

远程时间传递与溯源方法、装置及体系

梁坤¹, 方维², 顾杨义², 陈德好¹, 郝爽雨³, 杨志强¹, 方占军¹, 张爱敏¹

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029
2. 中国计量大学, 杭州 310018
3. 北京交通大学, 北京 100044

【摘要】 为解决法定时间量值的远程传递问题, 填补可溯源的时间标准及时间计量器具的空白, 研究了远程时间溯源方法, 参考原子时标国家计量基准(UTC(NIM)), 利用 GNSS 时间频率传递方法, 通过驯服铷原子钟、铯原子钟和氢原子钟, 研制了远程时间溯源装置 NIMDO, 基于装置初步构建了远程时间溯源体系。通过多种实验验证, 装置在远程端实现了一个高性能的时标, 实时与 UTC(NIM) 驯服同步, 相当于在远程端以一定的时间和频率偏差复现了 UTC(NIM), 超过 90% 的时间 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时间偏差优于 ± 10 ns、频率偏差优于 $\pm 1 \times 10^{-13}$, 在 87% 以上的情况时间偏差保持在 ± 5 ns 内。

【关键词】 时间频率计量; 守时; 时间频率传递; GNSS 时间频率传递; 驯服; 时标; 远程时间溯源; 溯源体系

DOI: 10.3969/j.issn.2096-9015.2021.04.01

【引用本文】 梁坤, 方维, 顾杨义, 等. 远程时间传递与溯源方法、装置及体系 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(4): 3-13.

Remote Time Transfer and Traceability Method, Device and System

LIANG Kun¹, FANG Wei², GU Yangyi², CHEN Dehao¹, HAO Shuangyu³, YANG Zhiqiang¹, FANG Zhanjun¹, ZHANG Aimin¹

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China
2. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China
3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

【Abstract】 To solve the problem of remote transmission of legal time measurements and fill the gap of traceable time standards and time-measuring instruments, the remote time traceability method was studied, and the remote time traceability device NIMDO was developed by disciplining rubidium, cesium, and hydrogen atomic clocks with reference to the atomic time national primary standard (UTC(NIM)) and using the GNSS time and frequency transfer method, and a remote time traceability system was preliminarily constructed based on the device. Through various experimental verifications, the device achieves a high-performance time scale at the remote end and synchronizes with UTC(NIM) in real-time, which is equivalent to reproducing UTC(NIM) at the remote end with a certain time and frequency deviations, and the time deviation of NIMDO from UTC(NIM) is better than ± 10 ns and frequency deviation is better than $\pm 1 \times 10^{-13}$ in over 90% of the time, and the time deviation stays within ± 5 ns in more than 87% of the cases.

【Key words】 time and frequency metrology, timekeeping, time and frequency transfer, GNSS time and frequency transfer, discipline, time scale, remote time traceability, traceability system

0 引言

时间是目前准确度最高、应用最广的物理量, 时间单位“秒”是国际单位制 7 个基本单位中最准确和最基础的。高精度时间频率已经成为一个国家科

技、经济、军事和社会生活中至关重要的参量, 渗透到基础研究领域、工程技术领域以及国计民生的诸多方面, 关系着国家社会的安全稳定。根据我国国家计量法, 法定时间频率量值应溯源到国家时间频

率计量基准(秒长国家计量基准和原子时标国家计量基准),尤其是电力、通信、金融、公安、交通、航空和航天等对安全、稳定有着高要求的行业及其用户,国家时间频率计量基准的精准溯源就尤为重要。

我国是世界上少数几个拥有准确、独立的时间频率基准的国家之一,中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)建立了我国的国家时间频率计量基准。在2016年修订实施的时间频率计量器具检定系统表中,国家时间频率计量基准包括:秒长国家计量基准-NIM5激光冷却铯原子喷泉钟和原子时标国家计量基准-UTC(NIM)^[1]。NIM5不确定度可达约 9×10^{-16} ,参与国际标准时间-协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)的驾驭。原子时标国家计量基准与UTC的时间偏差(Time Deviation, TDEV)保持在 ± 5 ns,不确定度最优可达1.5 ns,相对频率偏差(简称频差)保持在 $\pm 5 \times 10^{-15}$ (详见BIPM月际时间公报Circular T)。在时间方面,除计量基准UTC(NIM)外,检定系统表中溯源至UTC(NIM)的计量标准和工作计量器具这两个层级在我国尚属于空白状态,原因在于目前时间标准的实现需要建立技术复杂度高、操作和维护难度大的守时系统,对人力、物力都是极大的消耗,这在很大程度上也限制了国家时间频率计量基准量值向用户的传递和应用。尽管使用单向全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)授时技术可通过GNSS时间得到与UTC预测时间的偏差,比如通过GPS单向授时可以获得与UTC(USNO)预测时间的偏差,但这既因各种误差源在单向授时中消除效果差而性能受限,又因其不符合《国际计量学术语(International Vocabulary of Metrology, VIM)》关于溯源性的要求而无法保证其在我国的溯源合法性和安全性。

高准确度的时频传递系统是时间频率服务的重要组成部分,是链接我国时间频率基准到各级标准及时间频率用户之间的桥梁,对于国民经济和国防建设有着举足轻重的作用。时间频率的显著特点是可利用无线电波来进行高准确度量值传递,这也是时间频率可形成计量系统内唯一扁平化溯源体系的最重要因素。为满足用户端的时间频率标准远程溯源至UTC(NIM)的需求,通过GNSS系统进行远程时间频率传递方法研究和装置研制,以UTC(NIM)为参考,可以实现远程时间频率传递对连续运行、不易移动的原子钟及时标(即时间尺度)进行定期校准,也就是说在不移动时间频率标准的情况下对它们进行远程校准以使其进行远程时间溯源。这既节

省了时间频率标准设备运输所需的人力、时间和费用,而且避免了时间频率标准设备在运输过程中所可能遭受的额外损失和风险。因此,远程时间溯源的研究意义非常重要。

1 远程时间频率传递与溯源研究现状

目前国际上高性能远程时间频率传递方法主要包括GNSS时间频率传递、卫星双向时间频率传递和光纤时间频率传递。光纤时间频率传递利用光纤传递微波信号或光信号来进行时间频率传递,由于光纤作为传输介质具有优良的传输性能,其不确定度水平可达百皮秒量级;它的劣势在于地面光纤传输信号距离受限,通常仅在百公里量级可达到上述性能。卫星双向时间频率传递中,比对方利用地球同步轨道卫星(Geosynchronous Orbit Satellite, GEO)双向收发时间信号,抵消路径上的大多数延迟来进行时间频率传递,是一种不依赖于任何其他系统的特有的超远程时间频率传递手段,其实现的不确定度水平可达1~2 ns;它的劣势除了GEO卫星的覆盖范围有限之外,卫星频道的租用和卫星观测地球站都需要不菲的资金支持,因此实现成本较高。GNSS时间频率传递基于现存的GNSS系统,通过观测并解析GNSS系统时间进行比对双方间接的时间频率传递,覆盖范围可及全球,时间传递终端成本不高,可同时进行多站的相关时间频率传递。基于伪随机码和载波相位观测量既保证了实时性,又可实现高精密度的时间频率传递;其劣势在于依托GNSS系统,会间接受到GNSS系统服务性能的影响。远程时间溯源中的时间传递系统,既要保证传递的大范围、高性能,同时成本需要限制在一定范围之内,因此GNSS时间传递作为远程时间溯源中的传递方法是最佳选择。

