

DOI:10.13382/j.jemi.B2508215

White Rabbit 技术研究进展 *

齐苗苗¹ 王 剑¹ 林平卫² 梁 坤¹

(1. 北京交通大学自动化与智能学院 北京 100044; 2. 中国计量科学研究院前沿计量科学中心 北京 100029)

摘要: 光纤时频同步技术的需求逐渐向远距离、多节点、高精度的方向发展。白兔(WR)技术作为光纤时频传递的重要实现方案,在精确时间协议(PTP)的基础上进行了创新性扩展,通过引入同步以太网和数字双混频时差测量(DDMTD)技术,实现了主、从时钟之间亚纳秒级的时间偏差和纳秒量级的同步不确定度,更在标准化、通用化以及便捷组网等方面展现出显著优势。系统性阐述了WR技术的同步原理及其性能优势,深入分析了影响系统同步性能的关键因素,并对现有研究方法的优缺点进行了对比,最后进一步探讨了该技术当前面临的技术挑战与未来发展方向。研究表明,WR技术在分布式系统中具有广阔的应用前景,但要满足多样化应用场景的需求,仍需在多个关键技术领域取得突破,具体包括高精度绝对校准技术、远距离光纤传输的温度补偿、级联系统的噪声累积抑制以及基于无线链路的时频传递实现等。

关键词: 光纤; White Rabbit; 时间同步; 频率同步; 分布式系统

中图分类号: TB939 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Research progress in white rabbit technology

Qi Miaomiao¹ Wang Jian¹ Lin Pingwei² Liang Kun¹(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Frontier Metrology Science Center, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The demand for fiber optic time and frequency synchronization technology is gradually developing in the direction of long-distance, multi-node and high-precision. White rabbit (WR) technology, as an important implementation of fiber optic time and frequency transfer, is an innovative extension of the precision time protocol (PTP). Sub-nanosecond time deviation and nanosecond synchronization uncertainty between master and slave clocks by introducing synchronous Ethernet and digital double-mixed frequency time difference (DDMTD) measurement techniques. It also demonstrates significant advantages in terms of standardization, generalization and convenient networking. This paper systematically explains the synchronization principle of WR technology and its performance advantages. And deeply analyzes the key factors affecting the system synchronization performance. Meanwhile, a comparison is made between the advantages and disadvantages of existing research methods. Finally, the current technical challenges and future directions of the technology are further discussed. The study shows that WR technology has a broad application prospect in distributed systems. But it still needs to make breakthroughs in several key technical areas to meet the demands of diverse application scenarios, including high-precision absolute calibration technology, temperature compensation technology for long-distance fiber transmission, noise accumulation suppression in cascade systems, and time-frequency transfer implementation based on wireless links.

Keywords: fiber; white rabbit; time transfer; frequency transfer; distributed system

0 引言

时间作为国际单位制 (international system of units, SI) 7 个基本物理量之一, 其测量和复现准确度是最高的, 直接测量不确定度相比其他物理量高 4 个数量级以上, 复现不确定度稳定在 10^{-16} 量级, 随着光钟的出现复现不确定度可达到 10^{-18} 量级^[1]。在某些前沿物理测量实验中, 甚至会将其他物理量转化为时间频率进行测量。精密的时间频率对社会生活、科学研究、国民经济以及国防建设等领域产生重要影响。近年来, 原子钟性能的不断提高以及各行业对高精度时间频率信号的进一步需求, 使得高精度时间频率传递与同步技术得到了快速发展。

目前不确定度最优的时间频率传递与同步技术是基于光纤实现的。最早由美国喷气推进实验室 (jet propulsion laboratory, JPL) 于 1978 年提出, 并在 1980 年基于 1.5 km 的光纤链路实现氢原子钟 100 MHz 频率信号的分发^[2], 目的是为了提升深空网的观测性能, 实验同时证明光纤在时间频率领域应用的可行性。由于光纤的高精度、低损耗、高可靠性以及高稳定性等突出优势, 国内外科研机构和高校展开广泛研究, 近 20 年基于光纤的时间频率同步技术得到了飞速发展, 按照传递信号类型可分为频率同步、时间同步以及时间频率一体化同步^[3]。其中, 光纤频率同步技术发展时间相对较长, 目前主要包括光纤微波频率同步^[4-6]、基于飞秒频率梳的光纤频率同步^[7-9]以及光纤光频同步^[10-12] 3 种类型, 光纤微波频率同步技术成本低且技术成熟, 应用范围最广^[13]; 基于飞秒频率梳的光纤频率同步技术和光纤光频同步技术成本较高, 主要用于科学研究, 实际工程应用相对较少。针对光纤时间同步技术, 主要包括环回法^[14] 和双向比对法^[15-17] 两种方式。中国计量科学研究院^[18]、上海光机所^[19]以及清华大学^[20]针对光纤时间频率一体化同步技术展开研究, 实现了时间和频率信号的同时传递与同步。

