

铁路时间同步网综合原子时标的研究

梁坤* 韦宝盈

(北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

摘要: 铁路时间同步网为铁路各系统提供统一的标准时间量值,其精确、稳定与否对铁路系统安全、高效地运营具有重要影响。根据调研,当前铁路时间同步网的潜在问题有:各时间节点时间溯源参考不一致,且未精确溯源至协调世界时(UTC);仅设置1处的1级时间节点故障时,2,3级时间节点受其影响大、鲁棒性不足;监测手段仅针对单个节点,缺乏整体层面的自动监测方法。针对以上潜在问题,该文提出可精确溯源至UTC的铁路时间同步网综合原子时标(TE)作为网内统一的时间溯源参考的解决方案,通过建立铁路时间同步网仿真模型,研究设计了综合原子时标算法,基于1级、2级时间节点19台母钟设备形成了TE。仿真结果表明,TE与UTC的溯源偏差可优于30 ns,溯源不确定度可优于5 ns;1级时间节点正常运行时,引入TE可提高2级时间节点时间稳定度约40%;1级时间节点故障时,TE仍可持续生成并作为网内统一的时间溯源参考,TE同步架构下的2级时间节点与传统同步架构下的相比,其频率、时间稳定度提高约35%;基于TE可获得任意节点间时差,通过分析时差数据,可实现整体层面的所有时间节点、精确时间协议(PTP)链路通断的自动监测。

关键词: 铁路时间同步网;综合原子时标;鲁棒性;溯源;监测

中图分类号: TB939

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)11-4127-10

DOI: 10.11999/JEIT230806

Research on Distributed Ensemble Time Scale for Railway Time Synchronization Network

LIANG Kun WEI Baoying

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The railway time synchronization network provides the standard time quantity value for various railway systems. The accuracy and stability of the time quantity value have an important impact on the safe and the efficient operation of the railway systems. There are three potential problems with the current railway time synchronization network. The traceability references of each time node are inconsistent, and the time of each node is not accurately traced to Coordinated Universal Time (UTC). Only one primary time node is set. The secondary and the tertiary time nodes are greatly affected by the failure of the primary time node, and lack of robustness. Monitoring methods are only used a single time node. There is no automatic monitoring method at the overall level. In view of the above potential problems, the distributed Ensemble Time scale (TE) for railway time synchronization network that can accurately trace to UTC is proposed. A simulation model of railway time synchronization network is established, and a TE algorithm is designed. TE is generated by 19 atomic clocks from the primary and the secondary time nodes. The results show that the time differences between TE and UTC can be better than 30 ns. The uncertainty of TE-UTC is better than 5 ns. When the primary time node works normally, the time stability of the secondary time node can be improved about 40% by introducing TE. When the primary time node fails, TE can be continuously generated and used as a unified traceability reference. The frequency and time stability of the secondary time node under the TE synchronization architecture is about 35% higher than that under the traditional synchronization architecture.

收稿日期: 2023-08-01; 改回日期: 2023-10-24; 网络出版: 2023-10-30

*通信作者: 梁坤 liangk@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3900704), 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心开放课题

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2021YFB3900704), The Open Foundation of National Railway Intelligence Transportation System Engineering Technology Research Center

The time differences between any time nodes can be obtained based on TE. By analyzing the time differences data, automatic monitoring of all time nodes and the continuity of Precision Time Protocol (PTP) links at the overall level can be realized.

Key words: Railway time synchronization network; Distributed Ensemble Time scale (TE); Robustness; Traceability; Monitoring

