

一种增强型PTP光纤级联精细时频同步方法

戴群雄^{*①②} 郝青茹^{①②} 王铮^{①②} 左兆辉^{①②} 王士楠^③

^①(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

^②(卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

^③(深圳市远东华强导航定位有限公司 深圳 518000)

摘要: 该文提出了一种增强型PTP光纤级联精细时频同步方法,该方法以PTP同步技术为基础,结合同步以太网时钟传递技术和基于数字双混频时差法的多级级联精细时钟同步技术,对PTP技术进行改进和增强,然后基于该方法,通过多级时频设备光纤级联的形式实现多节点、大跨度、网络化的时频信号传递与同步输出,并解决多级级联情况下同步精度会逐级恶化的问题,实现ns量级的系统时间同步精度,保证系统各环节在高度统一的时间尺度下进行高效同步与联动工作。通过设计、试验,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 时频同步; PTP光纤级联; 增强型; 同步以太网时钟传递; 数字双混频时差法

中图分类号: TN921

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1465-07

DOI: 10.11999/JEIT191057

An Enhanced Method of PTP Fiber Cascade Fine Time-frequency Synchronization

DAI Qunxiong^{①②} HAO Qingru^{①②} WANG Zheng^{①②}

ZUO Zhaohui^{①②} WANG Shinan^③

^①(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

^②(State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China)

^③(Fareast Huaqiang Navigation & Position Co., LTD., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In this paper, an enhanced method of PTP fiber cascade fine time-frequency synchronization is proposed. Based on the PTP synchronization technology, combined with the synchronous Ethernet clock transfer technology and the multi-level cascade fine clock synchronization technology based on the digital double mixing time difference method, the PTP technology is improved and enhanced. Then, based on this method, the multi-level time-frequency equipment fiber cascade is used to realize the multi node, large-span and networked time-frequency signal transmission and synchronous output can solve the problem that the synchronization accuracy deteriorates step by step under the condition of multi-level cascade, realizing the ns level system time synchronization accuracy, and ensuring the efficient synchronization and linkage of all parts of the system under the highly unified time scale. The feasibility and effectiveness of the method are verified by design and test.

Key words: Time-frequency synchronization; PTP fiber cascade; Enhanced method; Synchronous Ethernet clock transfer; Digital double mixing time difference method

1 引言

时间统一系统为卫星导航、指挥控制、靶场试

验、网络通信等各型系统建设提供标准时间频率信号和统一的时间尺度^[1],对整个系统运行起到基础性、根本性和保障性的作用。随着信息化技术的发展,国内外各型系统平台对时频应用需求不断朝着高精度、多节点、大跨度的方向发展,为实现系统各个设备之间的高精度同步与联动工作^[2],很有必要建设一个高精度的时频传递与同步网络,解决高精度时频传递、同步及授时等时间统一问题,为设备提供高精度的时频信号^[3]。当前主流的精密时频

收稿日期: 2019-12-31; 改回日期: 2020-10-26; 网络出版: 2020-12-11

*通信作者: 戴群雄 daiqunxiong@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(91638203), 国家重点研发计划(2016YFB0502102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91638203), The National Key Research and Development Program (2016YFB0502102)

传递与同步方法有卫星共视、卫星双向时频传递和光纤时频传递, 本文研究重点为光纤时频传递领域。国内外相关机构及专家在该技术领域进行了相关研究, 赵晓宇等人^[4]研究了基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法, 龙波等人^[5]研究和设计了一种基于UTC溯源与光纤传递的高精度时间同步系统, Zhu等人^[6]研究了在树形分支网络上进行光纤时频传递的钟差测量方法, Krehlik等人^[7]进行了基于干线提取方案的多点光纤时频传递系统研究。本文侧重于研究一种通过多级时频设备PTP光纤级联的形式实现精密时频传递与同步的方法, 以满足上述背景技术中的用时需求。