上述光纤时间频率同步技术主要采用点对点传输, 并且一般为专线形式, 成本相对较高。近年, 随着分布式基站^[21]、分布式雷达、阵列天线等行业的发展, 传统点对点时频同步方式已经无法满足应用需求, 亟需发展点对多点的分布式时间频率同步技术^[22], 实现大范围、多节点、高精度的时间频率信号同步, 同时保证系统安全可靠。针对此类行业发展需求, 本文介绍一种基于光纤传输的亚纳秒时频同步技术——白兔 (white rabbit, WR)。2008 年由欧洲核子研究中心 (european organization for nuclear research, CERN) 和德国重离子研究中心 (helmholtz centre for heavy ion research, GSI) 提出^[23-24], 创新性的在传统精确时间协议 (precision time

protocol, PTP) 协议基础上进行扩展, 增加了皮秒级高精度的时间戳和频率同步等功能, 实现时间、频率和数据一体化传输, 同时兼容以太网, 在标准化、通用化以及便捷组网等方面优势突出, 能够很好地适应分布式的复杂网络架构, 同步节点数量可达数千个。我国处于建设中的国家重点技术基础设施规划项目硬 X 射线自由电子激光装置^[25] 和强流重离子加速器装置^[26] 的定时系统均使用 WR 技术设计实现。近些年, WR 技术不再局限于高能物理领域, 逐步向其他领域渗透, 文献 [27-28] 利用 WR 技术构建国家标准时频传递光纤网络, 将国家计量中心标准时频信号向其他区域进行分发, 以供各行业使用; 文献 [29-30] 针对 WR 技术在电力配网监测系统、变电站自动化系统以及智能电网中的应用进行可行性分析, 结果表明 WR 技术优于目前所应用的 GPS 和 PTP 时间同步技术; 文献 [31-32] 分析验证了 WR 技术在 5G 通信系统中的应用, 结果证明使用 WR 技术能够有效提高通信系统的传输效率; 文献 [33] 提出 WR 技术在金融时间同步网络的应用, 现已成功为股票市场运营商提供标准时间服务。

本文针对 WR 技术进行综述, 首先阐述其同步原理及其性能优势, 然后深入分析影响系统同步性能的主要因素, 并对当前研究方法的优缺点进行了评述, 最后进一步探讨了当前面临的技术挑战与未来发展方向。

1 同步原理

由一个 WR 主节点和一个 WR 从节点组成的链路同步模型如图 1 所示。其中, ΔTXM 、 ΔRXM 分别表示主节点恒定的发送延迟和接收延迟; ΔTXS 、 ΔRXS 分别表示从节点恒定的发送延迟和接收延迟; δ_{MS} 、 δ_{SM} 分别表示主节点到从节点、从节点到主节点的单向链路延迟, 值与光纤不对称系数 α 相关; ε_M 、 ε_S 分别表示主节点和从节点的位滑动器值, 是将恢复的时钟信号对准到数据流的符号间边界过程中产生的额外的接收延迟。

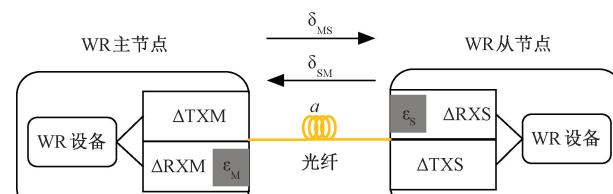


图 1 WR 链路同步模型

Fig. 1 WR link synchronization model

根据同步模型, 可以得到主节点到从节点的单向传输延迟 $delay_{MS}$ 、从节点到主节点的单向传输延迟 $delay_{SM}$ 以及往返路径延迟 $delay_{MM}$, 具体如下:

$$delay_{MS} = \Delta TXM + \delta_{MS} + \varepsilon_S + \Delta RXS \quad (1)$$

$$delay_{SM} = \Delta TXS + \delta_{SM} + \varepsilon_M + \Delta RXM \quad (2)$$

$$delay_{MM} = delay_{MS} + delay_{SM} \quad (3)$$

1.1 频率同步

首先通过同步以太网技术实现网络中所有节点的频率同步^[34]。如图 2 所示,网络架构中包含一个具有主时钟功能的顶层节点,称为系统定时主节点(system timing master, STM)。该节点利用其高精度时钟信号对输出数据流进行编码,从而确保数据传输的时序准确性。网络中的从节点通过其内部集成的锁相环(phase-locked loop, PLL)电路,从接收到的数据流中提取并恢复时钟信号,恢复的时钟信号不仅用于同步本地节点的数据处理,还通过数据流的形式向下级节点传播,同时将同步信息反馈至主节点。通过这种层级式的时钟传递机制,整个网络中的所有节点最终都能实现与主节点时钟频率的高精度同步,从而确保网络的时间一致性。

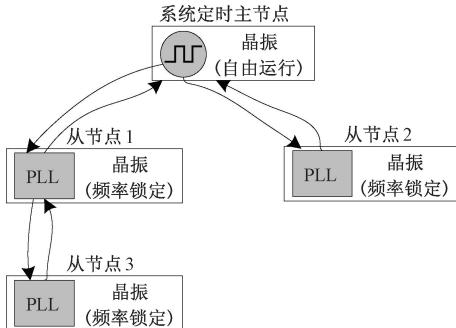


图 2 频率同步原理

Fig. 2 Principle of frequency synchronization

1.2 时间同步

时间同步基于 PTP 技术^[35],被实现为边界时钟(boundary clock, BC),使用两步端到端(end-to-end, E2E)的延迟请求响应机制进行消息报文交换,消息报文包括 Sync、Follow_Up、Delay_Req 和 Delay_Resp,同步过程如图 3 所示。