GNSS时间传递链路中采用多种时间比对方法,它们在比对精度、覆盖范围和运行费用等方面不尽相同。由于GNSS设备成本不高、定时精度高、使用方便等特点,以美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)为代表的GNSS时间频率传递成为了远程时间频率传递和溯源的主要手段,同时也是国际原子时(International Atomic Time, TAI)合作中最主要的时间传递方法。随着俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)星座状态等的改善,GLONASS卫星导航系统在高性能时间比对方面也成为了GPS系统的重要补充手段。国际计量局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)也已将

GLONASS 时间频率传递纳入国际原子时计算之中,鼓励各国时间实验室在使用 GPS 的同时也使用 GLONASS 进行时间频率传递。2012 年, BIPM 用于发布 TAI 和 UTC 的月际公报 Circular T 已开始出版基于 GLONASS 时间频率传递的时间比对结果和 TAI 计算结果。同时,随着我国北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 的快速发展, BDS 系统也开始越来越多的用于时间频率传递^[2]。由于多模导航系统研究不断深入,多种全球导航卫星系统的结合也成为热点。

在远程时间溯源研究方面,仅有美国和日本开展相关研究,美国 NMI-国家标准技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 最早开展 NISTDO 远程时间频率溯源系统的研制,与 UTC(NIST) 的时间偏差可保持在±15 ns 以内^[3-4]。日本国家计量院 (National Metrology Institute of Japan, NMIJ) 也开展了相关研究,主要关注频率的远程溯源,与 UTC(NMIJ) 的时间偏差未明确给出^[5]。在国内,此方面缺乏清晰的概念和系统性的研究,由于技术复杂度和成本问题,在时间频率溯源链上,高性能时间标准和时间计量器具基本属于空白。同时,国内对时间传递链路的校准研究不足,绝大多数情况下,不能实现对时间标准和时间计量器具的真正校准。

2 远程时间传递、溯源方法与装置

由于 GNSS 时间频率传递的优越性,本文远程时间溯源以 GNSS 时间频率传递作为其远程比对方法。本节首先介绍 GNSS 时间频率传递基本原理,然后介绍远程时间溯源方法及装置。

2.1 GNSS 时间频率传递

GNSS 包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的伽利略卫星导航系统 (Galileo Satellite Navigation System, Galileo) 及中国的 BDS, GPS、GLONASS 和 BDS 星座完善, Galileo 系统仍处于待完成全球星座布局阶段。

基于 GNSS 系统的时间频率传递原理如下:时间频率传递双方将各方 GNSS 时频传递装置时基参考到本地参考时间频率标准,分别记录同时段的 GNSS 观测数据,通过解算,得到两站参考时间频率标准与 GNSS 系统时间的偏差,它们的单差即两站参考时间频率标准的比对结果,作为两站时间频率传递结果,原理如图 1 所示。测量信号可以是伪随机码和 GNSS 载波相位。基于伪随机码的 GNSS 时间频率传递相较 GNSS 载波相位时间频率传递,传

递精密度更低,但具备更高的实时性,其不确定度水平在 1.5 ~ 3 ns 之间。

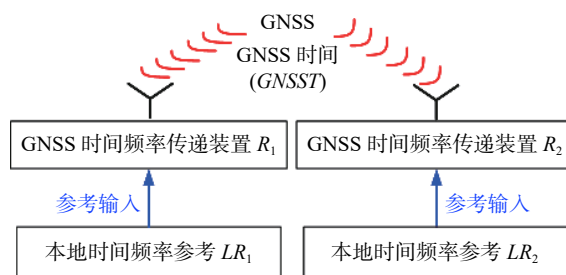


图 1 GNSS 时间频率传递原理图
Fig.1 Schematic diagram of GNSS time and frequency transfer

通常, GNSS 时间频率传递装置支持测距码和载波相位测量,能够生成符合国际时间频率咨询委员会 (Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF) GNSS 工作组 (CCTF WG on GNSS) 时间频率传递国际标准 CGGTTS (Common Generic GNSS Time Transfer Standards) 格式的数据。2015 年,兼容 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 的 CGGTTS V2E 格式出版,相关格式内容和解析发表在 Metrologia 期刊上^[6]。

$$\Delta T_1 = LR_1 - GNSST \quad (1)$$

$$\Delta T_2 = LR_2 - GNSST \quad (2)$$

$$LR_1 - LR_2 = \Delta T_1 - \Delta T_2 \quad (3)$$

2.2 远程时间溯源方法与装置

基于 GNSS 时间传递的扩展,中国计量科学研究院在 2010 年提出了实时驯服到 UTC(NIM) 的振荡器 (UTC(NIM) Disciplined Oscillator, NIMDO) 的概念,并随后实施了初步的设计和实验^[7]。基本思路是:假如参考站的实时 GNSS 时间传递数据能被远程测试站通过某种通信手段获取到,结合测试站的实时 GNSS 时间传递数据即可得到两站的实时比对数据,进而通过比对结果对远程测试站的可驯服振荡器进行预测并驯服,就可使其同步溯源至参考站的参考时间频率,如原子时标国家计量基准 UTC(NIM)。这就构建了一种远程站实时溯源和同步到本地参考站的方案。从技术和法律层面上,钟组规模为 10 台氢钟和 7 台铯钟的原子时标国家计量基准-UTC(NIM) 作为参考站的时间频率参考是最佳选项。其与 UTC 的时间偏差保持在±5 ns 以内,频率偏差保持在±5×10⁻¹⁵以内,性能国内最优,同时也是全国法定时间频率量值的源头,处于时间频率量值传递体系的顶端核心位置。当这个振荡系统以这种模式连续运行时,就形成了一个驯服并溯

源至 UTC(NIM) 的时标(时间尺度), 即 NIMDO。对于几个或多个 NIMDO, 由于它们的参考都是 UTC(NIM), 互相之间也可间接同步。

可以说, NIMDO 是 GNSS 时间频率传递装置的重要扩展。NIMDO 组成和原理图如图 2 所示, 其中包含三个重要的部分: GNSS 时间频率传递系统, 用于时间频率传递测量及数据生成, 是最重要的部分; 可驯服振荡器, 用于提供 10 MHz 频率信号和 1PPS 秒脉冲信号; 控制系统, 用于对可驯服振荡器进行预测、驯服和控制。NIMDO 外观如图 3 所示。NIMDO 组成中, 选择自主研发的 NIM-TF-GNSS-3 型时间频率传递装置作为 GNSS 时间频率传递部分, 自主开发使其很容易被改进以适应目标, 测量信号采用伪随机码以保证实时性; 对于可驯服的振荡器, 考虑到性能、尺寸和成本, 铷原子钟(简称铷钟)是一个很好的选择; NIMDO 中的驯服算法用于保证振荡器以可控方式运行, 确保其时间和频率输出准确、稳定、可靠及与 UTC(NIM) 的实时溯源性。为了使 NIMDO 驯服到 UTC(NIM), 计算 NIMDO 与 UTC(NIM) 的偏差, 进而通过建立观测模型, 预测当前调整量, 对 NIMDO 进行调整, 使其溯源同步到 UTC(NIM)。由于 NIMDO 被用来精确传递时间, 在 NIMDO 和 UTC(NIM) 之间的 GNSS 时间传递链路必须被准确的校准, 以使 NIMDO 时间能够以 2~3 ns 的不确定度溯源到 UTC(NIM)。

