

引用格式:王康,李孝辉,寇无玷,等. 国家授时中心的网络授时技术发展[J]. 时间频率学报, 2026, 49(1): 105-112.

国家授时中心的网络授时技术发展

王康^{1,2,3}, 李孝辉^{1,2,3}, 寇无玷^{1,2,3}, 华宇^{1,2,3}, 张首刚^{1,2,3}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:时间频率是国家重要的战略资源,网络授时技术作为传递标准时间的关键手段,已成为数字经济和社会运行的基石。以中国科学院国家授时中心为研究视角,系统梳理了中国网络授时技术从 20 世纪 90 年代至今的发展演进历程。论述了在互联网初期,国家授时中心如何作为中国网络授时服务的开拓者,引入并建立了基于“北京时间”即协调世界时(中国科学院国家授时中心)(UTC(NTSC))的初级网络授时服务体系。进入 21 世纪,面对潜在的安全风险,国家授时中心主导推动了技术自立与创新,通过建设自有网络授时服务器集群并利用国家科教网络基础设施,初步构建了国家自主的网络授时体系。近年来,随着北斗全球卫星导航系统的建成,成功实现了“北斗+网络”的深度融合发展,将网络授时的源头、服务和精度提升至全新水平,并积极布局面向未来工业互联网与通信网络等的精密网络授时应用。

关键词:网络授时;时间同步;网络时间协议;精密时间协议

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0105-08

Development of the network time service of the National Time Service Center

WANG Kang^{1,2,3}, LI Xiao-hui^{1,2,3}, KOU Wu-dian^{1,2,3}, HUA Yu^{1,2,3}, ZHANG Shou-gang^{1,2,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Time and frequency are crucial strategic resources for a country. Network time synchronization technology, as a key means of transmitting standard time, has become a cornerstone of the digital economy and social operations. This paper takes the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences as a research perspective and systematically reviews the development and evolution of China's network time synchronization technology from the 1990s to the present. This paper discusses that in the early days of the Internet, the National Time Service Center, as a pioneer of China's network time service, introduced and established a primary network time synchronization service system based on "Beijing Time" (Coordinated Universal Time(National Time Service Center), UTC(NTSC)). Entering the 21st century, in the face of potential security risks, the National Time Service Center led and promoted technological

收稿日期:2025-08-18;接受日期:2025-10-09

基金项目:国家自然科学基金(42404058);中国博士后科学基金(2024M753246)

作者简介:王康,男,博士,正高级工程师,主要从事 NTP 及 PTP 网络授时技术的研究。

independence and innovation, and initially built a national independent network time synchronization system by constructing its own network time service server cluster and utilizing the national education and science network infrastructure. In recent years, with the completion of the Beidou Global Satellite Navigation System, the deep integration and development of “Beidou + network” has been successfully achieved, raising the source, service and accuracy of network time synchronization to a new level, and actively laying out the application of the precision time service for future industrial Internet and communication networks.

Keywords: network time service; time synchronization; network time protocol (NTP); precise time protocol (PTP)

授时技术,即将标准时间信号传递到用户端的技术,随着信息化技术需求的发展,其重要性日益凸显,其发展水平直接关乎国家经济社会的正常运行与战略安全。

在诸多授时手段中,网络授时技术因其依托无处不在的互联网和通信网络,具备覆盖范围广、部署成本低、使用便捷等先天优势,已成为应用最为广泛、与普通民众和现代服务业关系最为密切的授时方式。从最初的网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)到为满足更高精度需求而诞生的精密时间协议(Precise Time Protocol, PTP),网络授时技术的发展史,是一部精度不断提升、可靠性不断增强、应用领域不断拓展的历史,更是一部与互联网技术演进深度交织、相互促进的历史。

目前,虽已有大量文献分别探讨 NTP/PTP 协议原理或卫星授时技术,但罕有研究从一个国家授时体系的建设者和运营者的宏观视角出发,系统性地回顾网络授时技术的完整发展脉络。

当互联网时代来临,中国科学院国家授时中心成为了中国网络授时技术从无到有、从弱到强、从依赖引进到自主创新的主导者与见证者。其发展路径,深刻体现了国家战略需求与前沿技术突破之间的动态互动。有鉴于此,本文旨在以国家授时中心为叙事轴心,通过梳理其不同历史时期的技术选择、创新突破与服务体系构建,首次系统地勾勒中国网络授时技术从探索、引进、自立到飞跃的演进全貌。本研究不仅有助于填补该领域技术史研究的空白,更能为未来新一代授时技术(如量子授时、弹性授时网络)的发展提供宝贵的历史经验与战略启示。