主时钟周期性的向从时钟发送 Sync 报文,并记录 Sync 报文离开主时钟的发送时间 t_1 ,主时钟将 t_1 封装到 Follow_Up 报文中发送给从时钟,从时钟记录 Sync 报文到达时间 t_2 ;从时钟发出 Delay_req 报文并且记录下发送时间 t_3 ,主时钟记录下 Delay_req 报文到达主时钟的到达时间 t_4 ,主时钟发出携带精确时间截 t_4 的 Delay_resp 报文给从时钟,当 Delay_Resp 报文到达从时钟。PTP 协议假设往返单向传输延迟相等,即 $delay'_{MS} = delay'_{SM}$,从时钟根据已获取的时间截计算得到单向传输延迟 $delay'_{MS}$ 和时钟偏移 $offset'_{MS}$ 。

$$delay'_{MS} = \frac{(t_4 - t_3) + (t_2 - t_1)}{2} \quad (4)$$

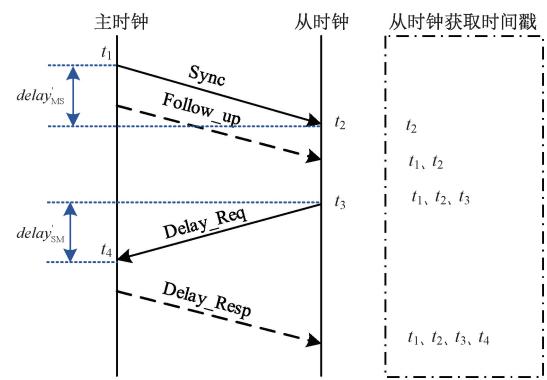


图 3 PTP 同步原理

Fig. 3 Principle of PTP synchronization

$$offset'_{MS} = \frac{(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)}{2} \quad (5)$$

基于硬件生成的时间截分辨率受限于硬件时钟频率,千兆以太网驱动时钟频率为 125 MHz,因此时间截分辨率仅为 8 ns。WR 技术使用数字双混频时差测量(digital dual mixer time difference, DDMTD)技术得到皮秒量级高精度时间截^[36-37],因此 $delay_{MM}$ 、 $delay_{MS}$ 、 $delay_{SM}$ 使用改进后时间截表示为:

$$delay_{MS} = t_{2P} - t_1 + offset_{MS} \quad (6)$$

$$delay_{SM} = t_{4P} - t_3 - offset_{MS} \quad (7)$$

$$delay_{MM} = t_{4P} - t_3 + t_{2P} - t_1 \quad (8)$$

式中: t_{2P} 、 t_{4P} 表示使用 DDMTD 技术实现的皮秒量级时间截,分别对应 PTP 协议中时间截 t_2 和 t_4 。

1.3 不对称性补偿

根据光纤不对称系数的定义 $\alpha = \frac{\delta_{MS}}{\delta_{SM}}$ - 1,得到由 WR

计算的主、从时钟单向传输延迟 $delay_{MS}$ 和时间偏差 $offset_{MS}$:

$$delay_{MS} = \Delta TXM + \Delta RXS + \varepsilon_S + \frac{1 + \alpha}{2 + \alpha} (delay_{MM} - \Delta - \varepsilon_M - \varepsilon_S) \quad (9)$$

$$offset_{MS} = t_1 - t_{2P} + delay_{MS} \quad (10)$$

式中: $\Delta = \Delta TXM + \Delta RXS + \Delta TXS + \Delta RXM$,WR 从节点根据计算结果调整本地时钟与主时钟保持高精度时间同步,实现亚纳秒级的时间偏差和纳秒量级的同步不确定度。

2 性能优势分析

分布式系统时间同步实现方案目前主要有 3 种,分别为网络时间协议(network time protocol, NTP)、PTP 和 WR,3 种技术的优缺点对比如表 1 所示。

NTP 采用客户端-服务器的分层架构,客户端首先向

服务端发送一个 NTP 请求报文, 其中包含了该报文离开客户端的时间戳 T_1 , NTP 请求报文到达 NTP 服务器, 此时 NTP 服务器的时刻为 T_2 , 当服务端接收到该报文时, NTP 服务器处理之后, 于 T_3 时刻发出 NTP 响应报文, 客户端在接收到响应报文时, 记录报文返回的时间戳 T_4 。客户端使用这些时间戳来计算网络延迟和时钟偏移, 然后调整本地时钟实现与服务端同步。由于时间戳依赖于应用层软件生成, 因此时间同步性能较低, 网络架构层级最大为 15 层。客户端和服务器之间的时间偏差为毫秒级, 适用于对时间同步要求不高的应用场景。

PTP 相较于 NTP 在协议设计和实现机制上进行改

进。首先, 采用了硬件时间戳机制(时间戳位置并不唯一(表 1)), 通过在物理层生成时间戳, 避免了 NTP 在应用层生成时间戳时由操作系统和网络协议栈引入的延迟和抖动, 从而大幅提高了时间戳的精度。其次, 引入了主从时钟层次结构, 通过动态选择最优主时钟, 相对减少时钟漂移和累积误差。PTP 支持多播和单播混合模式, 优化了大规模网络中的同步效率。此外, 支持双向延迟测量机制, 提出往返网络传输延迟不对称性校正, 但不对称性的精确测量并没有说明。以上改进使得 PTP 能够实现亚微秒甚至纳秒级的时间同步准确度, 适用于高精度时间同步需求的工业自动化和通信网络等领域^[38]。