1 引言

铁路时间同步网是铁路通信网的重要组成部分,为铁路各系统提供统一的标准时间量值,其精确、稳定是铁路系统安全、高效地运营的重要保障。

传统同步架构下的地面时间同步网分为3级,呈主从树状结构,设在铁路总公司的唯一的1级时间节点通过北斗卫星导航系统(BeiDou navigation Satellite system, BDS)或全球定位系统(Global Positioning System, GPS)单向授时获取标准时间,其输出的时间信号通过传输网骨干层传递至设置在铁路局的18个2级时间节点,设置在站、段、所的3级时间节点通过传输网获取2级时间节点时间信号。目前铁路骨干/局域光传送网络(Optical Transport Network, OTN)已经覆盖铁路总公司和全国18个铁路局,全面支持精确时间协议(Precision Time Protocol, PTP)^[1],部分3级时间节点已接入OTN,具备铁路1/2级时间节点间、部分2/3级时间节点间高准确度时间传送的能力。当地面链路发生故障,或来自上一级时间节点的时间信号不满足TB/T 3283—2015《铁路时间同步网技术条件》^[2](以下简称《标准》)要求时,2级时间节点同步BDS或GPS单向授时信号,3级时间节点采用内置钟守时。

时间节点可通过单向授时同步至全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)预测的协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)UTC(GNSS)或GNSS的系统时间(GNSS System Time, GNSST),这可能导致多个溯源源头,使不同节点溯源参考不一致。未经校准的不同GNSS接收机观测到的GPS的系统时间(GPS System Time, GPST)与BDS的系统时间(BDS System Time, BDST)偏差可达几百纳秒^[3],使得铁路各应用系统源头上存在时差而无法保证时间溯源一致,进而干扰数据通信,导致故障时刻记录不准确,直接影响故障分析、定责。计量溯源性是测量结果的一种特性,即测量结果可以通过已校准的不间断比对链路和参考标准联系的特性^[4]。时间节点基于未经校准的GNSS接收机通过单向授时同步,溯源源头之一的UTC(GNSS)与UTC间的时差无法准确获取,存在时间节点无法精确溯源至UTC的问题,时间来源依据不足,也影响同步网内系统与网外系

统的交互。文献^[1,5,6]分别提出将BDS单向授时信号作为GPS单向授时信号冗余的建议;文献^[7,8]分别提出了BDS单向授时信号应当作为铁路时间同步网1级时间节点第1路标准时间信号输入的建议;研究集中在提高GNSS单向授时信号的可靠性、安全性,未涉及时间溯源一致性、精确溯源至UTC的问题。

1级时间节点仅设于铁路总公司一处,其故障时,2级时间节点转为通过GNSS单向授时同步,节点溯源参考的切换会由于不同溯源参考间的偏差引入时间跳变,降低2,3级时间节点输出时间信号的稳定程度,造成通信中断、系统不稳定。文献^[9]提出增加建设备用1级时间节点,但该方案本质仍未解决2级时间节点时间源切换引入较大时间跳变的问题,即,2,3级时间节点受1级时间节点故障影响大、鲁棒性不足的问题。

应用于铁路的长期演进技术系统(Long Term Evolution for Rail, LTE-R)、基于5G的铁路移动通信系统(the Fifth Generation communication for Railway, 5G-R)等下一代承载网基本业务时间同步需求为1.5 μ s, 5G-R多进多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术为65 ns,米级定位服务为纳秒级^[10-12]。高精度时间同步需求使得监测技术在保证同步网可靠性上发挥重要作用。目前铁路时间同步网监测手段仅针对单个时间节点,监测指标不含节点间的时差^[6],无整体层面自动监测手段。部分涉及行车安全分析的系统间曾出现17 min以上的偏差^[1]而没有及时发现,为铁路系统的运营带来极大安全隐患。文献^[6,13]分别提出将GNSS共视技术应用到铁路时间同步网性能监测中,但目前网内时间节点未装备有GNSS时间频率传递接收机,无法实现共视比对。

综上,针对上述潜在问题,本文提出铁路时间同步网综合原子时标(distributed Ensemble Time scale, TE),在不改变现有铁路时间同步网结构的情况下,充分利用现有时间比对链路资源、时钟资源,生成可精确溯源至UTC的综合原子时标以提供统一的标准时间量值;设计基于综合原子时标的同步架构,减小1级时间节点故障对2,3级时间节点的影响,提高节点鲁棒性;构建基于综合原子时标的监测系统,对铁