2 传统NTP/PTP时频同步方法

在进行时频传递与同步网络设计时, 时频信号同步精度以及多节点输出能力、传输跨度是重要考虑的因素及技术难点, 关系到整个系统各设备之间联合运行的效率以及系统能否稳定、高效运行。在早期的时频同步网络建设时, 通常采用较为传统的NTP时间同步技术或PTP时间同步技术来实现网络时间同步^[8]。NTP时间同步技术一般采用NTP协议实现, 其同步精度由于软件时间戳精度以及时间戳产生位置的限制, 同步精度一般在10 ms左右, 精度不高, 且随着级联级数增加, 其同步精度会进一步降低。PTP时间同步技术通过硬件时间戳同步的方式去实施主从同步, 虽然点到点同步精度能达到ns量级^[9], 但是为了满足时频信号大跨度、多节点输出的应用需求, 通常需要将时频设备多级级联来实现, 通过多级级联后, 主从设备时钟相位噪声、线缆铺设长度增加带来的时延误差等会逐级累积, 由此, 系统时间同步精度随着级联级数增加会逐渐降低到 μs 量级或更低。随着信息化平台的不断发展, 这两种方法显然无法满足现有许多系统提出的高精度、多节点、大跨度的时频同步应用需求了。

3 一种增强型PTP光纤级联精细时频同步方法

本文提出了一种增强型PTP光纤级联精细时频同步方法, 该方法以PTP同步技术为基础, 结合同步以太网时钟传递技术和基于数字双混频时差法的多级级联精细时钟同步技术, 对PTP同步技术进行改进和增强, 然后基于这种增强型的PTP级联精细时频同步方法, 解决多级级联情况下同步精度会逐级恶化的问题, 实现ns量级的系统时间同步精度。主要包含如下几个方面:

(1) 采用PTP同步技术, 实现系统时间的粗同步, 将PTP主从同步精度控制到100 ns以内;

(2) 采用同步以太网时钟传递技术, 实现点到点8 ns同步精度;

(3) 采用数字双混频时差法, 实现点到点8 ns以下的细时延同步, 提高PTP同步精度。备注: 经过实际设计与测试, 多级级联(5级)同步精度优于2.5 ns, 具体说明见第4节;

(4) 在多级级联且同步精度得到保证的前提下, 通过这种多级级联的方式实现大跨度范围内时频信号的多节点、高质量的输出, 为系统各节点用时设备提供精密时间基准。

3.1 PTP同步技术

首先, 采用PTP同步技术实现系统时间的粗同步, 其同步的基本原理^[10]如图1所示。

图1中, T_{ms} 表示PTP Master到PTP Slave之间的时延, T_{sm} 表示PTP Slave到PTP Master之间的时延, 通过PTP主设备(PTP Master)与PTP从设备(PTP Slave)之间的报文交互, 进行一次完整的PTP同步后, PTP Slave端获得 t_1, t_2, t_3, t_4 时间戳, 在收、发路径相同的情况下, 即可计算出PTP主、从之间的时间偏差 ofm ^[11]

$$\begin{aligned} ofm &= (t_2 - t_1) - [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)] / 2 \\ &= [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

PTP主从之间通过多次同步, PTP从根据计算出的 ofm 调整自身时间, 即可实现主从时间的粗同步, 同步精度为100 ns以内。

3.2 同步以太网时钟传递技术

本发明结合同步以太网技术, 实现系统时钟的逐级传递, 在PTP粗同步技术基础上, 为多级级联组网提供了统一的组网时钟基准。同步以太网技术是一种采用以太网链路码流恢复时钟的技术^[12], 简称SyncE。同步以太网通过以太网物理层芯片从串