表 1 NTP、PTP 和 WR 技术对比
Table 1 Comparison of NTP, PTP and WR technologies

	NTP	PTP	WR
对象	服务器、客户端	普通时钟、边界时钟、透明时钟	边界时钟
传输报文类型	UDP 协议	UDP 协议	UDP 协议
同步信号类型	时间信号	时间信号	时间信号、频率信号
时间戳生成位置及实现方式	基于应用层软件生成的时间戳。	①基于应用层软件生成的时间戳; ②由数据链路层与网络层之间内核或中断服务例程软件生成; ③基于物理层硬件生成的时间戳。	基于物理层硬件生成的时间戳。
时钟频率补偿方式	根据时间偏差的变化趋势, 估算频率偏差, 通过软件定期补偿。	根据时间偏差的变化趋势, 估算频率偏差, 通过软件定期补偿。	利用同步以太网, 使用硬件 PLL, 实现网络内所有时钟频率同步。
同步时间偏差	100 μ s~10 ms(局域网)	100 ns~1 μ s	优于 1 ns
同步不确定度	毫秒级	纳秒级	纳秒级

基于 PTP 协议, 主从时钟可以实现最优几十纳秒的时间偏差, 但无法达到更高准确度的时间同步, 主要原因在于: 同步网络中各个节点的振荡器相互独立运行、时间戳分辨率受限于硬件时钟频率以及网络传输延迟不对称性。WR 技术针对 PTP 协议的不足进行如下改进: 1) 增加同步以太网技术实现网络内所有节点的频率同步, 减少因节点内部振荡器频率偏差而产生的同步误差; 2) 增加 DDMTD 技术实现对小于时钟周期部分时差的高精度测量, 时间戳分辨率达到皮秒量级; 3) 增加往返链路非对称性测量, 真实网络延迟是不对称的, 即 $delay_{MS} \neq delay_{SM}$, WR 技术提出了往返链路时延模型, 对光纤链路不对称系数 α 进行定义, 同时单独测量并补偿往返单向路径时延。基于以上改进使得 WR 技术能够实现亚纳秒级时间偏差以及纳秒级同步不确定度, 适用于标准时频服务机构、科学研究等对时间同步准确度要求高的领域。

3 同步影响因素及研究现状

3.1 校准

传递链路的精密校准是保证系统能够实现时频信号高精度同步的关键和必要前提。WR 系统由光纤链路和

两端 WR 设备组成, 其中光纤链路因往返波长不同存在不对称时延, WR 设备存在发送/接收延迟, 这两部分直接影响 WR 能否实现亚纳秒的时间偏差。因此 WR 设备投入使用前, 需要进行校准。

2015 年, CERN 提出基于校准器的整体校准方法, 校准原理如图 4 所示^[39]。当 WR 链路激活时, 设备的传输/接收延迟都是恒定的, 包含小型热拔插光模块 (small form pluggable, SFP)、印刷电路 (printed circuit board, PCB) 延时、电子元件延时以及现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 的确定性逻辑延时。如果要精确计算每一部分延迟是非常困难的, 因此将它们作为一个整体测量并标定。其中校准器的发送延迟和接收延迟为已知量, ε_M 和 ε_S 实际使用过程中会自动测量并补偿, 不需要额外标定。因此, 需标定参数包括: 固定延迟 ΔTXM 、 ΔRXM 、 ΔRXS 、 ΔTXS , 以及光纤链路的不对称系数 α , 校准流程参考文献[40]。

以上校准方法存在互换性差的问题, 如果网络内任一组件更换, 则需要重新进行校准。针对这个问题, Peak 等^[41] 提出绝对校准技术, 使用经过单独校准的组件来创建一个经过校准的系统, 系统内组件即插即用而不丢失校准, 同时可以避免现场网络校准。图 5 为绝对校准模

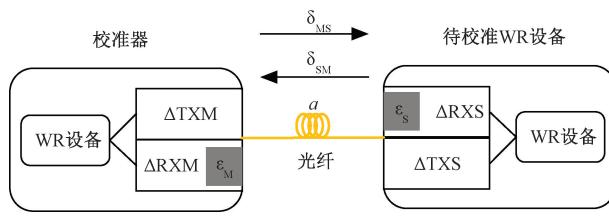


图 4 基于校准器的整体校准模型

Fig. 4 Overall calibration model based on calibrator

型,共分为3部分:1)WR设备的电学部分:内部时间截到外部时间参考平面的延迟,通过专用的SFP+时序校准模块进行测量^[42];2)光-电/电-光转换器:电学时间参考平面到光学时间参考平面的延迟,使用马赫-曾德尔幅度调制器测量得到^[43];3)光纤不对称系数,通过可变波长SFP模块和固定波长SFP模块组合测量^[41]。在绝对校准过程中,由于涉及多环节校准且部分采用自研测量设备,其操作流程复杂,技术门槛较高。目前,该技术尚未成熟,主要聚焦于系统内部组件的互换性验证,而忽略了最终同步精度的实现与评估。