路时间同步网整体层面所有时间节点、PTP链路通断进行自动监测，以实现故障及时初步排查与判断。

2 铁路时间同步网综合原子时标

2.1 原子时标

时标是由一个特定起点累积而成的时间坐标或时间尺度^[14,15]。UTC作为国际标准时间，是全球授时服务的参考时间，其基本单位是原子秒，由国际计量局(International Bureau of weights and Measures, BIPM)采集全球约80个实验室的原子钟数据，通过原子时算法综合生成，稳定度、准确度和可靠性超出任何参与计算的单台时钟^[16,17]。

铁路时间同步网综合原子时标可通过融合部分关键时间节点的时钟，生成一个高可靠性、高准确性、长期稳定的综合时标，作为网内统一的时间溯源参考，向铁路各系统提供标准时间量值。

2.2 时标算法

假设参与计算铁路时间同步网综合原子时标的钟组内时钟数量为 N ，选取一台时钟作为主钟，用下标 r 表示，其余时钟用下标 j 表示。 τ 为时差测量周期，测量时刻可递归表示为 $t_k = t_{k-1} + \tau$ 。 t_k 时刻铁路时间同步网综合原子时标TE如式(1)

$$TE(k) = \sum_{j=1}^{N-1} \omega_j(k) h_j(k) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{N-1} \omega_j(k) = 1 \quad (2)$$

其中， h_j 为时钟 j 的读数， ω_j 为时钟 j 在计算TE时的权重，可基于表征时钟频率稳定性的统计量计算获得，例如经典方差、艾伦方差等^[17]。基于前 m 个时差测量周期内时钟 j 与TE时差的标准差计算权重。 t_k 时刻钟组时钟 j 的权重 $\omega_j(k)$ 计算如式(3)和式(4)

$$e_j(k) = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^m \left(X_{j-TE}^p(k - (m - p + 1)\tau) - \bar{X}_{j-TE} \right)^2}{m - 1}} \quad (3)$$

$$\omega_j(k) = \frac{1/e_j(k)}{\sum_{j=1}^{N-1} 1/e_j(k)} \quad (4)$$

其中， $e_j(k)$ 为 $t_{k-m} \sim t_{k-1}$ 对应的 m 个连续时差测量周期内时钟 j 与主钟 r 时差标准差， X_{j-TE} 为时钟 j 与TE的时差， \bar{X}_{j-TE} 为这 m 个连续时差测量周期内时钟 j 与TE时差均值。

由于 h_j 无法直接获取，对式(1)进行变换，结果如式(5)

$$TE(k) - h_r(k) = \sum_{j=1}^{N-1} \omega_j(k) [h_j(k) - h_r(k)] \quad (5)$$

h_r 为主钟 r 的读数。如此，便可用两钟时差来表示TE。定义主钟 r 与TE时差为 $X_{r-TE}(k)$ ，时钟 j 与主钟 r 时差为 $X_{r-j}(k)$

$$X_{r-TE}(k) = TE(k) - h_r(k) \quad (6)$$

$$X_{r-j}(k) = h_j(k) - h_r(k) \quad (7)$$

式(6)可写为

$$X_{r-TE}(k) = \sum_{j=1}^{N-1} \omega_j(k) X_{r-j}(k) \quad (8)$$

TE就可用 $X_{r-TE}(k)$ 表示。钟组其他时钟 j 与TE的时差 $X_{j-TE}(k)$ 可由式(9)计算得到

$$X_{j-TE}(k) = X_{r-TE}(k) - X_{r-j}(k) \quad (9)$$

2.3 构建方案

铁路时间同步网1,2级时间节点及部分3级时间节点均通过OTN设备接入传输网，任意两个时间节点间均可基于PTP获取节点间时差，所以通过OTN设备接入传输网的所有时间节点可构成一个钟组。但3级时间节点总数不确定且非均支持PTP时间同步，各节点设备性能差异较大，综合考虑，选择1级时间节点和18个2级时间节点构成钟组。