本文首先回顾国家授时中心在互联网前的技术储备,随后分阶段论述其在 NTP 服务引入、自主服务体系构建、以及与北斗系统融合创新等关键时

期的实践与贡献,最后对未来挑战与趋势进行展望,以期理解中国数字基础设施的隐形基石提供一个深刻而独特的视角。

1 1981 年,首个 NTP 网络授时协议发布,开启网络授时新时代

美国国防部先进研究项目局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)在 1983 年分别发布了日期协议(Daytime Protocol)与时间协议(Time Protocol),其文档编号分别为 RFC(Request For Comments)867^[1]与 RFC868^[2]。日期协议使用网络端口号为 13,用于向被溯源网络节点发送表示时间及时区的美国信息交换标准代码(American Standard Code for Information Interchange, ASCII)。时间协议使用的网络端口号为 37,用于向被溯源网络节点发送自公元 1900 年 1 月 1 日零时起的累计 32 位累加秒数。因为二者的计时最小单位为秒,故时间同步精度只能达到秒级水平,并且没有对网络延时进行计算的内容。

NTP 是从时间协议与互联网控制消息协议(Internet Control Message Protocol, ICMP)时间戳信息演变而来,由美国 Delaware 大学的 Mills^[3]教授在 1981 年 4 月发表的同步技术的文章中阐述,文档编号为 RFC778。1985 年 NTP 版本 0(文档编号为 RFC958)^[4],该版本定义了 NTP 报头格式以及偏移与延迟的计算。1988 年 NTP 版本 1 推出,文档编号为 RFC1059^[5]。该版本是第一份综合性的协议和算法的规范,包括了早期版本的时钟滤波、选择和驯化算法。并且首次定义了客户端/服务器与对称两种工作模式,以及首次在报头里使用了版本域的概念。NTP 版本 2 在 1989 年推出,文档编号为 RFC1119^[6]。该文献首次包括了一个正式的锁相环模型、描述协议的状态机和定义操作的伪代

码,进一步完善了 NTP 设计规则。

互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force,IETF)于 1992 年发布 NTP 版本 3,全称为“网络时间协议版本 3:协议与算法规范(Network Time Protocol Version 3:Protocol and Algorithms Specification)”,文档编号为 RFC1305^[7]。该标准通过网络确定的若干节点作为时钟源节点,以此来为用户提供统一、标准的授时服务。

NTP 版本 3 发布后,一直在不断地进行改进,NTP 实现的一个重要功能是对计算机操作系统的时钟调整。在 NTP 版本 3 研究和推出的同时,有关在操作系统核心中改进时间保持功能的研究也在并行地进行。1994 年推出了 RFC1589^[8],名为 A Kernel Model for Precision Timekeeping,即精密时间保持的核心模式,这个实现可以把计算机操作系统的时间精确度保持在微秒数量级。

2010 年 6 月 IETF 推出了最新的 NTP 版本 4,全称为“网络时间协议版本 4:协议与算法规范(Network Time Protocol Version 4:Protocol and Algorithms Specification)”,文档编号为 RFC5905^[9],其主要更新是增加了 IPv6 报头的报文格式。

综上所述,NTP 的技术一直向更高精度、更强的兼容性和多平台的适应性方向发展。

2 1999 年,陕西天文台开始基于互联网的网路授时服务

1999 年被中国政府命名为“政府上网年”,这表明以计算机网络为基础的信息产业即将建成。很多信息产业都严格要求业务操作时刻与标准时间同步。因此,实现计算机互联网络授时、定时就非常必要。

1999 年秋,中国科学院陕西天文台(2001 年更名为中国科学院国家授时中心)在《时间频率公报》1999 年第 9 期刊登了网络授时的试运行公告,如图 1 所示,标志着我国第一个网络授时系统建成^[10]。陕西天文台完成网络授时系统建设,在 2001 年正式运行。授时网址是 <http://kxzh.sxso.ac.cn>。作为中低精度时间服务的重要手段,用户群体不断增长,已成为一种规范化管理的授时手段而纳入授时体系。

国家授时中心在 2002 年对系统进行了进一步改进,更新网址为 <http://time.ntsc.ac.cn>,IP(Internet Protocol)地址为 210.72.145.44。授时服务器用国