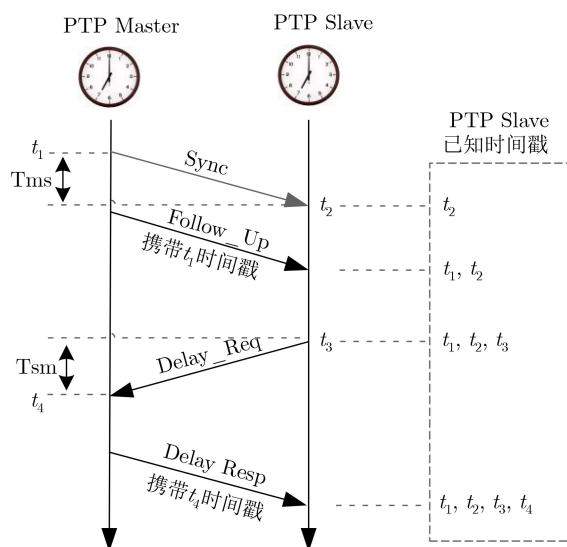


图1 PTP同步原理框图

行数据码流中恢复出发送端的时钟，从而实现网络时钟同步^[13,14]。同步以太网时钟传递示意图如图2所示。

图2中，对于PTP主设备，通过时频综合模块产生的基准时钟，作为主设备本地参考时钟、PTP内核时钟、PTP计数时钟，并同时注入到串行数据中，通过光纤，逐级传递。PTP从设备采用同步以太网时钟恢复技术，恢复出PTP主设备的基准时钟，传递给时频综合模块，经过时频综合模块锁相同步等处理，输出本地参考时钟，实现PTP从时频基准与PTP主时频基准同步；同时，将恢复时钟对下级PTP从设备，逐级传递，实现PTP主设备时频基准时钟的全网传递及同步功能。由于主从设备本地参考时钟为125 M，该时钟的时间戳精度为8 ns，在PTP主、从采用同步以太网实现频率同步的情况下，实现点对点正负8 ns的同步精度。

3.3 多级级联精细时钟同步技术

通过同步以太网技术，实现了PTP各节点的时钟传递，但点对点的同步精度只能达到8 ns；同时，在实施级联同步时，PTP主节点与级联PTP

从节点的时钟相位噪声会不断累积，同步精度会逐级恶化。

如何有效地抑制级联级数增大带来的时钟相位噪声累积，并实现8 ns以下的精细时钟同步，是实现高精度系统时间同步的关键。在PTP主、从设备采用同步以太网实施同步时，其同步流程为：PTP主设备→恢复时钟→时频综合→本地参考时钟，单纯通过时频综合模块对恢复时钟进行锁相处理的方式实现主从同步，同步精度决定于锁相输出时钟的时间戳精度，指标受限。为了进一步提升精度，该文采用数字双混频时差法(DMTD)^[15,16]，对时频综合模块输出本地参考时钟与恢复时钟之间的钟差进行精测，测量精度达到ps量级^[17]，然后将精测得到的钟差再反馈给时频综合模块，时频综合模块根据反馈的钟差调整输出时钟频率^[18]，这种精密时差测量及补偿的过程反复迭代，完成PTP同步的精细传输延迟的测量、传递和同步，实现8 ns以下的精细时钟同步，点到点同步精度可达到亚ns量级，PTP同步精度得到有效提升。结合数字双混频时差法实现级联精细时钟同步的工作原理示意图如图3所示。