TE同步架构下，1级时间节点正常工作时，选取其为钟组主钟，铁路时间同步网时间同步原理如图1。各2级时间节点基于PTP协议与1级时间节点比对时间，TE根据时标算法生成。1级时间节点向TE同步，2,3级时间节点向1,2级时间节点同步，实现网内所有时间节点通过向TE同步溯源至UTC。

1级时间节点故障时，铁路时间同步网时间同步原理如图2。新主钟在18个2级时间节点中产生，确保TE可持续生成。为保持TE稳定，新主钟性能应该最接近TE，选取方式为，分别计算18个2级时间节点前 m 个时差测量周期与TE时差的标准差，标准差最小的被选为新主钟。新主钟向TE同步，其余的2级时间节点、3级时间节点分别向新主钟、2级时间节点同步，各时间节点通过向TE同步溯源至UTC。

如图3，传统同步架构下1级时间节点故障时，各2级时间节点分别转为通过GNSS单向授时同步至BDST, UTC(BDS), GPST, UTC(GPS)四者之一，时间溯源不一致。图4为1级时间节点故障时TE同步架构与传统同步架构下时间量值传递对比示意图。TE同步架构下，TE由多个时间节点融合生成，只要钟组内存在正常运行的时间节点，TE便

可生成，为网内铁路各系统提供统一的标准时间量值，保证网内各时间节点溯源一致，避免传统同步架构下时间节点溯源不一致的问题。

铁路1,2级时间节点的母钟设备集成了PTP时间服务器、铷原子钟/高稳晶振等，自动运行。在不改变当前设备内部结构和运行状态的前提下，主钟与TE的时差数据无法被主钟的母钟设备直接使用，所以，考虑将TE的物理实现作为母钟设备的外部时间频率源。如图5，时频精细调整装置接入主钟的母钟设备输出的时频信号，并根据TE与主钟的时差调整自身，使自身的输出与TE保持一致，构建TE的物理实现。时频精细调整装置输出的时频信号再供主钟的母钟设备实现向TE同步，即主钟向TE同步。