际标准时间主钟系统信号进行驱动校准,保证与 UTC(NTSC)(Coordinated Universal Time(National Time Service Center))保持精密同步。该系统的授时精度优于 100 ms。

I. 低频甚低频传播突然扰动*										
Sudden LF & VLF Propagation Disturbances										
1999 年	开始	最大	结束	类别	SPA	SPA	SPA	SPA	SPA	SPA
9 月	START	MAX	END	IMP	LF	LF	LF	LF	LF	LF
日	(UT)	(UT)	(UT)		$\Delta f(\mu s)$	$\Delta f(\mu s)$	$\Delta f(\mu s)$	$\Delta f(\mu s)$	$\Delta f(\mu s)$	$\Delta f(\mu s)$
12	0147	0232	0335	1-	-0.8	-0.2	-	-	-	+2.1
12	0341	0402	0430	1-	-0.4	-0.4	-	-	-	0
12	0600	0630	0717	1-	-0.5	-0.9	-	-	-	-1.9
14	0236	0401	0435U	1-	-0.7	-0.3	-	-	-	+3.4
14	0440	0501	0540	1-	-0.5	-0.5	-	-	-	0
16	0130	0144	0200	1-	-0.8	-0.7	-	-	-	+1.1
16	0221	0301	0328D	2+	-5.2	-5.4	-	-	-	-5.7,+2.3
16	0326	0403	0530D	2-	-3.7	-3.9	-	-	-	-3.5,+1.2
16	0648	0702	0755	1-	-0.6	-1.0	-	-	-	+3.9
24	0120	0222	0350D	2+	-5.4	-5.3	-	-	-	0
25	0540	0634	0720	2+	-3.8	-5.4	-	-	-	-2.8,+4.4
30	0140	0213	0222D	2	-3.9	-4.2	-	-	-	-1.2,+2.5

*本月 1 日~11 日,17 日~20 日无观测。

陕西天文台网络授时投入试运行

信息产业在飞速发展,电话、计算机互联网以及作为网络终端重要设备的计算机都在迅猛发展。中国电信交换机总量 1999 年底可达 1.7 亿门,中国电信已建成的“八横八纵”光纤通信网络,可以覆盖中国大部分地区,传输数字化率几乎达到 100%,其现代化水平甚至超过一些发达国家。截止 1998 年底的统计结果表明,个人计算机全国以每年 200 万台的速度增加。1999 年被中国政府命名为“政府上网年”,这更表明以计算机网为基础的信息产业将建成。

很多信息产业都严格要求业务操作时刻与标准时间同步,比如在股票交易中实现融资融券、银行业务中实现实时汇兑、互联网背景中的实时信息交换等,都要求互联网中的计算机与标准时间同步。因此,研究计算机互联网络授时,应时技术就非常必要。陕西天文台研制的计算机互联网络授时系统现已投入试运行。授时网址是:<http://kxzh.sxso.ac.cn>

本系统软件主要采用 Windows 编写,基于 TCP/IP 协议的点对点模式(Screen)通信模式。任一互联网用户,不需增加任何硬件设备,只需从陕西天文台授时网址中下载用户软件,并按步骤运行该软件,即可简单方便的实现与服务器时间同步。网络授时同步精度可达 0.5 秒,在局域网内最高可达 50 毫秒。

截止目前,已有 200 多用户访问授时网站,40 多用户先后 300 多次校准了时间。许多用户发来 E-mail 表示感谢,认为该软件界面友好,操作简单方便,也提出了一些改进意见。

我们衷心感谢互联网计算机用户对网络授时系统网站,并提出宝贵意见。

授时系统网址:<http://kxzh.sxso.ac.cn>
E-mail 地址: kxzh@sxso.ac.cn

陕西 (柯周政、和康元、董海波)

