalfrequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. Physical Review Letters, 2013, 111 (11): 110801.
- [25] MA C Q, WU L F, JIANG Y Y, et al. Coherence transfer of subhertz-linewidth laser light via an 82 km fiber link [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107 (26): 261109.
- [26] ZANG Q, DENG X, ZHANG X, et al. Cascaded transfer of optical frequency with a relay station over a 224 km deployed fiber link[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 128: 104511.
- [27] LIU L, CHENG N, WANG J L, et al. High-precision optical frequency transfer over a 96 km urban fiber

link[J]. Applied Optics, 2023, 62(3): 683-687.

- [28] WU Z, DAI Y, YIN F, et al. Stable radio frequency phase delivery by rapid and endless post error cancellation[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1098-1100.
- [29] CUI Y, JIANG T, YU S, et al. Passive-compensationbased stable RF phase dissemination for multiaccess trunk fiber link with anti-GVD and anti-backscattering function[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1-8.
- [30] WEI J, ZHANG F, ZHOU Y, et al. Stable fiber delivery of radio-frequency signal based on passive phase correction [J]. Optics Letters, 2014, 39 (11): 3360-3362.
- [31] LI H, WU G, ZHANG J, et al. Multi-access fiber-optic radio frequency transfer with passive phase noise compensation[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5672-5675.
- [32] PAN S L, WEI J, ZHANG F Z. Passive phase correction for stable radio frequency transfer via optical fiber [J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(2): 327-335.
- [33] BAI Y, WANG B, GAO C, et al. Fiber-based radio frequency dissemination for branching networks with passive phase-noise cancelation [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 061201.
- [34] YU L, WANG R, LU L, et al. Stable radio frequency dissemination by simple hybrid frequency modulation scheme [J]. Optics Letters, 2014, 39 (18): 5255-5258.
- [35] YIN F F, ZHANG A X, DAI Y T, et al. Phaseconjugation-based fast RF phase stabilization for fiber delivery[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 878-884.
- [36] LI W, WANG W T, SUN W H, et al. Stable radiofrequency phase distribution over optical fiber by phasedrift auto-cancellation [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4294-4296.
- [37] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, LOURS M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86 km urban optical link[J]. Applied Physics B, 2010, 98(4): 723-727.
- [38] CHEN W, LIU Q, CHENG N, et al. Joint time and frequency dissemination network over delay stabilized

fiber optic links[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-9.

- [39] ZHANG H, XIAO Y, QU P, et al. Active delay stabilization of a 440 km fiber link in a wide band microwave delay system [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1-7.
- [40] WANG B, GAO C, CHEN W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10⁻¹⁹ accuracy level[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 556.
- [41] ZHANG J P, WU G L, LIN T C, et al. Fiber-optic radio frequency transfer based on active phase noise compensation using a carrier suppressed double-sideband signal[J]. Optics Letters, 2017, 42 (23): 5042-5045.
- [42] WANG D X, JIANG T W, LIU C X, et al. Stable radio frequency dissemination via a 1007 km fiber link based on a high-performance phase lock loop [J]. Optics Express, 2018, 26(19): 24479-24486.
- [43] WANG X, WEI W, LIU Z, et al. Joint frequency and time transfer over optical fiber with high-precision delay variation measurement using a phase-locked loop [J].
 IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 1-8.
- [44] MARRA G, MARGOLIS H S, RICHARDSON D J. Dissemination of an optical frequency comb over fiber with 3×10⁻¹⁸ fractional accuracy [J]. Optics Express, 2012, 20(2), 1775-1782.
- [45] HOU D, LI P, LIU C, et al. Long-term stable frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase stabilization[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 506-511.
- [46] NING B, DU P, HOU D, et al. Phase fluctuation compensation for long-term transfer of stable radio frequency over fiber link [J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28447-28454.
- [47] LI D, HOU D, HU E, et al. Phase conjugation frequency dissemination based on harmonics of optical comb at 10 - 17 instability level [J]. Optics Letters, 2014, 39(17): 5058-5061.
- [48] ZHANG S, ZHAO J. Frequency comb-based multipleaccess ultrastable frequency dissemination with 7×10⁻¹⁷ instability[J]. Optics Letters, 2015, 40(1): 37-40.
- [49] SHANG J M, JIANG T W, LIU C X, et al. Stable frequency dissemination over multi-access fiber loop link

with optical comb[J]. Optics Express, 2019, 26(26): 33888-33894.