UTC作为纸面时标，以参与UTC计算的实验室k实现的UTC的物理实现UTC(k)与UTC的时差

$X_{UTC-UTC(k)}$ 形式给出， $X_{UTC-UTC(k)}$ 公布在BIPM每

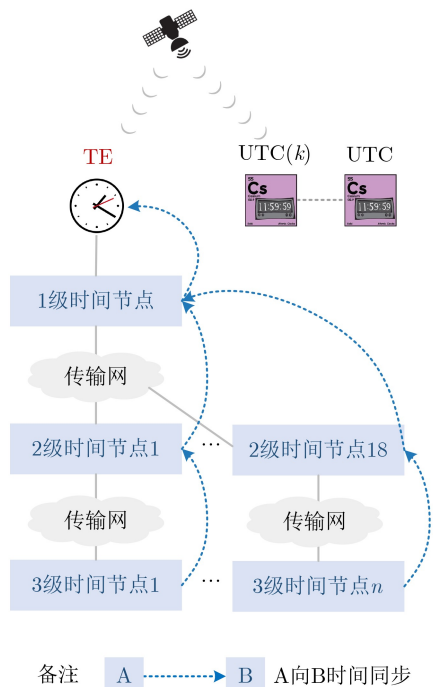


图1 TE同步架构下一级时间节点正常工作时铁路时间同步网时间同步原理图

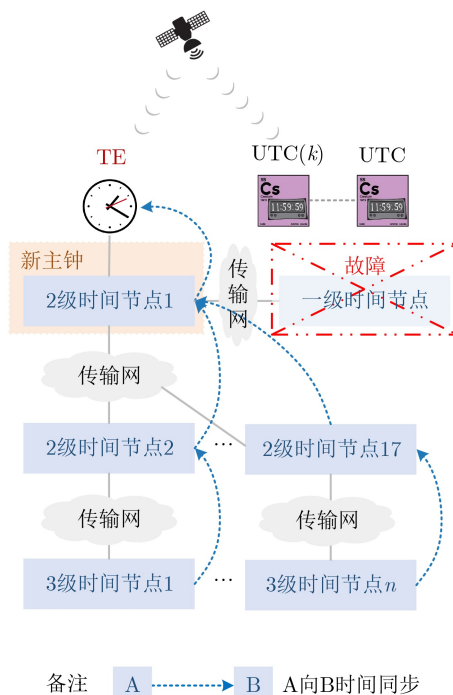


图2 TE同步架构下一级时间节点故障时铁路时间同步网时间同步原理图

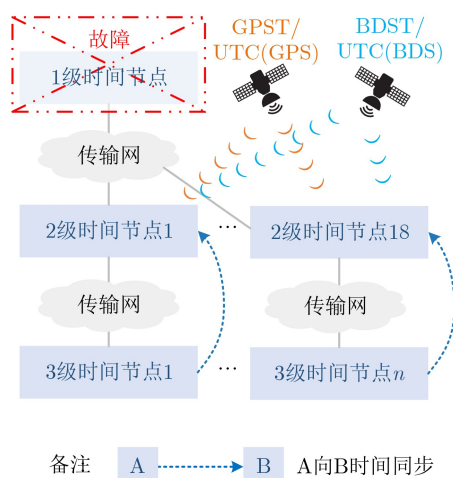
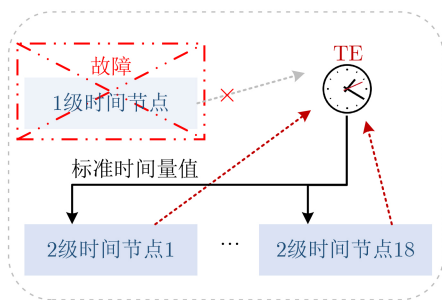
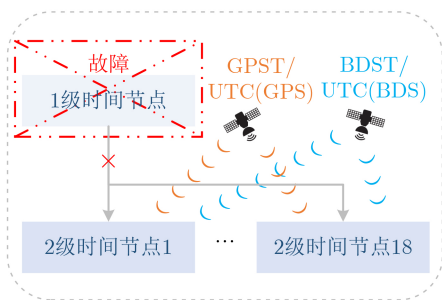


图3 传统同步架构下一级时间节点故障时铁路时间同步网时间同步原理图



(a) TE同步架构



(b) 传统同步架构

图4 一级时间节点故障时TE同步架构与传统同步架构下时间量值传递对比

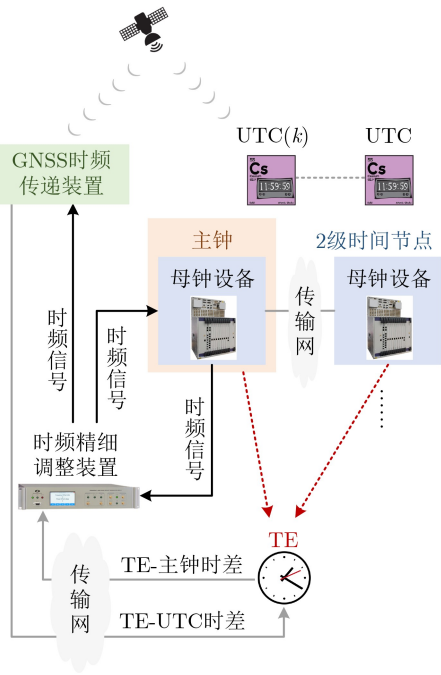


图5 TE的物理实现及TE-UTC溯源链路构建

月发布的Circular T时间公报中(参见文献[18])。如图3, GNSS时频传递接收机接入TE物理实现输出的时频信号, 基于GNSS全/共视法实现TE与UTC(k)比对, 以获取二者时差 $X_{UTC(k)-r}$

$$X_{UTC(k)-r} = UTC(k) - h_r \quad (10)$$

$$X_{UTC-UTC(k)} = UTC - UTC(k) \quad (11)$$

$$X_{UTC-TE} = X_{UTC-UTC(k)} + X_{UTC(k)-r} - X_{r-TE} \quad (12)$$

由式(6)、式(10)一式(12)原理即可实现TE-UTC时间比对, 进而实现铁路时间同步网溯源至UTC。TE根据 X_{UTC-TE} 调整自身, 实现与UTC的同步。