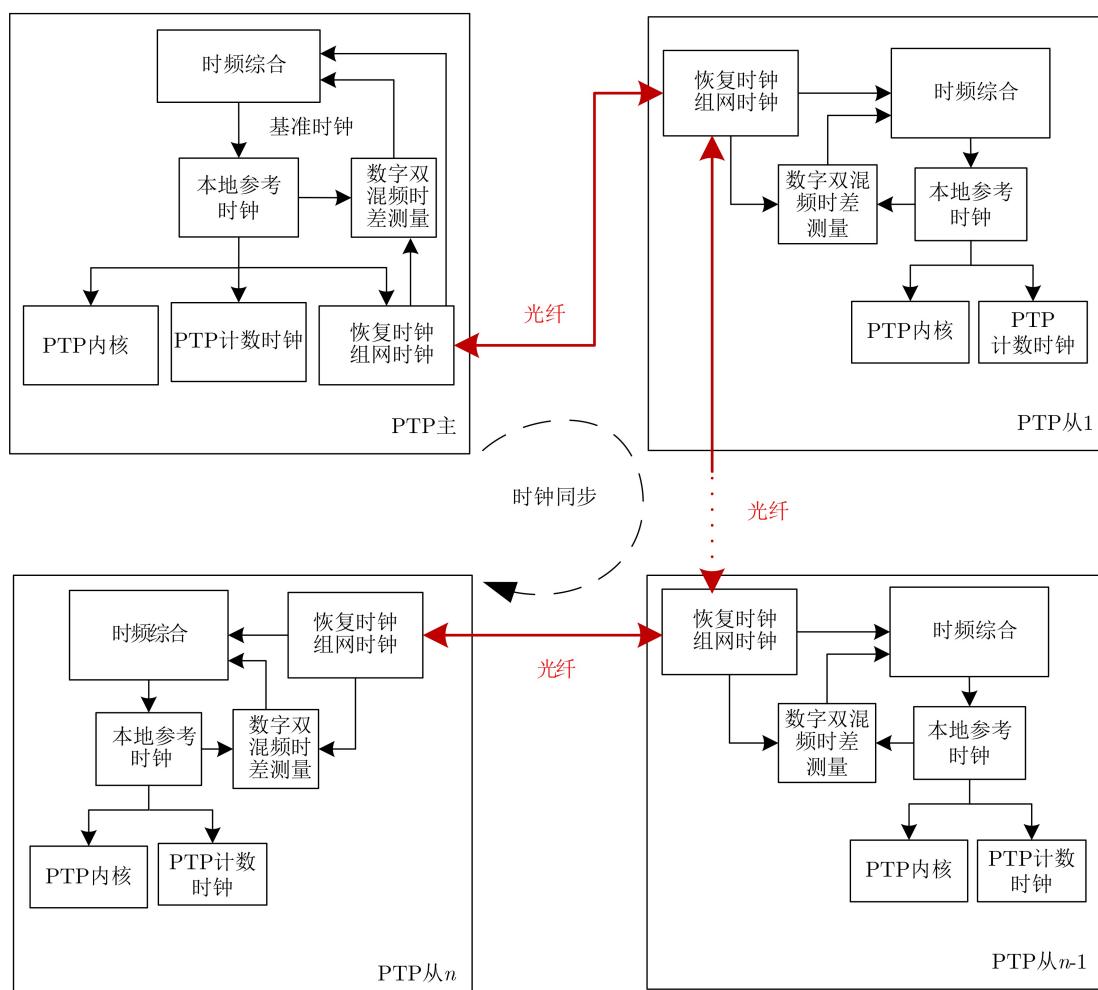


图2 同步以太网时钟传递示意图

从图3可以看出,本文主要通过DMTD精细时差测量模块和时频综合模块来完成PTP主设备与PTP从设备时钟钟差精细测量与同步;其中,时频综合模块又包括恒温晶振模块和MCU。级联精细时钟同步具体工作原理及流程如下:

(1) 恒温晶振模块输出125 MHz时钟作为本地参考时钟,输出10 MHz时钟作为MCU工作时钟;

(2) DMTD精细时差测量模块接收PTP从设备通过同步以太网技术从串行数据中恢复的125 MHz时钟,代表PTP主设备时钟,同时接收恒温晶振模块输出的125 MHz时钟,代表PTP从设备时钟;

(3) DMTD精细时差测量模块完成主从钟差精细测量并输出给MCU;

(4) MCU对钟差进行滤波等综合处理后,生成调钟信息;

(5) 恒温晶振模块接收调钟信息,调整输出时钟频率,实现PTP主从设备精细时钟同步。

4 设计验证与分析

为了验证本方法的可行性和有效性,按照图4所示搭建验证平台。由于试验条件受限,搭建5级PTP光纤级联时频传递与同步系统作为验证平台,系统由5级时频设备组成。第1级设备为系统基准设

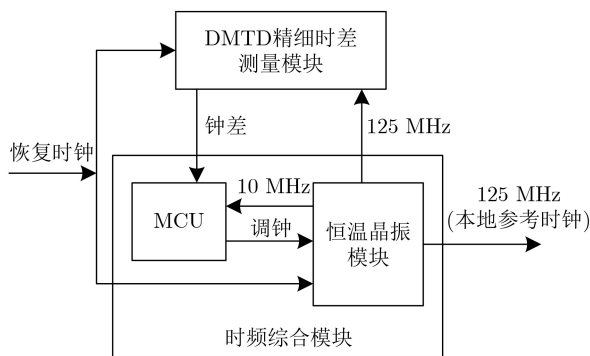


图3 级联精细时钟同步工作原理示意图

备,为整个系统提供时源参考,第2~5级设备输出的1 pps为同步第1级设备时源之后输出的时频信号,其相对于时源1 pps的同步误差直接反映了多级级联后系统时间同步精度^[19]。

本次试验通过时间间隔计数器同时记录第2~5级设备输出的1 pps与系统时源1 pps的时差^[20],持续记录时间为24 h,每台设备对应的记录数据为86400个,然后对试验数据进行分析,分析的要素为同步误差。图5(a)、5(b)、5(c)、5(d)所示分别为第2级设备、第3级设备、第4级设备、第5级设备同步误差测试结果(原始时差记录数据),其同步误差分析见表1。