- [50] FENG Z T, MARRA G, ZHANG X, et al. Stable optical frequency comb distribution enabled by hollow-core fibers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2022, 16(11): 2200167.
- [51] FUJIEDA M, KUMAGAI M, NAGANO S. Coherent microwave transfer over a 204 km telecom fiber link by a cascaded system[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(1): 168-174.
- [52] PRZEMYSŁAW K, ŁUKASZ S, ŁUKASZ B, et al. Ultrastable long-distance fibre-optic time transfer: Active compensation over a wide range of delays [J]. Metrologia, 2015, 52(1): 82-88.
- [53] LIU Q, HAN S L, WANG J L, et al. Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a 430 km fiber backbone network using a cascaded system [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 070602.
- [54] HE Y B, BALDWIN K G H, ORR B J, et al. Longdistance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy[J]. Optica, 2018, 5(2): 138-146.
- [55] KAUR N, FRANK F, PINTO J, et al. A 500 km cascaded white rabbit link for high-performance frequency dissemination [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2022, 69(2): 892-901.
- [56] LI Q, HU L, ZHANG J B, et al. Multiple-access relay stations for long-haul fiber-optic radio frequency transfer[J]. Optics Express, 2022, 30 (11): 18402-18414.
- [57] GAO H, JIANG T W, LI J H, et al. Comparison of relay methods for long-distance radio frequency transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(1): 121-127.
- [58] CHEN Y F, DAI H F, SI H W, et al. Long-Haul high precision frequency dissemination based on dispersion correction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5503207.
- [59] KIHARA M, IMAOKA A, IMAE M, et al. Two-way time transfer through 2. 4 Gb/s optical SDH system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,

2001, 50(3): 709-715.

- [60] EBENHAG S C, HEDEKVIST P O, JARLEMARK P, et al. Measurements and error sources in time transfer using asynchronous fiber network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59 (7): 1918-1924.
- [61] 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-Lasers and Optics, 2013, 110(1): 3-6.
- [62] WU G L, HU L, ZHANG H, et al. High-precision twoway optic-fiber time transfer using an improved time code[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85: 114701.
- [63] WŁOSTOWSKI T. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network [D]. Poland: Warsaw University of Technology, 2011.
- [64] 潘维斌. LHAASO 实验高精度时间测量系统研究[D]. 北京:清华大学, 2014.
 PAN W B. Research on the high precision time measurement system for the LHAASO project [D].

Beijing: Tsinghua University, 2014.

[65] 葛良. HIAF 同步定时系统原型设计及验[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.

> GE L. Design and verification prototype of timing system for HIAF[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.

- [66] GIRELA-LÓPEZ F, LÓPEZ-JIMÉNEZ J, JIMÉNEZ-LÓPEZ M, et al. IEEE 1588 high accuracy default profile: Applications challenges [J]. IEEE Access, 2020, 8: 45211-45220.
- [67] GUTIÉRREZ-RIVAS J L, TORRES-GONZÁLEZ F, ROS E, et al. Enhancing white rabbit synchronization stability and scalability using P2P transparent and hybrid clocks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7316-7324.
- [68] LEE K, EIDSON J. IEEE-1588 standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems [C]. 2nd ISA/IEEE Sensors for Industry Conference, 2003.
- [69] EDISON J C. Measurement, control, and communication using IEEE 1588 [J]. Advances in Industrial Control, 2006, 111(1): 75-82.