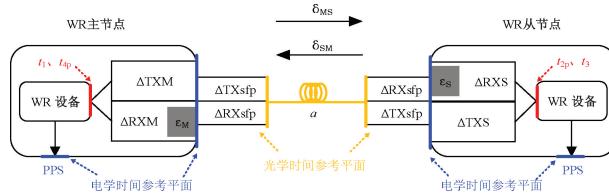


图 5 绝对校准模型

Fig. 5 Absolute calibration model

当前主流的基于校准器的整体校准方法因操作简便(仅需常规测量设备)、实现成本低等优势,已成为工程实践中的首选方案。采用该方法,已实现了10 km同步链路时间偏差优于500 ps的校准。然而,该方案在动态环境下的性能受温度敏感性制约显著,因此未来研究趋势为探索基于在线实时校准的方法,通过温度传感等方法实时测量并补偿时差,减少温度对校准结果的影响,提高系统稳定性,实现温变条件下优于1 ns的时间同步偏差,校准不确定度优于0.5 ns。

3.2 温度

3.1节中光纤不对称系数以及硬件延迟的校准通常在室温下进行,并且假设其在同步过程中固定不变。但实际运行环境存在变化,尤其温度的变化会直接导致激光器中心波长发生改变,同时影响光纤的折射率,改变光纤不对称系数 α ;另一方面硬件时延同样会随温度发生变化,直接影响单向链路时延的计算,从而影响最终同步不确定度。

2012年,CERN在0 °C ~ 50 °C温度范围内进行WR

同步性能测试^[44-45],使用光纤最长不超多10 km,实验表明温度变化导致同步性能下降的主要原因是硬件延迟的变化,并通过线性补偿,使得WR节点的最大时间间隔误差(maximum time interval error, MTIE)从470 ps降低到100 ps。

2014年,清华大学在-10 °C ~ 55 °C宽温范围内,针对国内高海拔宇宙线观测站(large high altitude air shower observatory, LHAASO)硬件延迟的温度效应提出一种在线校正方法^[46],将时间偏差从700 ps减少到150 ps以内,标准偏差<50 ps,对于<10 km短光纤,保持最初的亚纳秒时间偏差同步设计。

2018年,格拉纳达大学在15 °C ~ 45 °C温度范围内,探究了温度变化对长距离WR时频传递链路的影响^[47],使用50 km光纤进行同步,结果表明主、从时间偏差会有几纳秒的偏移误差,但没有提出有效的解决办法。

2022年印度国家物理实验室在22 °C ~ 55 °C范围内,研究温度对光纤链路的影响^[48],提出使用高分辨率相位/频率偏移发生器HROG-10主动补偿相位偏移,实现在10 km光纤链路,测量主、从节点之间时间偏差优于100 ps。

短距离光纤不对称系数的温度变化率,可通过实验拟合获得并实时校正,有效降低温度对光纤链路的影响。然而,在长距离光纤测温方面仍存在显著挑战:一方面,由于测温精度限制,难以通过拟合计算获得准确的修正系数;另一方面,实际应用场景中,主、从节点通常位于室内环境,而光纤链路则布设在室外,这种空间分布的差异性导致两者温度变化规律存在显著差异,进一步增加了温度补偿的难度。

3.3 级联

远距离光纤时频同步的实现方式有两种:一种是在两个节点之间直接引入光放大器,如掺铒光纤放大器,具有低延迟、低成本、操作简单的优点。

2016年,芬兰国家计量院(VTT MIKES)使用现有包含10级光放大的双光纤电信网络^[49],通过一对WR主、从节点,实现950 km超长距离的时间频率同步。经过4个月测量,结果显示WR测量结果和GPS PPP测量结果差值保持在±2 ns以内,WR测量抖动更小,约为1 μs。

2021年,捷克CESNET在500 km光纤链路中使用低成本的2R中继器实现了亚纳秒的时间同步^[50],实验表明,通过部署中继器可有效扩展WR协议的传输覆盖范围,同时实现波长转换功能,用于降低长距离双向传输的WR因固定波长的光放大而产生的噪声累积,进一步提升系统同步性能。

由于仅放大光信号,无法修复信号畸变或误码,因此单纯依赖光放大器的方式在超长距离传输中效果是有限的;另一种方式是在传输路径中增加多个中继节点,信号

不仅可以被放大,还可以通过再生或重定时等技术进行恢复和误码修正,即使在超长距离传输中也能保持良好的性能。

2016 年,荷兰国家计量院(VSL)^[49]搭建 2×137 km 单纤双向 WR 时频传递系统,该系统的每个 137 km 光纤段配置了 1 个光放大器和 1 对 WR 主从节点,采用 1 470 nm 和 1 490 nm 双波长进行双向传输,实现了时间同步不确定度约为 8 ns,时间稳定度 TDEV 约为 10 ps@ 10^3 s。

2016 年,西班牙格拉纳达大学(UGR)^[51]针对双端口 WR-LEN 的线性拓扑性能进行研究,实验采用高性能示波器对第 1 个主节点与其他节点输出 10 MHz 信号进行相位差测量。研究表明,该链路最多可实现 18 个节点的同步,在第 19 个节点已无法完成同步化过程。推测可能与设备内部 PLL 性能有关,但该假设尚未得到进一步验证。

2021 年,荷兰计量院(VSL)^[52]基于现有光纤网络基础设施,构建一套可扩展的 WR 时间频率传输系统,共部署了 3 条线性拓扑结构的光纤链路,其总长度分别为 222 km(5 级级联)、200 km(3 级级联)、12 km(4 级级联),采用主时钟最优算法实现冗余操作,完成 3 条链路的无缝切换。测试结果表明,系统末节点和主节点的时间偏差优于 2 ns,验证了该系统的可靠性和精确性。