图 1 陕西天文台网络授时投入试运行公告

该系统采用了国家授时中心研制的 NTC-100 型 SNTP 网络时间服务器,如图 2 所示。计算机校时软件及服务请求监测软件分别如图 3 及图 4 所示。



图 2 NTC-100 型 SNTP 网络时间服务器



图 3 计算机校时软件界面

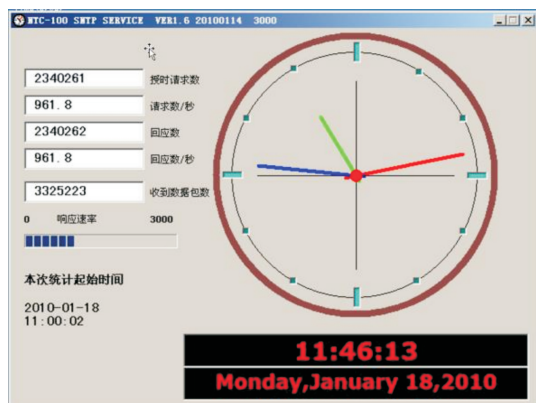


图 4 服务请求监测软件界面

网络授时服务器投入运行后,用户量不断上升,到 2009 年,全年应答用户授时请求数达到近 216 亿次,平均每天 5 930 万次,平均每秒 686 次。到 2013 年前后,年访问量达到 266 亿次,平均每天 7 300 万次,平均每秒 840 余次。

由于网络授时的用户量巨大,国内有多家单位开始了网络授时系统的建设,例如阿里云 NTP、北京邮电大学、清华大学等^[11]。中国计量科学研究院建立和维护的网络时间服务系统以协调世界时(中国计量科学研究院)(Coordinated Universal Time (National Institute of Metrology), UTC(NIM))作为标准时间,通过 IP 地址 111.203.6.13 接入互联网提供授时服务^[12]。该系统以高准确度和高速率面向网络用户免费提供优质的时间同步信息,在非拥堵网络状态下用户端可以获得优于 100 ms 准确度的时间服务。

3 2005 年,国家授时中心的网络精灵授时服务访问量超过百万

为了更加高效地推进网络授时的普及,并简化网络授时用户的操作,国家授时中心开发了“时间精灵”网络授时客户端,以便用户随时方便地从网络上获取北京时间。图 5 为时间精灵网页界面。



图 5 时间精灵网页界面

“时间精灵”基于微软公司的 .net 软件平台开发,利用 .net 先进的网络平台服务和优化的系统程序结构,用于用户比对用户计算机时间与北京时间的偏差,并对本机的时间进行调整。由于不需要复杂的数据交换,这款校时工具对不同操作系统和网络环境更具普适性和兼容性,可以自动适应当时主流的 Windows98 和 Windows XP,也可以使用用户的代理服务器和防火墙配置,唯一要求的是具备上网条件。

“时间精灵”在 2004 年 5 月 1 日通过“时间网站”(http://www.time.ac.cn)发布,到 2005 年 9 月 13 日,在一年多的时间内,访问量就突破百万^[13]。“时间精灵”已广泛为电信、金融、证券期货等行业所采用,日访问量近 4 000 次。“时间精灵”具备易用性和小巧型的特点,让用户方便地获取国家授时中心提供的专用时间服务器的北京时间。

4 2009 年,国家授时中心完成了基于 PTP 的纳秒级平台设计与实现

2002 年,IEEE 标准委员会批准了 IEEE1588 标准,该标准全称为“网络测量与控制系统的精密时间同步协议(Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems)”,简称为 PTP,引入了边界时钟模型^[14]。2008 年,发布了第二版,引入了透明时钟模型,包括端对端(end to end, E2E)透明时钟和点对点(peer to peer, P2P)透明时钟,计算中间网络设备引入的驻留时间,从而实现主从间精确时间同步,并新增端口间延时测量机制等,通过非对称校正减少了大型网络拓扑中的积聚错误,能更好地适应网络结构^[15]。2019 年发布的 2.1 版本提供更广泛的兼容性^[16]。

PTP 引入边界时钟与透明时钟的概念,替代 NTP 协议中的普通交换设备,以去除报文传输不确定性因素带来抖动的影响进而提高同步精度。

相较于 NTP,PTP 初始构思适用于网络环境与拓扑结构相对简单的网络,例如局域网或者工业以太网,其目的是为了降低甚至避免复杂网络环境对于网络时间纠正引入的误差。进而描述了在报文硬件发送接收单元直接插入本地时间戳的方法,来消除本地软件处理时间戳引入的时间同步误差。即使不使用硬件时钟辅助,同步精度也能到微秒量级,如果添加硬件时钟辅助可将同步精度提高到纳秒量级,满足特定网络对于精密时间同步的需要。

国内外针对 PTP 应用开展了仿真与实际应用技术研究。国家授时中心作为时频领域的专业机构,是最早一批开展该方向研究的科研院所。2009 年完成了 PTP 时钟模块的软硬件结构设计,搭建了 IEEE 1588 时钟模块硬件平台,并在硬件平台基础上软件设计实现了基于用户数据报协议/网际协议版本 4 (User Datagram Protocol/Internet Protocol version 4, UDP/IPv4) 网络协议栈与 IEEE1588 同步协议的 PTP 信息报文的传输。整体架构如图 6 所示。