结合图5和表1来看,这4级设备同步误差(标准差)均控制在0.5 ns以内,依次为0.3573 ns, 0.4158 ns, 0.2931 ns, 0.4076 ns,同步误差(最大时间间隔误差)依次为1.454 ns, 1.769 ns, 2.136 ns, 2.328 ns,输出均较为平缓且未出现跳变的情况。由于设备/线缆等存在时延,时延经过标定和补偿予以消除^[21],但受到标定和补偿精度的限制,依然会存在部分残差,因此会逐级损失掉一部分同步精度指标^[22],但从实测数据来看,经5级级联后,系统时间同步精度(最大时间间隔误差)依然控制在2.5 ns以内,表现出很好的多级级联系统时间同步性能,由此验证了本文提出的增强型PTP光纤级联精细时频同步方法的可行性和有效性。

5 结论

本文以PTP同步、同步以太网时钟传递、多级级联精细时延同步3个关键技术为基础,经过深入分析和研究,提出了一种增强型PTP光纤级联精细时频同步方法,并通过设计、试验,验证了这一方法的可行性和有效性。本文提出的方法相比传统网络时间同步方法,具有如下优点:

(1) 采用同步以太网时钟传递技术和基于数字

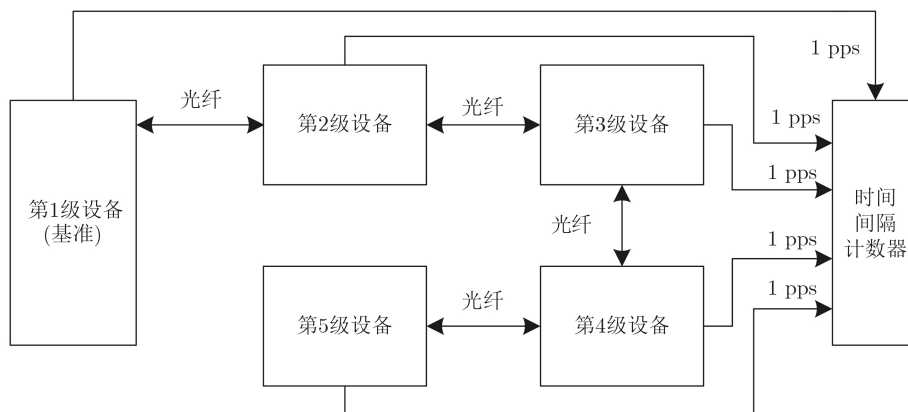


图4 试验验证测试连接图

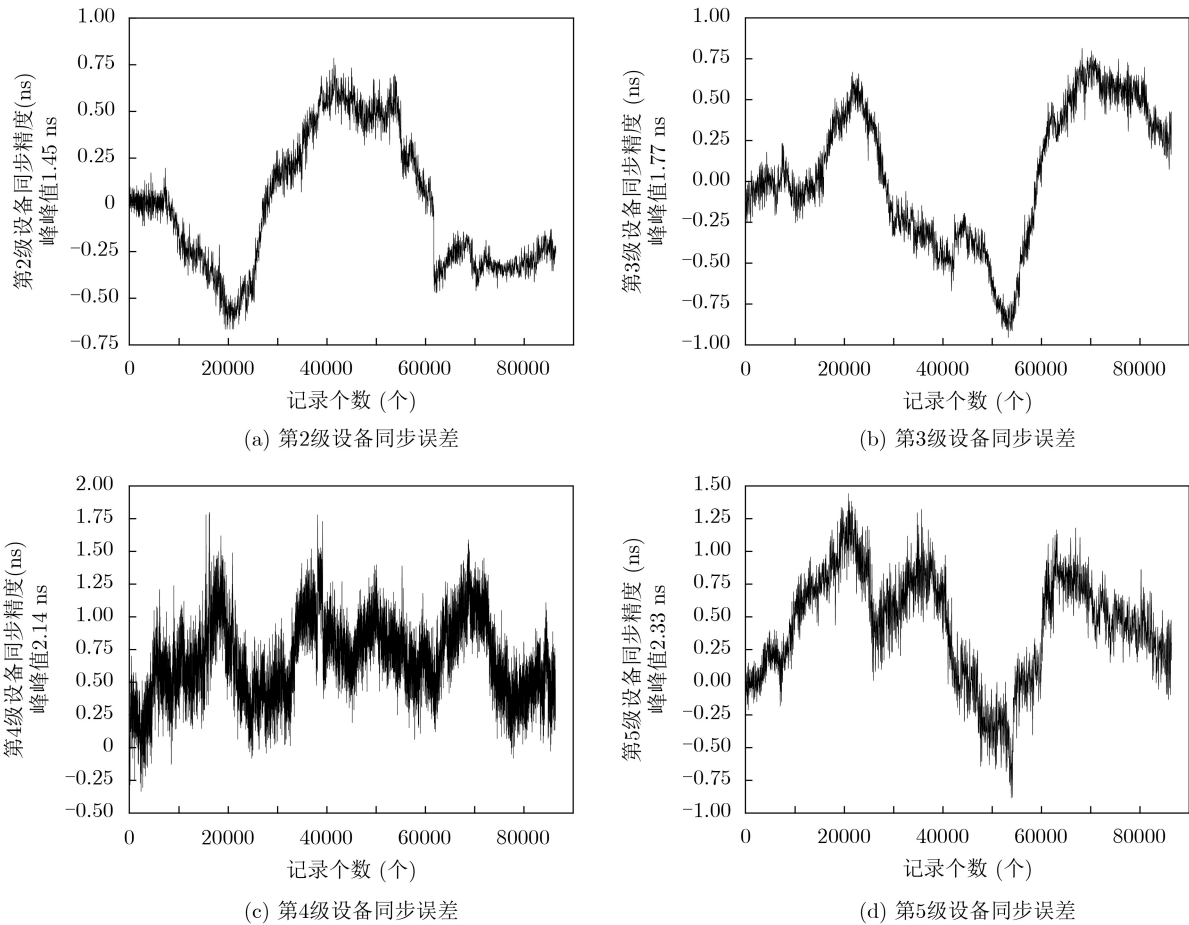


图5 试验验证同步误差测试结果(原始时差记录数据)

表1 同步误差(ns)

	标准差	最大时间间隔误差(峰峰值)	最小值	最大值
第2级设备	0.3573	1.454	-0.667	0.787
第3级设备	0.4158	1.769	-0.956	0.813
第4级设备	0.2931	2.136	-0.336	1.8
第5级设备	0.4076	2.328	-0.886	1.442

双混频时差法的多级级联精细时钟同步技术，对PTP同步技术进行改进和增强，点到点同步精度可达到亚ns量级，同步精度得到显著提升。

(2) 经过实际设计与测试验证，多级级联(5级)后的同步精度可控制在2.5 ns以内，同步精度依然控制在ns量级，极大地满足了各型系统不断提升的高精度时频同步应用需求。

(3) 在满足多级级联而同步精度依然得到有效保证的前提下，通过这种多级级联的方式可在大跨度范围内将时频信号同步传送到系统各节点用时设备，大大提高时频信号输出能力，满足各型系统多节点、大跨度的时频应用需求。