2022 年,法国 Orange Labs^[53]实现 500 km 的 WR 时频同步链路的构建,采用三级 WR 交换机级联,各光纤段分别配置 1 510、1 541、1 610 和 1 560 nm 不同工作波长。针对级联系统同步性能下降的问题,研究团队通过优化主节点硬件架构,并调整从节点内部 PLL 带宽和 PTP 报文速率,实现了显著的性能提升。短期频率稳定度达到 2×10^{-12} @1 s,长期频率稳定度达到 2×10^{-15} @ 10^5 s,长期稳定基本满足当前主要频率标准的长期稳定性。

文献[53]研究表明,WR 级联链路同步稳定性与节点数量 N 存在近似平方根的关系,即每增加一级节点,稳定性降低 \sqrt{N} 。针对这一关键问题,深入分析级联系统稳定性的主要影响因素(包括频率偏差、时间戳抖动、链路不对称性)将成为重要研究方向。通过建立量化分析模型解析各因素对稳定性的影响机制,发展协同优化框架,从而实现系统整体性能的提升。

4 面临挑战与未来展望

上述研究表明,WR 技术的同步性能主要受校准技术、温度和级联 3 个方面的影响。WR 系统同步性能高度依赖校准技术的完善性,当前主流方案为基于校准器的整体校准。其优势在于操作简便且实验室环境下可实现亚纳秒级精度,但实际应用中存在显著缺陷:设备互换

性差导致校准结果在更换 SFP 光模块后无法复用。为解决此问题,绝对校准技术将链路模型中的固定延迟分为两部分,分别测量并补偿,以突破 SFP 模块互换性限制。然而,绝对校准的工程实现面临多重挑战:1)光学元器件硬件延迟的精确测量需依赖其他设备,如马赫-曾德尔幅度调制器等,此类设备成本高昂且环境敏感性高;2)动态环境因素(如温度漂移、电磁干扰)会导致延迟参数的时变特性,需开发实时自适应校准算法。当前实现技术不成熟,未来需进一步研究可操作性强、成本低且具有良好校准不确定度的绝对校准技术。

温度变化通过两种机制影响 WR 系统性能:1)改变光纤材料的折射率(单模光纤折射率温度系数约 $1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$),导致光信号传播时延波动;2)引发设备硬件(如激光器、光电探测器)的热膨胀效应,进一步加剧时钟偏差。针对短距离(<10 km)光纤链路,已有成熟补偿方案。然而,在长距离(>100 km)光纤场景中,温度分布呈现高度非均匀性和时变性,传统局部补偿方法失效。具体而言,长距离光纤可能穿越温差达 30 ℃的复杂环境(如地下管道、跨海光缆),其温度场动态特性难以通过有限监测点精确建模。未来解决方案可利用深度强化学习算法预测温度演化规律。

级联系统通过多跳节点扩展同步范围,但每个节点引入的相位噪声会随节点数逐渐累积,最终导致末端节点时钟抖动超过同步阈值。已有研究证明基于型号 WR-LEN 的 WR 设备其线性拓扑链路最多实现 18 个节点的同步。现有研究聚焦于两个层面缓解该问题:在物理层,通过调整 PLL 相关参数减少系统相位噪声;在协议层,优化 PTP 时钟伺服算法,提高报文交换速率,以增强系统对噪声的抑制能力。然而,这些方法仅能降低单节点噪声,无法解决级联系统的累积效应本质。因此未来研究趋势如下:1)构建级联相位噪声传递模型,通过滤波实现全链路噪声联合估计与补偿;2)利用自由空间光通信技术^[54]直接传输光时钟信号,避免多级电光转换引入的噪声叠加。

协议的标准化进一步推动 WR 技术向其他领域渗透,包括电力系统、5G 通信、金融以及智能交通等,然而,在超可靠低时延通信(ultra reliable low latency communications,URLLC) 和相控阵雷达等场景中,WR 面临根本性挑战:无线信道的多径效应导致纳秒量级的时延随机波动,而 WR 基于光纤的确定性传输模型无法直接适用。因此未来研究趋势可能尝试从两种路径突破:1)有线和无线混合网络架构,WR 骨干网保留基于光纤的有线传递与同步,仅末节点采用无线同步;2)信道特性补偿,构建无线信道的时延预测模型,结合干扰抑制技术,优化信号传输质量。

5 结 论

高精度时间频率传递与同步技术随着各个行业的应用需求,正在向大范围、多节点、高精度的分布式方向发展。作为当前性能最优的分布式系统时间同步方案,WR技术已实现亚纳秒级时间同步偏差和纳秒量级同步不确定度。本文系统性分析了影响WR系统同步性能的三大关键因素:1)校准方面,基于校准器的整体校准方案因操作简便、成本低等优势已成为主流方法,使用该技术实现了10 km链路时间偏差优于500 ps的校准结果,但存在组件互换性差和温敏性缺陷;而新兴的绝对校准技术虽提升了互换性,却因复杂度高尚未成熟。2)温度影响方面,温度变化会改变激光波长、光纤折射率以及硬件时延,导致常温下所得校准值失效。短距离下可通过实验拟合温度变化率补偿,但长距离温度测量精度不足,补偿难度显著增加。3)远距离传输方面,光放大器方案简单低成本,但无法修正信号畸变;中继节点虽能提升信号质量,却会因级联引入累积误差,使同步稳定性随节点数增加而降低,其稳定性主要受频率偏差、时间戳抖动、链路不对称性3个因素的影响。此外,WR依赖有线传输,应用场景受限。