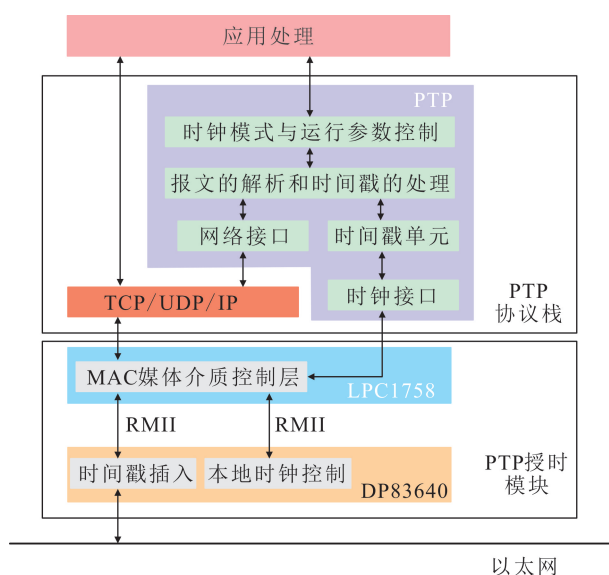


图 6 PTP 系统架构设计

经测试验证,在直连计算机网络的 PTP 同步模式下,同步精度均值为 4.98 ns,均方值为 3.77 ns,达到了纳秒量级^[17]。

5 2018 年,国家授时中心基于域名解析的网络授时系统投入运行

面向公众提供公益网络授时服务,2018 年 9 月 21 日,国家授时中心建成网络授时服务系统,并发布测试公告^[18],域名为 ntp.ntsc.ac.cn,便于用户访问和记忆。该系统设计采用两级网络授时架构,一级节点在国家授时中心,二级节点在云端,一级节点向二级节点授时,云端二级节点采用域名方式向用户提供网络授时服务。

这种授时架构能实时监测云端二级节点和国家标准时间的偏差提升系统可靠性,同时系统对二级节点授时服务进行动态管理形成弹性授时服务能力,授时精度优于 50 ms。该系统长期为汽车智能驾驶、金融、司法等各类互联应用主体提供稳定、

可靠的授时服务。图 7 和图 8 为网络授时一级节点和网络授时系统试运行公告。



图 7 网络授时一级节点图



图 8 网络授时系统试运行公告

6 2019 年,新一代网络授时服务器实现了多源 NTP 与 PTP 联合授时

随着网络授时应用的发展,2004 年开发的 NTC-100 型 NTP 网络时间服务器功能单一,采用多种溯源手段以及 NTP 与 PTP 联合授时的网络时间服务器需求增多。

2019 年,国家授时中心推出了新一代的网络精密时间服务器—N5100(见图 9)。



图 9 网络精密时间服务器

服务器融合了多源智能输入融合技术、频率精密驯服及守时技术、网络精密时频传递技术、时频信号高精度分发技术等多项时间频率关键技术。

服务器通过接收北斗等全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 卫星

信号以及秒脉冲+时码信息(1 pulse per second+time of day, 1 PPS+ToD)、B码等其他时间源信息获取和维持标准 UTC 时间,通过自动或者手动设置时间源的优先级次序,实现冗余时间源的无缝切换,运用独有的相位补偿技术,对本地或接入的频率源进行驯服,实现高精度守时,输出 1 PPS+ToD、B 码信号,并使用 NTP 及 PTP 协议进行网络授时服务。当使用 PTP 精密时间同步协议时,采用硬件辅助的方法记录时间戳标记,去除了时间戳在应用层中的时延,使得在局域网内相对于标准 UTC 时间同步精度达到纳秒量级,可满足用户对于高精度时间同步的需要。