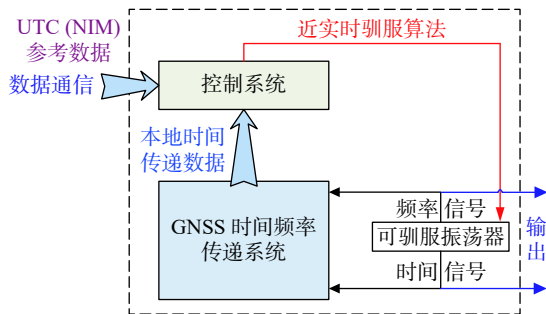


图 2 NIMDO 组成和原理图

Fig.2 Components and schematic diagram of NIMDO

NIMDO 和 UTC(NIM) 的时间和频率值通过 GNSS 码基时间频率传递方法以共视和全视模式^[8]计算, 通过比例微分算法进行估计和预测, 以得到当前调整值。调整间隔需要与铷原子钟的稳定性和时间链路噪声水平相匹配。当时间差在某个预定义的范围之内, 为保证 NIMDO 的稳定性, 对 NIMDO 的调整频度将减少。同时, 为得到更准确的当前时间偏差估计值, 一些延迟比如网络延迟, 需要在预测时考虑。多种因素考虑, 当前的时差估计方程为它们

的线性组合, 如式 (4) 所示。

$$\Delta T_i = \Delta t_i + \frac{(\Delta t_i - \Delta t_{i-1})}{\tau} \times \frac{(\tau + t_d)}{2} \quad (4)$$

式中, Δt_i 为驯服过程中第 i 个周期 GNSS 时间频率传递获得的 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时差; Δt_{i-1} 为驯服过程中第 $(i-1)$ 个周期 GNSS 时间频率传递获得的 NIMDO 与 UTC(NIM) 的时差; τ 为采样间隔; t_d 为估计的额外时延, 如经由网络数据传输的延迟。



图 3 NIMDO 外观

Fig.3 The appearance of NIMDO

在驯服中, 相位调整和频率调整在不同的情况下使用。当 NIMDO 和 UTC(NIM) 时差很大时, 铷原子钟的相位在驯服算法中可以根据式 (4) 进行调整。然而, 对时标的稳定性来说, 相位调整是一种直接但不是最优的调整方法, 好的频率调整可以使 NIMDO 的相位更加平滑。根据时间偏差和相对频率偏差的关系, 频率调整量可根据式 (5) 获得。

$$\frac{\Delta f}{f_{UTC(NIM)}} = \frac{f_{Rb} - f_{UTC(NIM)}}{f_{UTC(NIM)}} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_{i-1}}{\tau} \quad (5)$$

式中, Δf 为相对频率偏差; f_{Rb} 为本地铷原子钟的频率; $f_{UTC(NIM)}$ 为所使用的 UTC(NIM) 的频率, 通常为 10 MHz。

NIMDO 可接收 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四个系统的卫星信号, 采用 GNSS 全/共视法, 将本地时钟远程溯源至 UTC(NIM), 从而实现时间频率的远程精准溯源。NIMDO 可用于测量时间频率传递数据, 也可以用于产生同步于标准原子时的秒脉冲信号和 10 MHz 频率信号; 也可作为 GNSS 时间频率传递装置, 实现用户原子钟和标准时间基准的远程比对, 生成与接收机无关的交换格式 (Receiver Independent Exchange Format, Rinx) 和 CGGTTS 格式等国际格式文件, 用于原子钟的远程校准。NIMDO 配有专业的、B/S 架构的用户软件, 无论在局域网或 Internet 上, 均可由用户通过 IE 浏览器实现远程控制和监测, 界面友好并中英文显示, 方便操作。

3 远程时间频率溯源实验评估

为验证和评估 NIMDO 性能,设计和进行了三类相关实验。

本地直接比对:通过时间间隔计数器直接测量 NIMDO 与 UTC(NIM) 的偏差来评估 NIMDO 的时间准确度,通过比相仪测量 NIMDO 的阿伦标准偏差 (Allan Deviation, ADEV) 来获得频率稳定度,同时通过与标准管及高性能管铯原子钟(简称铯钟)的性能指标对比,来验证驯服控制的优势。

中长基线和长基线长期比对:通过与 UTC(NIM) 的 GPS 远程比对结果得到的时间和频率偏差来评估 NIMDO 时间和频率的准确度,进而得到其时间偏差 (Time Deviation, TDEV) 和修正阿伦偏差 (Modified Allan Deviation, MDEV) 来验证时间和频率稳定度。

基于铯原子钟和氢原子钟(简称氢钟)的 NIMDO 实现:为验证当前 NIMDO 可否通过改善钟源以提高性能,将铷原子钟替换为铯钟和氢钟,通过与 UTC(NIM) 进行 GNSS 远程比对来评估验证改善钟源后的 NIMDO 的性能。

3.1 本地直接比对

NIMDO 被视作溯源到 UTC(NIM) 的时标,其最重要的标准是 NIMDO 的时间准确度,通过参考到 UTC(NIM) 的时间间隔计数器(SRS 620)^[9] 进行评估。图 4 展示了 NIMDO 一天内 1 s 间隔时差值,可以得出,与 UTC(NIM) 的平均偏差为-0.6 ns,最大偏差小于 5 ns。

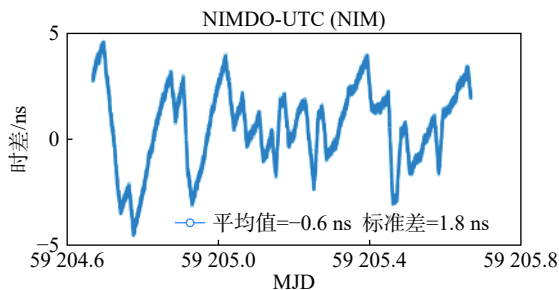


图 4 昌平院区 NIMDO 的本地时差
Fig.4 Local time differences of NIMDO at Changping campus

参考到 UTC(NIM),使用比相仪 (Symmetricom 5125A)^[10] 评估 NIMDO 的频率稳定度。平均时间为一天时,测量分析显示,参考到 UTC(NIM),NIMDO 的 ADEV 表征的频率稳定度大致为 3.5×10^{-14} 。测量结果与标准管和高性能管的两台铯钟 (Symmetricom 5071A)^[11] 的出厂指标进行对比,