该方法通过实物验证并工程实现后，可为各型系统提供一个高精度时频传递与同步网络，为系统

提供高精度、全覆盖的授时服务，也为相关行业应用提供了可借鉴的设计方案^[23]，具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 索晓楠, 雷鸣, 陈俊彪. 网络化靶场综合模拟试验网时间统一系统研究[J]. 电子设计工程, 2011, 19(19): 99-101, 106. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2011.19.039.

SUO Xiaonan, LEI Ming, and CHEN Junbiao. Time unified system research in comprehensive simulation test network of network range[J]. *Electronic Design Engineering*, 2011, 19(19): 99-101, 106. doi: 10.3969/j.issn.1674-6236.2011.19.039.

[2] 谢春胜. 系统间实时同步问题的研究[J]. 电子对抗技术, 2002, 17(6): 32-35, 43. doi: 10.3969/j.issn.1674-2230.2002.06.008.

XIE Chunsheng. A research into real-time synchronization among systems[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2002, 17(6): 32-35, 43. doi: 10.3969/j.issn.1674-2230.2002.06.008.

[3] 刘琴, 陈炜, 徐丹, 等. 采用级联方式在230 km光纤链路中同时实现频率传递和时间同步[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305006-1-0305006-7. doi: 10.3788/CJL201643.0305006.

LIU Qin, CHEN Wei, XU Dan, et al. Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a cascaded