在 PTP+同步以太网(synchronous ethernet, SyncE)模式下,节点间同步精度小于 200 ps(1σ),如图 10 所示。

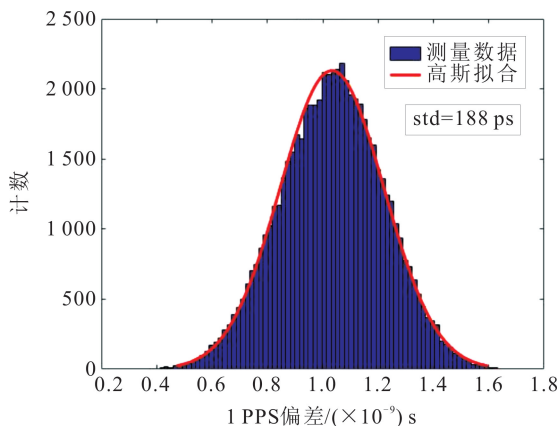


图 10 PTP+SyncE 时间同步精度

服务器基于网络化设计理念,搭配上位机的监控配置软件实现网络化参数配置与状态监控。监控配置软件可以通过网络扫描自动获取模块的参数信息,方便用户使用,增强用户体验,获得了用户的认可和好评。图 11 所示为时钟控制面板软件界面。

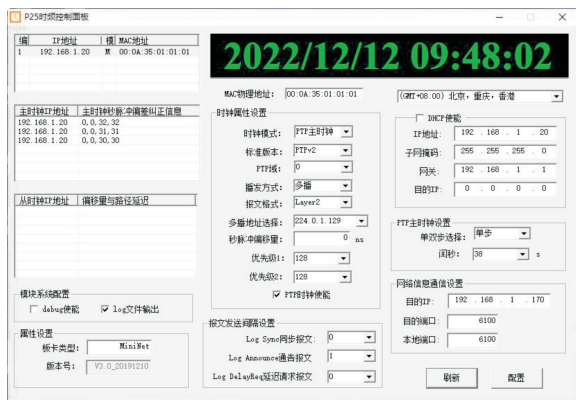


图 11 PTP&NTP 时钟控制面板软件界面

服务器可作为一级、二级网络时间授时与终端时统设备,如图 12 所示。采用通用化、组合化与系列化设计准则,无风扇设计、功耗低,提供灵活的功能定制服务与可靠的技术保障,可应用于政府机关、金融、电力、移动、电信、工业控制、轨道交通、航空航天以及国防军事等领域的时间服务系统中。

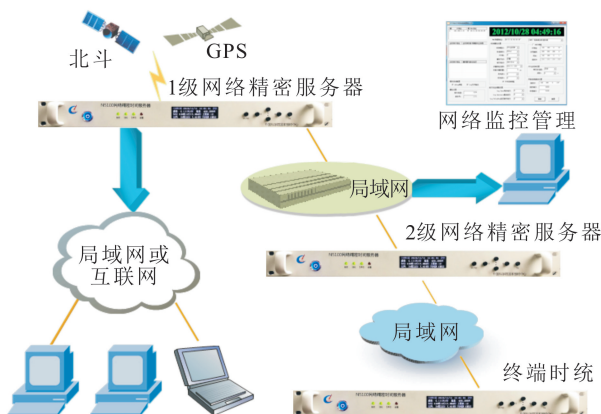


图 12 网络时统应用拓扑

服务器入选中国科学院自主研制科学仪器 2020 及 2021 名录。2024 年 10 月 15 日,N5100 网络精密时间服务器首批获得北斗卫星导航产品认证^[19]。

7 2022 年,针对网络延迟不对称性的精密测量,构建网络时延测试系统

NTP 及 PTP 网络授时基本原理均假定网络往返延迟对称,而复杂网络往返延迟经常呈现不对称的状态,这就造成计算同步精度的偏差。

2022 年,针对网络延迟不对称性的精密测量与评估功能不完善问题,国家授时中心研制了网络延迟测量及评估优化验证平台。

创新性设计 PTP 测试钟模式,对网络双向延迟进行统计,评估优化,提供不对称补偿及同步策略给第三方网络时统终端,提升网络同步性能,工作原理如图 13 所示。两个验证平台设备分别设置为作为测试主端设备和测试从端设备。测试主端设备具备 PTP 主时钟功能,可发送同步报文信息。测试从端设备具备 PTP 从时钟与 PTP 测试钟功能接口,并具备硬件延迟模型植入功能,可进行网络延迟抖动数据的获取、抖动滤波,并对其进行延迟补偿。

测试流程分为三步。首先进行网络双向延迟的测量,测试主端设备从网络授时网口发送同步报文给测试从端设备的网络测试网口,测量主从时间延迟,测试从端设备从网络测试网口发送延迟请求