如图 5 所示,结果表明实时溯源到 UTC(NIM) 的 NIMDO 的稳定度在一天的平均时间时与高性能管铯原子钟基本一致。

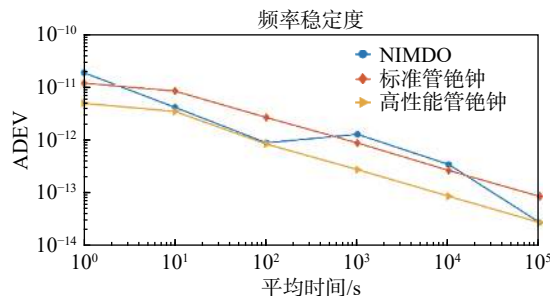


图 5 NIMDO 与铯钟的频率稳定度比较
Fig.5 Comparison of frequency stability between NIMDO and Caesium 5071A

3.2 中长基线长期比对

从应用角度出发,NIMDO 通常工作在远离昌平院区 UTC(NIM) 的远程站。在本文实验中,NIMDO 位于距离昌平院区约 40 公里的和平里院区,NIMDO 与 UTC(NIM) 的偏差基于 GPS C/A 码共视测量获得。MJD58714 到 58774 之间 61 天的远程时间传递结果如图 6、7 所示。从图中可以得出,与 UTC(NIM) 的每日平均时间偏差和频率偏差大多数在 ± 0.6 ns 和 $\pm 9 \times 10^{-14}$ 范围内,61 天的平均值分别为 0 ns 和 -2.6×10^{-15} 。

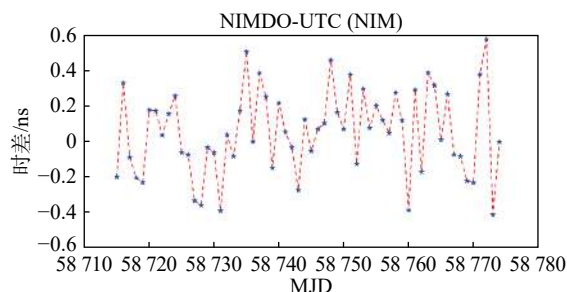


图 6 和平里院区 NIMDO 的日平均时间偏差
Fig.6 Daily mean time deviation of NIMDO at NIM Hepingli campus

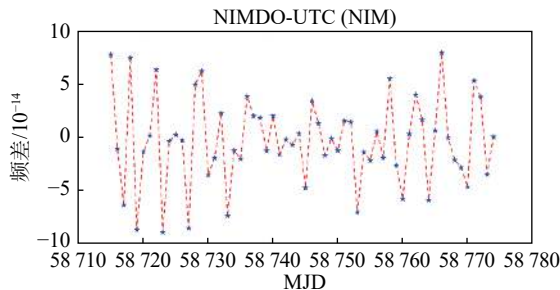


图 7 和平里院区 NIMDO 的日平均频率偏差
Fig.7 Daily mean frequency deviation of NIMDO at NIM Hepingli campus

图 8 和图 9 展示了一天平均间隔的 TDEV 和 MDEV(由 stable32 软件计算)^[12] 分别约为 245 ps 和 4.9×10^{-15} 。平均间隔超过两天时,分别接近 148 ps 和 1.5×10^{-15} 。

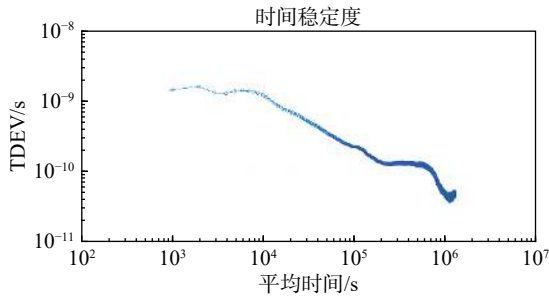


图 8 和平里院区 NIMDO 的时间稳定度

Fig.8 Time stability of NIMDO at NIM Hepingli campus

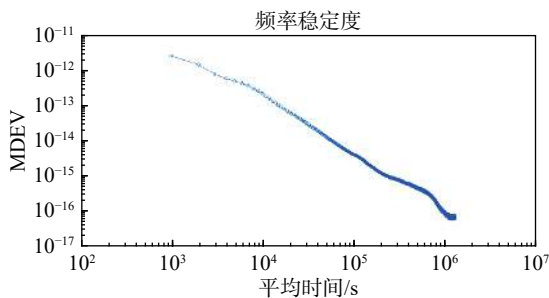


图 9 和平里院区 NIMDO 的频率稳定度

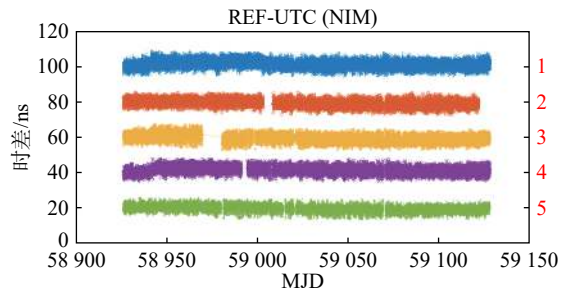
Fig.9 Frequency stability of NIMDO at NIM Hepingli campus

3.3 长基线长期比对

为验证长基线长期的性能,分别在青岛、湖南、烟台、山西和重庆建立 NIMDO 远程站(以 REF 代替),代码分别为 TS15、TS17、TS23、TS24 和 TS26,基线长分别约为 587 公里、1378 公里、547 公里、421 公里和 1475 公里。选取 MJD 58926 到 59127 的时间段的远程时间溯源观测数据,得到时差数据如图 10,频差数据如图 11,其中所有测量均基于 GPS 测量数据,测量间隔 16 分钟。由于缺少不间断供电系统的保障,有时发生断电导致数据测量中断,或 NIMDO 与 UTC(NIM) 的网络通信中断,导致 NIMDO 失锁,出现超出限制的大跳值。在下文表中,**代表远程站与 UTC(NIM) 的之差,表示为 REF-UTC(NIM)。

表 1 为 NIMDO 时间偏差统计,可以得出,90% 以上的 NIMDO 与 UTC(NIM) 时差结果在 ± 5 ns 范围内。通过时差计算的一天间隔频差结果,相关统计列在表 2 中,可以得出,90% 以上的结果绝对值都在 1×10^{-13} 范围内。图 12 为长基线 NIMDO 时间稳定度,可以得出,TDEV 在一天平均间隔时间约为 0.3 ns。图 13 为长基线 NIMDO 的频率稳定度,可

看出 MDEV 值超过 1 天平均间隔后可达到 10^{-15} 量级。根据以上结果,可以得出各 NIMDO 的性能评估结果基本互相吻合。



- 1. TS15: 平均值=1.5 ns 标准差=2.2 ns 相对频率偏差= -8×10^{-17}
- 2. TS17: 平均值=-0.6 ns 标准差=2.1 ns 相对频率偏差= -1×10^{-16}
- 3. TS23: 平均值=-0.7 ns 标准差=2.2 ns 相对频率偏差= -1×10^{-16}
- 4. TS24: 平均值=1.5 ns 标准差=2.1 ns 相对频率偏差= -7×10^{-17}
- 5. TS26: 平均值=-0.6 ns 标准差=2.0 ns 相对频率偏差= -1×10^{-16}