针对上述问题,未来研究趋势如下:1)提高系统内网络组件互换性,研究可达到亚纳秒级高精度时间频率同步的绝对校准技术;2)降低温度等环境因素对系统同步性能的影响,研究远距离光纤传输的温度补偿技术;3)降低级联系统的同步不确定度,研究级联系统中随节点数量增加而产生的噪声累积问题,实现高精度时间频率多级传递和同步;4)扩展WR技术的物理传输介质,研究无线传递技术,进一步提高适用性、扩大应用范围。此外,WR技术在2018年已被推广为IEEE 1588-2008标准的延伸,标准化过程在IEEE 1588-2019标准中得以完善,在可预见的未来,WR技术具有非常广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 秦晓敏,史田田,王志洋,等.窄线宽外腔半导体激光器研究进展[J].仪器仪表学报,2024,45(2):63-78.
- [2] LUTES G. Experimental optical fiber communications link [R/OL]. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, TDA Progress Report 42-59, 1980: 77-85. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/downloads>.
- [3] 陈雨锋,王波.光纤时间频率同步技术及应用[J].仪器仪表学报,2024, 45 (2): 47-62.
- [4] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, DAUSSY C, et al. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer[J]. The European Physical Journal D, 2008, 48(1):35-41.
- [5] KUMAGAI M, FUJIEDA M, NAGANO S, et al. Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link [J]. Optics Letters, 2009, 34(19):2949-2951.
- [6] 胡帆.光纤稳频传输系统的相位补偿方案研究[D].北京:北京邮电大学, 2019.
- [7] HU F. Research on phase compensation scheme for fiber optic stable frequency transmission system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 孟志军,闫恩齐,陈林,等.高精度微波时频传递链路体制设计及关键技术[J].仪器仪表学报,2023, 44(9):104-110.
- [15] MENG ZH J, YAN EN Q, CHEN L, et al. Design and key technologies of high precision microwave time frequency transmission link system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9):104-110.
- [16] ZHOU X, CHEN F X. National time service center time transfer engineering over 112-km fiber link [C]. Proceedings of the 8th China Satellite Navigation

- Conference, 2017;72-76.
- [15] 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.
- [16] 吴燕. 采用双向对比法的光纤时间传递系统[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- WU Y. Fiber optic time transfer system using bidirectional comparison method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [17] 黄璜, 吴龟灵, 胡亮, 等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5):0506006.
- HUANG H, WU G L, HU L, et al. Influence of temperature on the precision of bidirectional TDM based fiber-optic time transfer [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506006.
- [18] 林平卫, 齐苗苗, 宋振飞. 光纤网时间同步性能计量校准装置研制[J]. 计测技术, 2023, 43 (2): 82-90.
- LIN P W, QI M M, SONG ZH F. Development of time synchronization performance measurement and calibration device for fiber optic networks [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (2): 82-90.
- [19] 程楠, 陈炜, 刘琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. 中国激光, 2015, 42 (7): 146-152.
- CHENG N, CHEN W, LIU Q, et al. Study of time synchronization method in fiber optic time-frequency simultaneous transmission system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42 (7): 146-152.
- [20] 高超, 王波, 白钰, 等. 基于光纤链路的高精度时间频率传输与同步[J]. 科技导报, 2014, 32(34):41-46.
- GAO CH, WANG B, BAI Y, et al. High-precision time-frequency transmission and synchronization based on fiber-optic links [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(34):41-46.
- [21] 武光耀, 张明, 韩翔, 等. 基于长循环前缀搜索的 5G 上行控制信道同步算法[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6):43-48.
- WU G Y, ZHANG M, HAN X, et al. 5G uplink control channel synchronization algorithm based on long cyclic prefix search [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(6):43-48.
- [22] 李东瑾, 梅进杰, 胡登鹏, 等. 基于光纤网络的多基地频率传输系统设计[J]. 光通信技术, 2016, 40(7): 5-8.
- LI D J, MEI J J, HU D P, et al. Design of multi-base frequency transmission system based on fiber optic network[J]. Optical Communication Technology, 2016,
- 40(7): 5-8.
- [23] WŁOSTOWSKI T. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network [D]. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2011.
- [24] SERRANO J, ALVAREZ P, CATTIN M, et al. The white rabbit project [C]. Proceeding of the International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 2009;93-95.
- [25] GU J L, ZHAO L, CAO Z, et al. Prototype of clock and timing distribution and synchronization electronics for SHINE [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(8): 2113-2120.
- [26] GE L, ZHANG W, AN S. Timing system for the heavy-ion accelerator facility [C]. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications, 2020;100-105.
- [27] LIM C B, FRANK F, CHUPIN B, et al. Extension of REFIMEVE with a white rabbit network [C]. 2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, 2023;1-4.
- [28] SMOTLACHA V, VOJTECH J. White Rabbit in the czech time and frequency transfer infrastructure [C]. 2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2020;1-4.
- [29] CAO B, ZHOU Z, SUN P, et al. Accelerator distribution network monitoring system based on white rabbit technology [C]. 2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, 2022;309-315.
- [30] RONG Y, SHEN Z Y, FAN B R, et al. High-performance distributed power electronics communication network design with 5 Gbps data rate and sub-nanosecond synchronization accuracy [C]. 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2021;5907-5911.
- [31] ZHAO Y S, XUE X W, GUO B L, et al. White rabbit protocol enhanced TDM-PON with nanoseconds clock and data recovery and picoseconds time synchronization accuracy [C]. 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2022;1-3.
- [32] MOLLAYMERI E, DELAMOTTE T, KNOPP A. Timing alignment of distributed gateways: Theoretical analysis and experimental demonstration[C]. 2022 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop, 2022;1-8.
- [33] LÓPEZ-JIMÉNEZ J, GUTIÉRREZ-RIVAS J. L,