- [70] CHO H, JUNG J, CHO B, et al. Precision time synchronization using IEEE 1588 for wireless sensor networks[C]. International Conference on Computational Science and Engineering, 2009.
- [71] 孔令彬,文赫胜,陈向文. IEEE1588 精密时钟同步关 键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(7): 1585-1586,1598.
 KONG L B, WEN H SH, CHEN X W. Research on key technology of IEEE1588 precision clock synchronization[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18 (7): 1585-1586,1598.
- [72] 李由由. 基于 PTP+SyncE 的时间同步技术研究与实现[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2021.

LI Y Y. Research and implementation of time synchronization technology based on PTP + SyncE [J]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences), 2021.

- [73] MOREIRA P, ALVAREZ P, SERRANO J, et al. Digital dual mixer time difference for sub-nanosecond time synchronization in Ethernet[C]. 2010 IEEE International Frequency Control Symposium, 2010.
- [74] MOREIRA P, SERRANO J, WLOSTOWSKI T, et al. White Rabbit: Sub-nanosecond timing distribution over Ethernet [C]. International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, 2009.
- [75] PAN W, GONG G, DU Q, et al. High resolution distributed time-to-digital converter (TDC) in a White Rabbit network[J]. Nuclear Inst and Methods in Physics Research A, 2014, 738: 13-19.
- [76] 方维. White rabbit 时间同步技术研究与应用[D]. 杭州:中国计量大学, 2021.
 FANG W. White rabbit time synchronization technology study and application [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2021.
- [77] 李培基. 基于 White Rabbit 的广域高精度时间传递技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019.
 LI P J. Research on wide area and high precision time transfer based on white rabbit network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [78] 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.

- [79] KREHLIK P, SLIWCZYNSKI L, BUCZEK L, 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.
- [80] ŁUKASZ S, PRZEMYSŁAW K, ALBIN C, et al. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km[J]. Metrologia, 2013, 50(2): 133-145.
- [81] ZUO F X, CHEN Z F, HU L, et al. WDM-based fiberoptic time synchronization without requiring link calibration[J]. IEEE Access, 2020, 8: 114656-114662.
- [82] CHEN Y F, DAI H F, LI W L, et al. Time reversal enabled fiber-optic time synchronization [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5503508.
- [83] GUO Y C, WANG B, SI H W, et al. Correlation measurement of co-located hydrogen masers [J]. Metrologia, 2018, 55(5): 631-636.
- [84] GUO Y C, WANG B, WANG F M, et al. Real-time free-running time scale with remote clocks on fiber-based frequency network [J]. Metrologia, 2019, 56 (4): 045003.
- [85] TAVELLA P, PREMOLI A. Estimating the instabilities of N Clocks by measuring differences of their readings[J]. Metrologia, 1994, 30(5): 479-486.
- [86] TORCASO F, EKSTROM C R, BURT E A, et al. Estimating the stability of N clocks with correlations[J].

IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(5): 1183-1189.

[87] SCHODOWSKI S S, VIG J R. Study of the clock ensemble correlation in ALGOS using real data [C]. Proceedings of the 5th European Frequency and Time Forum, 1991: 435-441.

作者简介



陈雨锋,2018年于清华大学获得学士学 位,2023年于清华大学获得博士学位,现为 中国兵器工业导航与控制技术研究所助理 研究员,主要研究方向为智能控制和光电综 合系统。

E-mail:cyf1997_dks@ 163.com

Chen Yufeng received his B. Sc. degree in 2018 from Tsinghua University, received his Ph. D. degree in 2023 from Tsinghua University. Now he is a Research Assistant in China Ordnance Navigation and Control Technology Research Institute. His main research interests include intelligent control, and optoelectronic integrated system.



王波(通信作者),2002 年于山西大学 获得学士学位,2007 年于山西大学获得博士 学位,现为清华大学精密仪器系副教授,主 要研究方向为时空基准技术和光网络信息 感知。

E-mail:bo. wang@ tsinghua. edu. cn

Wang Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2002 from Shanxi University, received his Ph. D. degree in 2007 from Shanxi University. Now he is a Tenured Associate Professor with the Department of Precision Instruments, Tsinghua University. His current research interests include space-time and standards technology, and fiber network sensing.