图 10 长基线 NIMDO 的时间偏差

Fig.10 Time deviation of NIMDOs over longer baselines

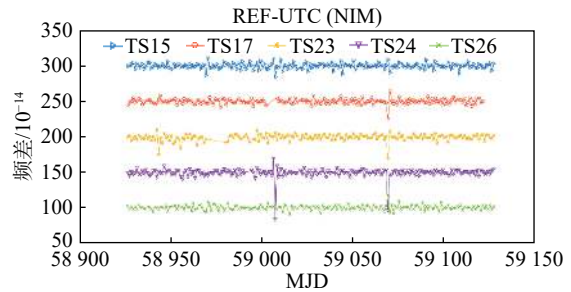


图 11 长基线 NIMDO 的频率偏差

Fig.11 Frequency deviation of NIMDOs over longer baselines

表 1 长基线 NIMDO 时间偏差统计

Tab.1 Time deviation statistics of NIMDOs over longer baselines

NIMDO 代码	观测点数	$0 < ** < 5$ ns	$5 \text{ ns} < ** < 10$ ns	$ ** > 10$ ns
TS15	17192	16126	1066	0
		(93.80%)	(6.20%)	(0.00%)
TS17	16447	16108	339	0
		(97.94%)	(2.06%)	(0.00%)
TS23	15976	15522	454	0
		(97.16%)	(2.84%)	(0.00%)
TS24	16937	16091	846	0
		(95.01%)	(4.99%)	(0.00%)
TS26	17180	16878	302	0
		(98.24%)	(1.76%)	(0.00%)

3.4 基于铯钟和氢钟的 NIMDO 实现

为改善 NIMDO 的性能,铷原子钟可由铯原子钟或氢原子钟替代。铯原子钟提供更好的准确度和长期稳定度,将会使驯服频度降低,驯服性能提升。

氢钟更加精密,在短期稳定性上更好,同时具有更好的可预测性,可以使 NIMDO 的整体稳定性尤其是短期稳定性大幅提升。通过实验将铯钟和氢钟与铷钟版 NIMDO 进行比较。

表 2 长基线 NIMDO 频率偏差 (一天间隔) 统计
Tab.2 Frequency deviation statistics of NIMDOs over longer baselines

NIMDO 观测代码	观测点数	$0 < ** < 5 \times 10^{-14}$	$5 \times 10^{-14} < ** < 1 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-13} < ** < 2 \times 10^{-13}$	$ ** > 2 \times 10^{-13}$
TS15	201	166 (82.59%)	29 (14.43%)	6 (2.99%)	0 (0.00%)
TS17	189	164 (86.77%)	23 (12.17%)	1 (0.53%)	1 (0.53%)
TS23	189	158 (83.60%)	26 (13.76%)	3 (1.59%)	2 (1.06%)
TS24	198	171 (86.36%)	23 (11.62%)	1 (0.51%)	3 (1.52%)
TS26	199	177 (88.94%)	20 (10.05%)	2 (1.01%)	0 (0.00%)

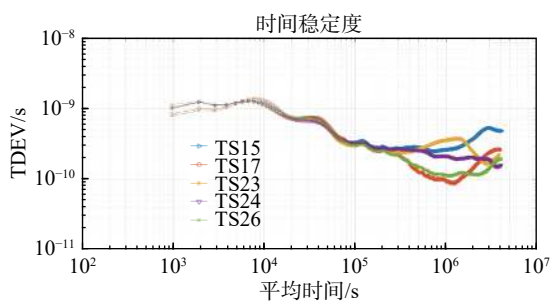


图 12 长基线 NIMDO 的时间稳定度
Fig.12 Time stability of NIMDOs over longer baselines

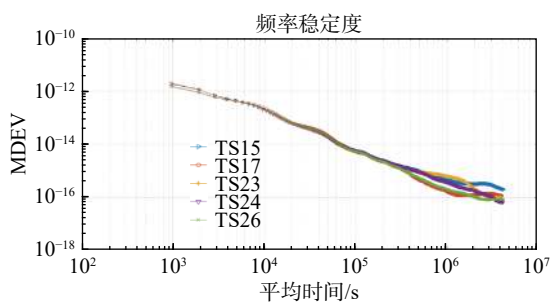


图 13 长基线 NIMDO 的频率稳定度
Fig.13 Frequency stability of NIMDOs over longer baselines

基于铯钟和氢钟的 NIMDO 基本原理和结构与前文所述的铷钟 NIMDO 基本类似。在时间传递部分,实验使用基于 GPS 和 BDS 的 NIM 两个院区之间的时间传递链路。在 NIM 和平里院区,IM07、TF07、IM13 和 IM14 用于实验,具体参数如表 3 所示。驯服算法与前文描述的基本相同,实验结果详见文献 13^[13],如图 14 ~ 17,表 4 和表 5 所示。

表 3 实验中使用的接收机
Tab.3 Receiver employed in the experiments

接收机代码	型号	时间频率参考	GNSS系统
IM07	NIM-TF-GNSS-2J	铯钟(Cs clock) / 铷钟(Rb clock)	GPS
TF07	NIM-TF-GNSS-3	铯钟(Cs clock)	BDS和GPS
IM13	NIM-TF-GNSS-3	氢钟(H-maser)	BDS和GPS
IM14	NIM-TF-GNSS-3	铯钟(Cs clock)	BDS和GPS

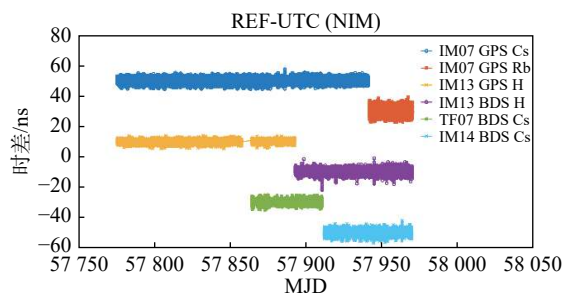


图 14 铷钟、铯钟和氢钟 NIMDO 经由 GPS 和 BDS 测量的时差值
Fig.14 Time differences of NIMDOs with Radium, Caesium, and H-maser via BDS and GPS

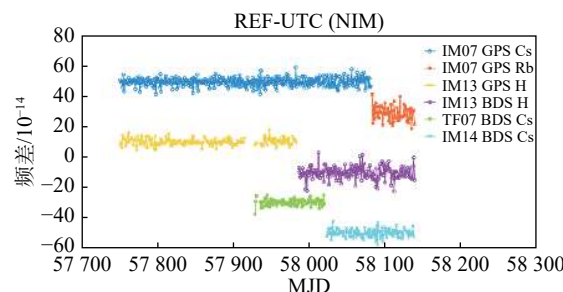


图 15 铷钟、铯钟和氢钟 NIMDO 经由 GPS 和 BDS 测量的频差值
Fig.15 Frequency differences of NIMDOs with Radium, Caesium, and H-maser via BDS and GPS