- MARÍN-LÓPEZ E, et al. Time as a service based on white rabbit for finance applications [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(4):60-66.
- [34] MOREIRA P, SERRANO J, WŁOSTOWSKI T, et al. White rabbit: Sub-nanosecond timing distribution over ethernet [C]. 2009 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2009;1-5.
- [35] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S]. US: IEEE Std, 2008.
- [36] RIZZI M, LIPINSKI M, WŁOSTOWSKI T, et al. White rabbit clock characteristics[C]. 2016 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication, 2016;1-6.
- [37] 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;449-453.
- [38] 程顺岭,李常贤,赵科. 基于PTP协议的列车通信网络时间同步优化研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(18) : 91-98.
- CHENG SH L, LI CH X, ZHAO K. Research on time synchronization optimization of train communication network based on PTP protocol [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (18) : 91-98.
- [39] CERN. White Rabbit calibration[EB/OL]. 2018-13-04. <https://www.ohwr.org/projects/wr-calibration/wiki>.
- [40] DANILUK G. White Rabbit calibration procedure [EB/OL]. 2015-11-09. <http://www.ohwr.org/attachments/4092/WR.pdf>.
- [41] PEEK H, JANSWEIJER P. White rabbit absolute calibration[C]. 2018 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication, 2018;1-5.
- [42] JANSWEIJER P, BOUKADIDA N, HANHIJARVI K, et al. First electrical White Rabbit absolute calibration inter-comparison [R/OL]. 2018: 1-11. <https://arxiv.org/abs/2201.08640>.
- [43] PEEK H, PINKERT T, JANSWEIJER P, et al. Measurement of optical to electrical and electrical to optical delays with ps-level uncertainty [J]. Optical Express, 2018, 26(11) : 14650-14660.
- [44] LIPINSKI M. Torture Report[R]. 2012-07-16, [https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Documents/Temperature-Tests-\(aka-Torture-Report\).](https://ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Documents/Temperature-Tests-(aka-Torture-Report).)
- [45] LIPINSKI M, WŁOSTOWSKI T, SERRANO J, et al. Performance results of the first white rabbit installation for CNGS time transfer [C]. 2012 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication Proceedings, 2012;1-6.
- [46] 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 high precision time measurement system for LHAASO experiment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [47] LÓPEZ-JIMÉNEZ J, DÍAZ J, RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ M. Impact of network component temperature variation on long haul White Rabbit links [C]. 2018 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication, 2018;1-6.
- [48] NEELAM, OLANIYA M, SITHAMPARANATHAN K, et al. Time transfer within 100 ps uncertainty through 10 km long optical fibre link [C]. 2022 URSI Regional Conference on Radio Science, 2022;1-4.
- [49] DIERIKX E, WALLIN A, FORDELL T, et al. White rabbit precision time protocol on long-distance fiber links [C]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016:945-952.
- [50] VOJTECH J, HAVLIS O, SLAPAK M, et al. Long haul single fiber reamplified-reshaped white rabbit transmission[C]. 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, 2021;1-3.
- [51] TORRES-GONZÁLEZ F, DÍAZ J, MARÍN-LÓPEZ E, et al. Scalability analysis of the white-rabbit technology for cascade-chain networks [C]. 2016 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication, 2016;1-6.
- [52] DIERIKX E, XIE Y, SAVENCU A, et al. White rabbit multi-point time distribution network [C]. 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, 2021;1-4.
- [53] 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.
- [54] 秦欢欢,王梦凡,柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (10) : 1-13.
- QIN H H, WANG M F, KE X ZH. Research progress of

wireless optical communication in industrial internet [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (10): 1-13.

作者简介



齐苗苗,2018 年于河北工程大学获得学士学位,2021 年于中国计量大学获得硕士学位,现为北京交通大学博士研究生,主要研究方向为精密测量、高精度光纤时间频率传递和同步。

E-mail: 22110058@bjtu.edu.cn

Qi Miaomiao received her B. Sc. degree from Hebei University of Engineering in 2008, M. Sc. degree from China Jiliang University in 2021. Now she is a Ph. D. candidate in Beijing Jiaotong University. Her main research interests include precision measurement, high-precision fiber-optic time and frequency transfer and synchronization.



梁坤(通信作者),2002 年于北京交通大学获得学士学位,2005 年于北京交通大学获得硕士学位,2008 年于中国科学院国家天文台获得博士学位,现为北京交通大学教授,主要研究方向为精密测量、时间频率标准产生、精准测量、传递和同步(守时、授时)等。

E-mail: liangk@bjtu.edu.cn

Liang Kun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2002, M. Sc. degree from Beijing Jiaotong University in 2005 and Ph. D. degree from National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences in 2008, respectively. Now he is a professor at Beijing Jiaotong University. His main research interests include precision measurement, time and frequency standard generation, accurate measurement, transfer and synchronization (timekeeping, time dissemination), and related fields.