- fiber link of 230 km[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0305006-1-0305006-7. doi: [10.3788/CJL201643.0305006](https://doi.org/10.3788/CJL201643.0305006).
- [4] 赵晓宇, 卢麟, 吴传信, 等. 基于光纤环形网的多点高精度时频传递方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0606002-1-0606002-7. doi: [10.3788/AOS201939.0606002](https://doi.org/10.3788/AOS201939.0606002).
- ZHAO Xiaoyu, LU Lin, WU Chuanxin, *et al.* Ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0606002-1-0606002-7. doi: [10.3788/AOS201939.0606002](https://doi.org/10.3788/AOS201939.0606002).
- [5] 龙波, 王菊凤, 黄徐瑞晗, 等. 基于NIMDO及光纤传递的高精度时间同步系统研究[J]. *计量学报*, 2019, 40(5): 904-909. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2019.05.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2019.05.27).
- LONG Bo, WANG Jufeng, HUANG-XU Ruihan, *et al.* Study of high precision time synchronization system based on NIMDO and optical fiber transfer[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(5): 904-909. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2019.05.27](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2019.05.27).
- [6] ZHU Xi, WANG Bo, GUO Yichen, *et al.* Robust fiber-based frequency synchronization system immune to strong temperature fluctuation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(1): 010605-1-010605-5. doi: [10.3788/COL201816.010605](https://doi.org/10.3788/COL201816.010605).
- [7] KREHLIK P, SLIWICZYNSKI L, BUCZEK L, *et al.* Multipoint dissemination of RF frequency in fiber optic link with stabilized propagation delay[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2013, 60(9): 1804-1810. doi: [10.1109/TUFFC.2013.2766](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2766).
- [8] 丁广, 邵健, 张建飞, 等. 高精度网络对时技术及其应用[J]. *数字通信世界*, 2013(1): 67-70. doi: [10.3969/j.issn.1672-7274.2013.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7274.2013.01.016).
- DING Guang, SHAO Jian, ZHANG Jianfei, *et al.* High precision network timing technology and its application[J]. *Digital Communication World*, 2013(1): 67-70. doi: [10.3969/j.issn.1672-7274.2013.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7274.2013.01.016).
- [9] 马昭, 葛文双, 胡爱兰, 等. 基于PTP授时的高可靠时间统一系统的应用研究[J]. *电子技术应用*, 2019, 45(5): 38-42. doi: [10.16157/j.issn.0258-7998.190161](https://doi.org/10.16157/j.issn.0258-7998.190161).
- MA Zhao, GE Wenshuang, HU Ailan, *et al.* Application research of high reliability time unified system based on PTP strategy[J]. *Application of Electronic Technique*, 2019, 45(5): 38-42. doi: [10.16157/j.issn.0258-7998.190161](https://doi.org/10.16157/j.issn.0258-7998.190161).
- [10] 刘潇, 李长俊. 基于IEEE1588网络时间同步系统的研究[J]. *仪器仪表用户*, 2018, 25(9): 9-11. doi: [10.3969/j.issn.1671-1041.2018.09.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1041.2018.09.003).
- LIU Xiao and LI Changjun. Research on time synchronization system based on IEEE1588 network[J]. *Instrumentation Customer*, 2018, 25(9): 9-11. doi: [10.3969/j.issn.1671-1041.2018.09.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1041.2018.09.003).
- [11] 朱炎平, 陆俊, 徐志强, 等. 智能变电站IEEE 1588同步时延优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(12): 148-153. doi: [10.7500/AEPS20170512010](https://doi.org/10.7500/AEPS20170512010).
- ZHU Yanping, LU Jun, XU Zhiqiang, *et al.* Optimization method of IEEE 1588 synchronization time delay for smart substation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(12): 148-153. doi: [10.7500/AEPS20170512010](https://doi.org/10.7500/AEPS20170512010).
- [12] 晁大海, 范业明. 基于DP83640同步以太网模式的深海探测系统[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(4): 131-133, 142. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.029).
- CHAO Dahai and FAN Yeming. Deep sea exploration system based on DP83640 synchronous Ethernet mode[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(4): 131-133, 142. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.04.029).
- [13] 湛伟. 高速Serdes技术的发展趋势和挑战[J]. *电子产品世界*, 2019, 26(9): 48-53. doi: [10.3969/j.issn.1005-5517.2019.09.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-5517.2019.09.011).
- ZHAN Wei. Development trend and challenge of high speed Serdes technology[J]. *Electronic Engineering & Product World*, 2019, 26(9): 48-53. doi: [10.3969/j.issn.1005-5517.2019.09.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-5517.2019.09.011).
- [14] 李培基, 李卫, 朱祥维, 等. 网络时间同步协议综述[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(3): 30-38. doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1809-0008](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1809-0008).
- LI Peiji, LI Wei, ZHU Xiangwei, *et al.* Overview of network time synchronization protocol[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(3): 30-38. doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1809-0008](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1809-0008).
- [15] 张越, 王玉琢, 张爱敏, 等. 基于多路双混频时差测量仪的新频率测量系统[J]. *计量学报*, 2018, 39(4): 568-571. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2018.04.25](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2018.04.25).
- ZHANG Yue, WANG Yuzhuo, ZHANG Aimin, *et al.* Research on system of new frequency measurement based on multi-channel dual mixer time difference measurement instrument[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(4): 568-571. doi: [10.3969/j.issn.1000-1158.2018.04.25](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2018.04.25).
- [16] 徐超, 刘军良, 胡永辉. 双混频时差测量系统的误差分析与试验研究[J]. *时间频率学报*, 2018, 41(3): 206-213. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2018-03-0206-08](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2018-03-0206-08).
- XU Chao, LIU Junliang, and HU Yonghui. Error analysis and experiment of dual mixer time difference measurement system[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2018, 41(3): 206-213. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2018-03-0206-08](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2018-03-0206-08).
- [17] 许龙飞, 罗丹, 周渭, 等. 一种全面响应时间的频率稳定度测量[J]. *西安电子科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 45(1): 72-75, 122. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.013).
- XU Longfei, LUO Dan, ZHOU Wei, *et al.* Method of a comprehensive response time of frequency stability[J]. *Journal of Xidian University*, 2018, 45(1): 72-75, 122. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2018.01.013).
- [18] 何力睿, 章巍, 熊嘉明, 等. 保持模式下恒温晶振频率补偿方法