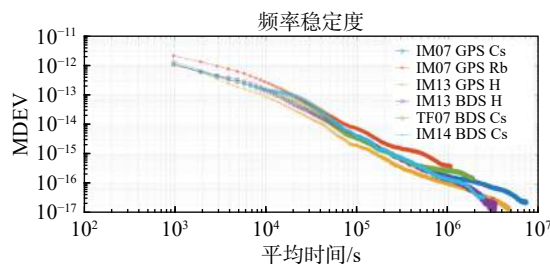


图 16 铷钟、铯钟和氢钟 NIMDO 经由 GPS 和 BDS 测量的频率稳定度
Fig.16 Frequency stability of NIMDOs with Radium, Caesium, and H-maser via BDS and GPS

图 14 和 15 显示,铷钟 NIMDO 的时间偏差在 90% 的情况先优于 ± 5 ns,频率偏差在 95% 的情况下优于 1×10^{-13} 。对于氢钟 NIMDO 来说,时差在

95%的情况下优于±5 ns，一天间隔的频差在95%的情况下优于±1×10⁻¹³。具体统计结果在表4和5中列出。

图16和17显示，短期情况下，所有测量基于CGGTTS标准采样间隔，仅有铷钟因为其较差的短期稳定性可以被测量；对于铯钟和氢钟，测量仅显示了GNSS码基时间传递链路的性能。长期的情况下，尤其是超过一天的平均间隔，基于铯钟和氢钟的NIMDO时间稳定度都优于基于铷钟的NIMDO。

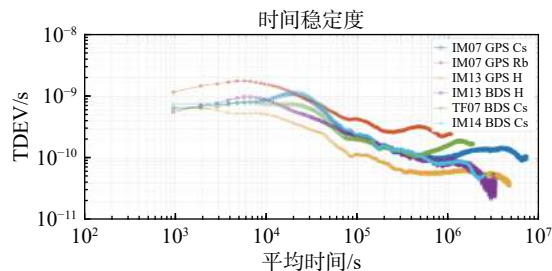


图17 铷钟、铯钟和氢钟 NIMDO 经由 GPS 和 BDS 测量的时间稳定度

Fig.17 Time stability of NIMDOs with Radium, Caesium, and H-maser via BDS and GPS

表4 铷钟、铯钟和氢钟时差测量值统计

Tab.4 Time difference statistics of Radium, Caesium, and H-maser

NIMDO类型	观测量	0< ** <5 ns	5 ns< ** <10 ns	10 ns< ** <15 ns	15 ns< ** <20 ns	** >20 ns
IM07 GPS Cs	29 523	28 549	974	0	0	0
		94.89%	5.11%	0	0	0
IM07 GPS Rb	4 449	4 100	349	0	0	0
		91.94%	8.06%	0	0	0
IM13 GPS H	19 462	18 929	533	0	0	0
		97.27%	2.73%	0	0	0
IM13 BDS H	13 622	13 179	440	3	0	0
		96.75%	3.23%	0.2%	0	0
TF07 BDS Cs	7 771	7 253	518	0	0	0
		93.33%	6.67%	0	0	0
IM14 BDS Cs	10 392	9 478	914	0	0	0
		91.28%	8.72%	0	0	0

表5 铷钟、铯钟和氢钟频差（一天间隔）测量值统计

Tab.5 Frequency difference (one day interval) statistics of Radium, Caesium, and H-maser

NIMDO类型	观测量	0< ** <5×10 ⁻¹⁴	5×10 ⁻¹⁴ < ** <1×10 ⁻¹³	1×10 ⁻¹³ < ** <2×10 ⁻¹³	** >2×10 ⁻¹³
IM07 GPS Cs	331	287	44	0	0
		86.71%	13.29%	0	0
IM07 GPS Rb	55	36	16	3	0
		65.45%	29.09%	5.46%	0
IM13 GPS H	235	192	40	3	0
		81.04%	17.65%	1.31%	0
IM13 BDS H	153	124	22	7	0
		81.06%	14.38%	4.6%	0
TF07 BDS Cs	88	67	15	6	0
		76.14%	23.86%	0	0
IM14 BDS Cs	116	94	20	2	0
		81.18%	16.95%	1.87%	0

4 远程时间溯源体系

以远程时间溯源方法和装置 NIMDO 为核心，在计量系统内的部分省级计量部门及行业最高计量部门建成了 14 个远程时间溯源站，使 UTC(NIM) 的标准时间和频率量值传递到远程时间溯源站，满足远程溯源站地区绝大多数溯源需求，形成远程时间

溯源示范体系。本节展示了远程时间溯源体系中这些站的长期运行结果。除这 14 个站之外，还有一些站点由于间歇使用 NIMDO 或目前正处于积累数据阶段或不方便公开数据，不在我们的统计范围之内。各远程溯源站的长期运行结果统计出版在远程时间溯源示范体系-时间公报中^[14]。

各远程站的位置分布如图 18 所示, IM04 为贵州站, IM08 为新疆站, IM10 为黑龙江站, TS15 为青岛站, TS18 为上海站, TS19 为电科院站, TS23 为烟台站, TS17 为湖南站, TS20 为信通院站, TS21 为河南站, TS22 为辽宁站, TS24 为山西站, TS26 为重庆站, TS27 为广东站。图中显示了各远程站的位置分布, 并标明了其与参考站 IM03(GNSS 时间频率传递装置)的基线长度。另外, 除 TS18 的其它站均为铷钟版 NIMDO, 在 MJD 58847 之前, TS18 并未运行在驯服模式, 而运行在 GNSS 时间频率传递模式, 外部参考为铯钟和氢钟的组合, 并未进行驯服实验, 所以 MJD 58847 之前的 TS18 数据被排除在最终统计之外。选取 MJD 57470 到 59127 的时间段的远

程时间溯源观测数据, 得到时差数据如图 19, 频差数据如图 20, 这 14 个远程站的依托单位分别是国家时间频率计量中心贵州应用中心(贵州省计量测试院)、新疆计量测试研究院、黑龙江省计量检定测试研究院、国家时间频率计量中心应用中心(青岛)、上海市计量测试技术研究院、中国电力科学研究院、烟台持久钟表有限公司、湖南省计量检测研究院、中国信息通信研究院、河南省计量科学研究院、辽宁省计量科学研究院、山西省计量科学研究院、重庆市计量质量检测研究院、广东省计量科学研究院。为方便观察, 不同的远程站的数据曲线进行了不同程度的平移。