图6为铁路时间同步网综合原子时标系统设计结构图, 主要包含时差数据库与综合时标计算服务器。非主钟的各2级时间节点在本地记满M个周期的自身与主钟的时差数据后, 轮流将该M个时差发送至时差数据库。综合时标计算服务器获取数据库的时差数据, 生成TE, 即主钟与TE的时差, 并计算2级时间节点j与TE的时差, 以实现后续节点及PTP链路的监测。主钟通过传输网获取自身与TE的时差, 并调整自身。不考虑其他耗时, 理论上TE滞后时间为至少 τ 、至多 $(M-1)\tau$ 。

2.4 基于综合原子时标的节点及PTP链路监测

综合原子时标系统同时可实现时间节点及PTP链路监测功能。基于PTP计算的节点间时差 θ 公式如式(13)

$$\theta = \frac{[(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)]}{2} \quad (13)$$

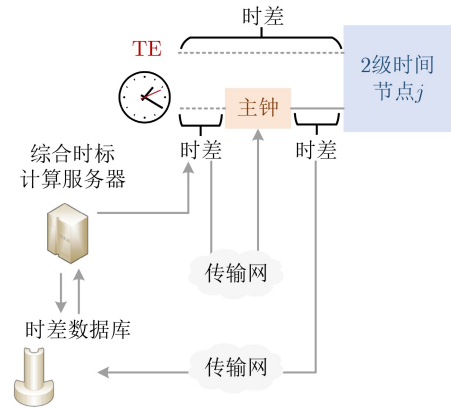


图6 铁路时间同步网综合原子时标系统结构

以主钟、2级时间节点j间PTP同步为例, 主钟发送Sync报文至2级时间节点j, 并记录报文发送时刻, 用时间戳 T_1 表示, 紧接着又向2级时间节点j发送包含 T_1 的Follow_Up报文; 2级时间节点j接收Sync报文, 记录报文接收时刻, 用时间戳 T_2 表示, 再向主钟j发送Delay_Req报文, 并记录报文发送时刻, 用时间戳 T_3 表示; 主钟接收Delay_Req报文, 记录报文接收时刻, 用时间戳 T_4 表示, 并将包含了4个时间戳信息的Delay_Resp报文发送至2级时间节点j。2级时间节点j根据式(13), 即可计算自身与主钟的时差。时间戳在节点时间服务器加盖, 其包含的时间信息由节点时钟设备决定, PTP链路中断会导致报文无法传输, 任一时间戳加盖失败或报文缺失, 都将导致时差无法计算, 具体表现为时差数据的中断。TE又是基于节点间PTP时差数据生成的, 所以, 时间节点与TE的时差可一定程度地反映时间节点或PTP链路通断的情况。当2级时间节点j与TE的时差抖动明显增大, X_{r-TE} 无明显变化, ω_j 明显减小但非0, 则大概率可判定2级时间节点j时钟设备出现故障或相应PTP链路不稳定; 当时间节点与TE的时差数据中断, X_{r-TE} 无明显变化, ω_j 骤降为0时, 则大概率可判定2级时间节点j的PTP链路中断或节点时间服务器出现故障; 当 X_{r-TE} 抖动明显增大且无法自恢复至原平稳水平, 或 X_{r-TE} 数据中断, 则大概率可判定作为主钟的时间节点出现故障。由于TE的生成具有近实时性, 通过分析时间节点与TE的时差、 ω_j 随时刻的变化, 能够实现时间节点及链路故障的及时排查和判断。将两个2级时间节点与TE的时差作差, 即可实现任意2级节点间时差的获取。3级时间节点基于PTP协议获取自身与2级时间节点的时差, 任意3级节点间时差也可间接获取, 如此, 从整体层面实现了对铁路时间同步网所有时间节点间时差的监测。