- [J]. 导航定位与授时, 2019, 6(1): 87–91.
- HE Lirui, ZHANG Wei, XIONG Jiaming, *et al.* A frequency compensation Method of OCXO in hold mode[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2019, 6(1): 87–91.
- [19] 邹昕洋, 张友鹏. 基于PTP协议的铁路时间同步网络同步技术研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(5): 133–137. doi: [10.13238/j.issn.1004-2954.201807260003](https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.201807260003).
- ZOU Xinyang and ZHANG Youpeng. Research on synchronization technology of railway time synchronization network based on PTP protocol[J]. *Railway Standard Design*, 2019, 63(5): 133–137. doi: [10.13238/j.issn.1004-2954.201807260003](https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.201807260003).
- [20] 苗苗, 周渭, 李智奇, 等. 用于时间同步的高精度短时间间隔测量方法[J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(4): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1007-5321.2012.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5321.2012.04.018).
- MIAO Miao, ZHOU Wei, LI Zhiqi, *et al.* Application research of high-precision time interval measurement on time synchronization[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2012, 35(4): 77–80. doi: [10.3969/j.issn.1007-5321.2012.04.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5321.2012.04.018).
- [21] 金虎, 王玉松. 舰艇协同防空时间同步误差对目标定位的影响[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(9): 45–47, 104. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.011).
- JIN Hu and WANG Yusong. Analysis on the influence of time synchronization error on target location under multi-platform synergistic air defense mode of surface ship[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(9): 45–47, 104. doi: [10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9730.2019.09.011).
- [22] 张安旭, 孙亨利, 戴一堂, 等. 光纤时频传输及其在航天探测中的应用[J]. 无线电工程, 2016, 46(9): 15–19, 23. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2016.09.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2016.09.04).
- ZHANG Anxu, SUN Hengli, DAI Yitang, *et al.* Time and frequency transmission over optical fiber and its applications in aerospace measurement[J]. *Radio Engineering*, 2016, 46(9): 15–19, 23. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2016.09.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2016.09.04).
- [23] 戎强, 王铮, 韩华. 一种用于网络同步的授时时统设计与实现[J]. 计算机与网络, 2014, 40(14): 55–58. doi: [10.3969/j.issn.1008-1739.2014.14.052](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1739.2014.14.052).
- RONG Qiang, WANG Zheng, and HAN Hua. Design and implementation on a timing and time uniform system applied in network synchronization[J]. *Computer & Network*, 2014, 40(14): 55–58. doi: [10.3969/j.issn.1008-1739.2014.14.052](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1739.2014.14.052).
- 戴群雄: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为卫星导航、时间频率.
- 郝青茹: 男, 1966年生, 研究员, 研究方向为卫星导航、时间频率.
- 王 铮: 男, 1988年生, 高级工程师, 研究方向为卫星导航、时频频率.
- 左兆辉: 男, 1986年生, 高级工程师, 研究方向为卫星导航、时间频率.
- 王士楠: 男, 1987年生, 工程师, 研究方向为时间频率.

责任编辑: 陈 倩