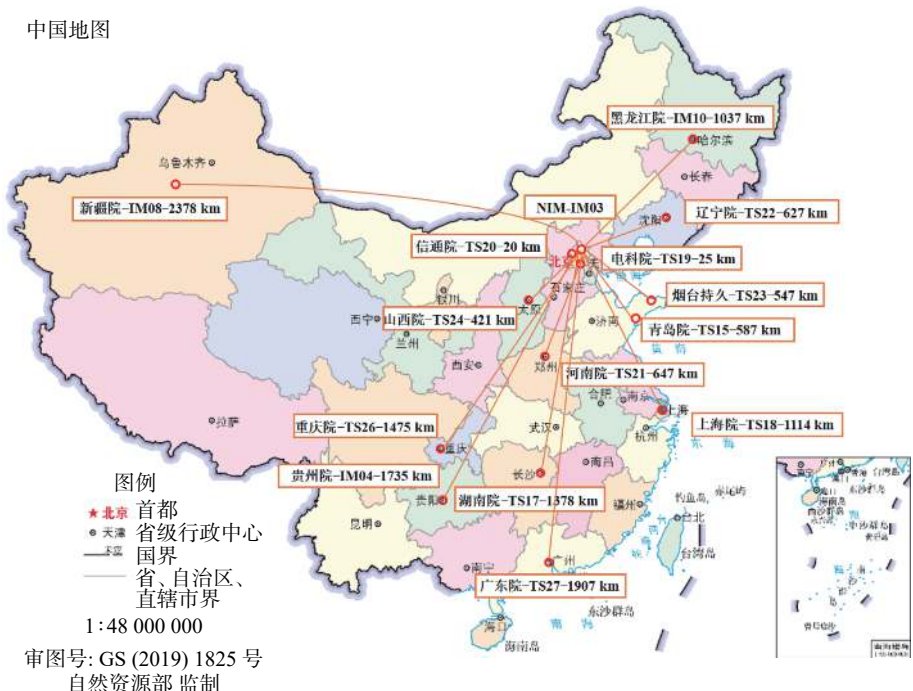


图 18 各远程站分布图

Fig.18 Distribution map of remote stations

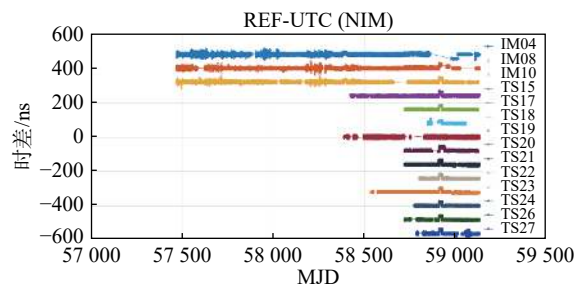


图 19 远程站与 UTC(NIM) 的溯源时差结果 (16 分钟间隔)

Fig.19 Traceability time differences between the remote stations and UTC (NIM) (16-min interval)

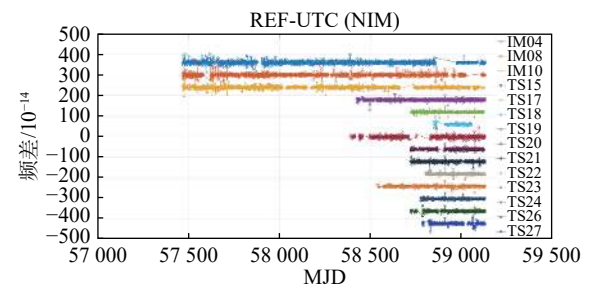


图 20 远程站与 UTC(NIM) 的溯源频差结果 (一天间隔)

Fig.20 Traceability frequency differences between the remote stations and UTC (NIM) (one day interval)

IM10 的数据+320 ns, TS15 的数据+240 ns, TS18 的数据+160 ns, TS19 的数据+80 ns, TS23 的数据+0 ns, TS17 的数据-80 ns, TS20 的数据-160 ns, TS21 的数据-240 ns, TS22 的数据-320 ns, TS24 的数据-400 ns, TS26 的数据-480 ns, TS27 的数据-560 ns。图 20 中远程站与 UTC(NIM) 的溯源频差数据具体平移如下, IM04 的数据 $+360 \times 10^{-14}$, IM08 的数据 $+300 \times 10^{-14}$, IM10 的数据 $+240 \times 10^{-14}$, TS15 的数据 $+180 \times 10^{-14}$, TS18 的数据 $+120 \times 10^{-14}$, TS19 的数据 $+60 \times 10^{-14}$, TS23 的数据 $+0 \times 10^{-14}$, TS17 的数据 -60×10^{-14} , TS20 的数据 -120×10^{-14} , TS21 的数据 -180×10^{-14} , TS22 的数据 -240×10^{-14} , TS24 的数据 -300×10^{-14} , TS26 的数据 -360×10^{-14} , TS27 的数据 -420×10^{-14} 。

从表 6 和表 7 中可以看出, 从长期数据的统计情况来看, 所有站的时差和一天间隔的频差都能在超过 90% 的时间保持在 ± 10 ns 和 $\pm 1 \times 10^{-13}$ 内, 有

表 6 远程站与 UTC(NIM) 时差数据统计

Tab.6 Time difference statistics between the remote stations and UTC (NIM)

远程站	观测 点数	0< ** <5 ns	5 ns< ** <10 ns	10 ns< ** <15 ns	15 ns< ** <20 ns	** >20 ns
IM04	123 591	108 764	10 234	205	1 074	3 314
		88.00%	8.28%	0.17%	0.87%	2.68%
IM08	122 621	111 760	8 631	467	987	776
		91.14%	7.04%	0.38%	0.80%	0.63%
IM10	123 986	114 884	6 485	588	999	1 030
		92.66%	5.23%	0.47%	0.81%	0.83%
TS15	56 536	53 580	1 469	391	10	1 086
		94.77%	2.60%	0.69%	0.02%	1.92%
TS17	33 932	30 399	2 043	390	4	1 096
		89.59%	6.02%	1.15%	0.01%	3.23%
TS18	13 590	11 591	1 304	30	662	3
		85.29%	9.60%	0.22%	4.87%	0.02%
TS19	45 231	39 496	5 713	0	22	0
		87.32%	12.63%	0.00%	0.05%	0.00%
TS20	30 206	27 060	491	683	3	1 969
		89.58%	1.63%	2.26%	0.01%	6.52%
TS21	32 348	29 953	903	421	4	1 067
		92.60%	2.79%	1.30%	0.01%	3.30%
TS22	26 652	24 741	421	370	2	1 118
		92.83%	1.58%	1.39%	0.01%	4.19%
TS23	46 963	44 581	892	370	2	1 118
		94.93%	1.90%	0.79%	0.00%	2.38%
TS24	29 402	26 124	1 788	431	26	1 033
		88.85%	6.08%	1.47%	0.09%	3.51%
TS26	30 173	27 408	1 274	463	3	1 025
		90.84%	4.22%	1.53%	0.01%	3.40%
TS27	23 716	21 195	845	448	135	1 093
		89.37%	3.56%	1.89%	0.57%	4.61%

87% 以上的情况时差保持在 ± 5 ns 内。从图 19 中远程站的时差曲线可以看出, 时差测量数据某段时间会出现大幅度的抖动, 经过调研, 可能的原因有: 该段时间内的某几颗卫星信号不稳定、线路连接不稳定、参考接收机运行不稳定、UTC(NIM) 时标信号不稳定、网络上传数据不稳定等。

表 7 远程站与 UTC(NIM) 频差 (一天间隔) 数据统计
Tab.7 Frequency differences (one day interval) statistics between the remote stations and UTC (NIM)