报文信息给测试主端设备的网络授时网口,计算从主时间延迟。其次进行延迟数据的分析,测试从端设备将测量获得的报文延迟抖动信息发送给计算机,通过软件算法分析提出优化参数方法,并根据优化策略更改测试从端设备的同步方法。最后设置测试主端设备的网络授时网口为主时钟模式,测试从端设备的网络授时网口为从时钟模式,测试与经测试从端设备优化补偿输出优化后的时钟信息,并经与本地输出的标准 1 PPS 比较,验证同步效果,图 14 为测试分析软件界面。

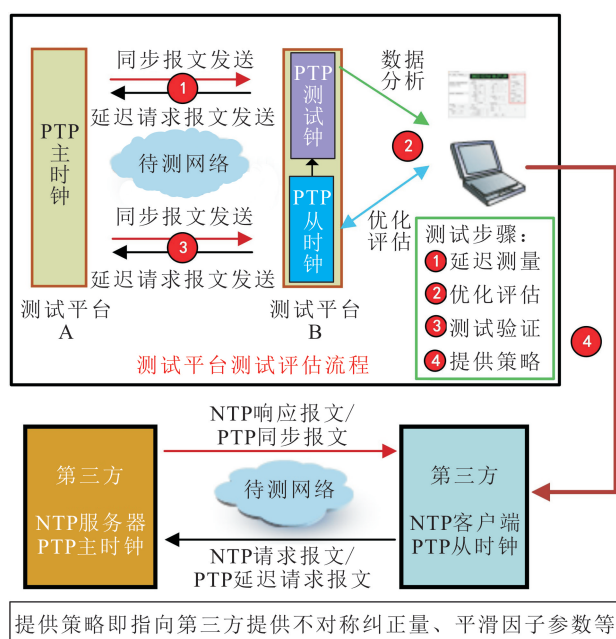


图 13 验证平台工作原理图示

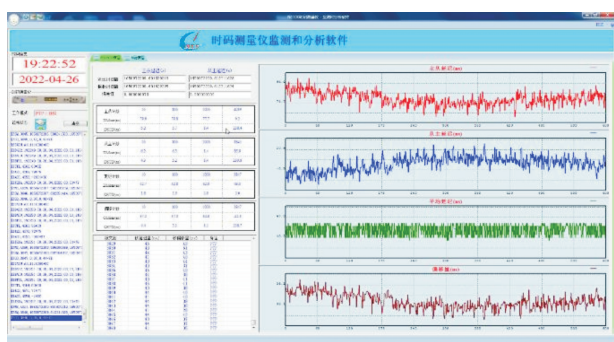


图 14 测试分析软件界面

场景举例,PTP 从时钟未修正及修正同步结果分别如图 15 和图 16 所示。经测试同步精度均值 258.21 ns,标准差 234.09 ns,经过多次的验证测试,确定校准及不对称性参数,修正后精度均值 8.312 ns,标准差为 52.678 ns,时间同步精度有显著提升。