远程站	观测 点数	0< ** <5 $\times 10^{-14}$	5×10^{-14} < ** < 1×10^{-13}	1×10^{-13} < ** < 2×10^{-13}	** >2 $\times 10^{-13}$
IM04	1 445	966	348	98	33
		66.85%	24.08%	6.78%	2.28%
IM08	1 337	958	258	82	39
		71.65%	19.30%	6.13%	2.92%
IM10	1 431	1 029	297	82	23
		71.91%	20.75%	5.73%	1.61%
TS15	662	558	86	13	5
		84.29%	12.99%	1.96%	0.76%
TS17	393	316	57	14	6
		80.41%	14.50%	3.56%	1.53%
TS18	159	126	24	7	2
		79.25%	15.09%	4.40%	1.26%
TS19	536	380	109	42	5
		70.90%	20.34%	7.84%	0.93%
TS20	351	305	35	9	2
		86.89%	9.97%	2.56%	0.57%
TS21	380	324	41	10	5
		85.26%	10.79%	2.63%	1.32%
TS22	314	268	34	7	5
		85.35%	10.83%	2.23%	1.59%
TS23	549	463	75	8	3
		84.34%	13.66%	1.46%	0.55%
TS24	342	281	54	5	2
		82.16%	15.79%	1.46%	0.58%
TS26	350	295	45	7	3
		84.29%	12.86%	2.00%	0.86%
TS27	274	219	39	9	7
		79.93%	14.23%	3.28%	2.55%

5 结论

本文在 GNSS 远程时间频率传递技术基础上, 通过全球导航卫星系统时间比对对远程时间频率源进行实时预测和驯服, 使其与原子时标国家计量基准 UTC(NIM) 达到了实时同步, 设计了远程时间溯源装置 NIMDO, 实现了基于 GNSS 时间频率传递的可准实时验证的溯源或授时技术。它主要解决目前我国地方上基本没有可溯源的时间标准(守时系统)和时间计量器具的问题。同时, 它也是一种高性能授时手段, 以某一参考标准时间例如原子时标国

家计量基准 UTC(NIM), 作为输入参考, 在远程端实现了一个高性能的原子时标, 同时实时与参考标准时间(如 UTC(NIM))进行比对驯服同步, 在远程端以一定的偏差(90% 情况下优于±10 ns)复现 UTC(NIM), 即以一定的偏差向远程端进行了授时。

由于 NIMDO 在满足运行条件时可随时开机、自动运行, 与参考标准时间(如 UTC(NIM))在几小时内同步锁定, 因此显著减少了人力和物质资源的使用并且大大节省了时间。在中长基线情况下, 参考到 UTC(NIM), NIMDO 的日平均时间偏差和日平均频率偏差可分别优于±0.6 ns 和±9×10⁻¹⁴, 日时间稳定性和日频率稳定度可分别达 250 ps 和 4.5×10⁻¹⁵。多个重要行业和地方机构已以 NIMDO 为核心建立了远程时间溯源站, 实现了与 UTC(NIM) 基准时间频率量值之间的实时比对、溯源和同步, 初步形成了远程时间频率溯源体系, 体系内各站在超过 90% 的时间保持在±10 ns 和±1×10⁻¹³内, 87% 以上的情况时间偏差保持在±5 ns 内。

NIMDO 具备了高准确度远程校准溯源、同步和授时能力, 可以满足中国各地区高端装备制造、智能电网、道路交通等单位对高准确度时间频率量值的溯源需求。作为标准时间频率源, NIMDO 未来将在国内地方和行业重要机构及海外重要站点应用, 不断完善国家远程时间溯源体系。

参考文献

[1] 国家市场监督管理总局. 时间频率计量器具检定系统表: JJG 2007-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
 [2] Kun L, Felicitas A, Gerard P, et al. Evaluation of BeiDou time transfer over multiple inter-continental baselines towards UTC

contribution[J]. *Metrologia*, 2018, 55(4): 513-525.
 [3] Lombardi M. A NIST Disciplined Oscillator[C]. Proceedings of the NCSL International Workshop and Symposium, 2010.
 [4] Lombardi M A. A NIST Disciplined Oscillator: Delivering UTC(NIST) to the Calibration Laboratory[J]. *NCSLI Measure*, 2010, 5(4): 46-54.
 [5] Tomonari Suzuyama, Atsuko Okuda, Masaki Amemiya. Long-term properties evaluations of frequency remote calibration system using GPS[C]. Presentation of ATF2015. Beijing: National Institute of Metrology, 2015.
 [6] Defraigne P, Petit G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer[J]. *Metrologia*, 2015, 52(6): G1-G1.
 [7] Liang K, Zuo F, Pei C, et al. Real-Time Remote Calibration (RTRC) System for Time and Frequency[C]. IFCS-EFTF2013, 2013.
 [8] Jiang Z, Petit G. Time Transfer with GPS Satellites All in View[C]. Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency. Beijing, 2004: 236-43.
 [9] Hamilton Technical Services, "Stable 32 user manual," Technical Report, ID # 212944, Version 1.50, Mar. 2007, pp. 55-63.
 [10] Stanford Research System, "SR620 Universal Time Interval Counter," Technical Report, Revision 2.7, Feb. 2006, pp. 1-5.
 [11] Symmetricom, "5125A Phase Noise Test Set Operations and Maintenance Manual," Technical Report, DOC05125A, Rev A, Mar. 2009, pp. 60-61.
 [12] Symmetricom, "5071A Primary Frequency Standard Operating and Programming Manual," Technical Report, 05071-90041, May 2001, pp. 6-5.
 [13] Kun L, Hang Y, Fei Z, et al. Disciplined oscillator system by UTC(NIM) for remote time and frequency traceability[C]. European Frequency & Time Forum. IEEE, 2015.
 [14] 梁坤, 顾杨义. 远程时间溯源示范体系-时间公报 [EB/OL]. <https://www.nmdc.ac.cn/tu/cms/www/202012/28145204bfgw.pdf>

本文编辑: 霍祎炜

(上接第 21 页)

[3] 胡昌军, 潘峰, 缪新育, 等. 5G 同步分析及应对措施探讨 [J]. 信息通信技术与政策, 2018(9): 46-49.
 [4] 胡昌军, 吕博, 缪新育. 5G 同步组网架构及关键技术探析 [J]. 信息通信技术与政策, 2019(4): 36-40.
 [5] ITU. Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks: G. 8272.1[S]. Geneva: Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2016.
 [6] 3GPP. TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis: TR 36.922 v14.0. 0[S]. Geneva: 3rd Generation Partnership Project, 2017.
 [7] 董文, 赵当丽, 胡永辉, 等. 国产激光抽运铯原子钟的性能分析 [J]. 时间频率学报, 2019, 42(4): 319-326.

[8] 曾文帝, 何力, 刘娅. 卫星单频近距离共视与双频单向授时站间同步性能分析 [J]. 时间频率学报, 2020, 43(2): 101-112.
 [9] 刘娅, 陈瑞琼, 赵志雄, 等. UTC(NTSC) 远程高精度复现方法研究及工程实现 [J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 178-192.
 [10] 王威雄, 董绍武, 武文俊, 等. 基于软件接收机和间接链路的卫星双向时间比对性能分析 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 152-159.
 [11] JALDEHAG K, EBENHAG S, HEDEKVIST P O, et al. Time and Frequency Transfer Using Asynchronous Fiber-Optical Networks: Process Report[C]. Proceedings of the 41st annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. New Mexico, 2009: 383 - 396.
 [12] 王晔. 基于 GNSS 共视的远程时间频率溯源的性能提升方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.