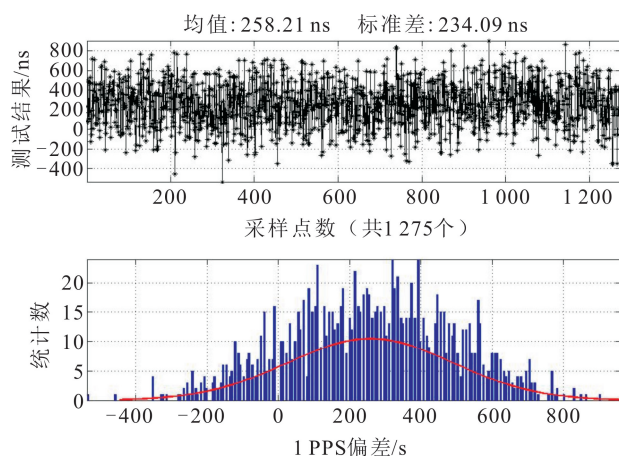


图 15 PTP 从时钟未修正同步结果

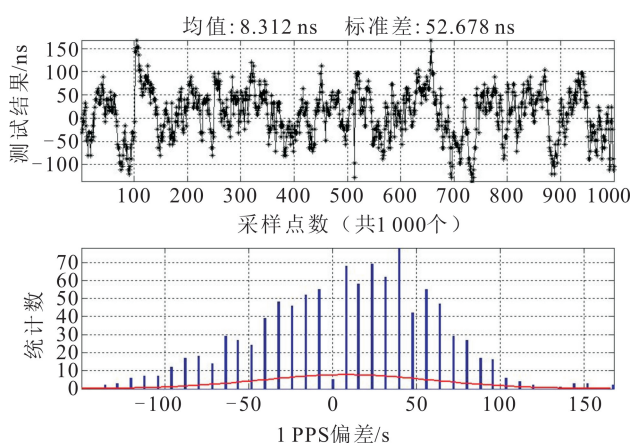


图 16 PTP 从时钟修正同步结果

8 2022 年以来国家授时中心网络授时系统专网拓展应用

2022 年,中国科学院国家授时中心在国家某重大项目建设了基于国家标准时间的网络授时系统、专用网络时频示范应用。将网络授时系统提供的公网 IP 纳入了国家授时中心公益网络授时服务域名“ntp.ntsc.ac.cn”,增强了国家授时中心网络授时服务能力。

2023 年 8 月 15 日,针对某专网的网络授时示范应用系统通过验收,标志中国科学院国家授时中心标准时间具备进入专用网络的能力。

9 结语

随着网络化基础设施建设以及通信网络化技术的迭代更新,人类的生产生活与网络密切相关。作为网络可靠通信基础保障的网络授时技术也在不断发展演进,国家授时中心紧跟网络授时技术前

沿,对网络授时技术进行深入研究,并将研究成果紧扣国家急需,在互联网、政务内网、专网中加以应用。

国家授时中心面向国家需求,正在为全网域(互联网、政务外网、政务内网等)建设高精度、稳定可靠的网络授时服务,并面向各类时间应用提供溯源认证服务,即将开启网络授时系统、网络时间服务面向全网域的新局面。

参考文献:

- [1] POSTEL J. Daytime Protocol[S]. DARPA Networking Group Report RFC867, USC Information Sciences Institute, 1983.
- [2] POSTEL J. Time Protocol[S]. DARPA Networking Group Report RFC868, USC Information Sciences Institute, 1983.
- [3] MILLSD L. DCNET Internet Clock Service[S]. Network Working Group Report RFC778, COMSAT Laboratories, 1981.
- [4] MILLSD L. Network Time Protocol(NTP)[S]. Network Working Group Report RFC958, M/A-COM Linkabit, 1985.
- [5] MILLSD L. Network Time Protocol(Versio n 1) Specification and Implementation [S]. Network Working Group Report RFC1059, University of Delaware, 1988.
- [6] MILLSD L. Network Time Protocol(Versio n 2) Specification and Implementation [S]. Network Working Group Report RFC1119, University of Delaware, 1989.
- [7] MILLSD L. Network Time Protocol(Versio n 3) Specification, Implementation and Analysis [S]. Network Working Group Report RFC1305, University of Delaware, 1992.
- [8] MILLSD L. Network Time Protocol Versio n 4: Protocol and Algorithms Specification RFC5905[S]. Internet Engineering Task Force(IETF), 2010.
- [9] MILLSD L. A Kernel Model for Precision Timekeeping RFC1589[S]. University of Delaware, 1994.
- [10] 柯熙政,和康元,袁海波. 陕西天文台网络授时投入试运行[J]. 时间频率公报, 1999, 23(9): 12.
- [11] PIPCI. 国内常用的 NTP 时间源同步服务器汇总[EB/OL]. (2020-04-27) [2025-08-26]. <https://www.cnblogs.com/pipci/p/12790503.html>.
- [12] 中国计量科学研究院. NIM 授时[EB/OL]. (2015-07-22) [2025-08-19]. https://www.nim.ac.cn/nim_time.
- [13] 中国科学院. 授时中心“时间精灵”校时工具访问量逾百万[EB/OL]. (2005-09-20) [2025-06-23]. https://www.cas.cn/ky/kyjz/200509/t20050920_1032298.shtml.
- [14] IEEE Standard 1588-2002. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.
- [15] IEEE Standard 1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.
- [16] IEEE Standard 1588-2019. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.
- [17] 王康,胡永辉,何在民. 基于 DP83640 硬件辅助的 IEEE1588 研究及实现[J]. 时间频率学报, 2011, 34(1): 1-8.
- [18] 中国科学院. 关于“网络授时域名”全面试运行测试的公告[EB/OL]. (2018-09-21) [2025-07-17]. https://www.cas.cn/tz/201809/t20180921_4664344.shtml.
- [19] 中国网络安全审查认证和市场监管大数据中心. 首批北斗卫星导航产品认证证书颁发[EB/OL]. (2024-10-16) [2025-08-02]. <https://www.isccc.gov.cn/xwdt/tpxw/10/910489.shtml>.