3 性能评估与分析

由于UTC为滞后的纸面时, UTC与UTC(k)比对周期为5天, 并且在验证测试时UTC(k)常作为参考, 所以基于UTC(k)建立仿真模型。由式(14)时钟相位差模型^[19], 构建铁路时间同步网中的节点仿真模型

$$x(k) = x_0 + y_0\tau + \frac{1}{2}a\tau^2 + \varphi(k) \quad (14)$$

$x(k)$ 为 t_k 时刻时间节点与UTC(k)的时差, x_0 为初始时差, y_0 为初始频率偏差, a 为线性频率漂移率, $\varphi(k)$ 为随机噪声。通过引用文献^[7]中1级时间节点频率准确度(频率偏差)的测量结果, 构建频差为 8.750×10^{-13} 的1级时间节点模型, 频差优于 3.000×10^{-12} 的2级时间节点模型。根据铁路时间同步网同步原则, 3级时间节点向2级时间节点同步, 其性能可通过2级时间节点性能推断。18个2级时间节点基于PTP协议与1级时间节点比对, 根据式(13), PTP比对链路模型可通过4个时间戳描述。通过引用文献^[20]在铁路骨干网进行PTP时间传送实验的结果, 对4个时间戳加入不同大小的服从高斯分布的随机噪声, 以模拟铁路时间同步网不同链路噪声下PTP时间同步。

本节基于仿真模型, 分析TE频率、时间特性, 验证各节点溯源一致性、TE可精确溯源至UTC, TE对2, 3级时间节点鲁棒性提升和基于TE的节点及链路监测方法有效性。

3.1 综合原子时标时间频率特性

仿真总时长为30 d, 由于通用全球导航卫星系统时间传递标准(Common GNSS Generic Time Transfer Standard, CGGTTS)文件生成时间间隔为960 s, 设置1级时间节点960 s与UTC(k)进行一次比对, 各2级时间节点与1级时间节点测量间隔为960 s。

各时间节点与UTC(k)频差如表1, 其中“1”代表1级时间节点, “21”代表2级时间节点1, “22”代表2级时间节点2, 以此类推。结果显示, TE、1级时间节点、18个2级时间节点均满足频差优于 3.000×10^{-12} 的要求。TE与UTC(k)的最大偏差为27.12 ns, UTC(k)与UTC时差可由Circular T获取, 一般为几纳秒, 故TE与UTC偏差可实现优于30 ns。

分别对比TE与通过GNSS单向授时同步的1级时间节点、TE同步架构下与传统同步架构下2级时间节点的性能。使用修正Allan偏差(Modified Allan DEVIation, MDEV)表示频率稳定度, 时间偏差(Time DEVIation, TDEV)表示时间稳定度。根

据文献^[6]中国信息通信研究院对1级时间节点通过GNSS单向授时同步性能的实测结果, 仿真1级时间节点通过GNSS单向授时同步, 2级时间节点向1级时间节点时间同步的过程。图7(a)、图7(b)、图8分别显示了TE的MDEV, TDEV优于通过GNSS单向授时同步的1级时间节点近1个数量级, 同时TE的TDEV, 最大时间间隔误差(Maximum Time Interval Error, MTIE)满足《标准》要求, 表明TE可作为更稳定的网内统一的时间溯源参考, 为铁路各系统提供标准时间量值。

以2级时间节点1为例, 分析TE同步结构与传统同步架构下2级时间节点的MTIE、时间稳定度。TE同步架构下2级时间节点1频差计算得到为 5×10^{-15} , 与UTC(k)最大偏差为108 ns。频差、与UTC时差、MTIE, TDEV均满足《标准》要求。与表1结果相比, 2级时间节点1在TE同步架构下的频差稍优于传统同步架构下的频差。图9(a)显示了TE同步架构下2级时间节点1较传统同步架构的TDEV小约1倍, 时间稳定度较传统同步架构高约40%。仿真结果表明, 引入TE可提高时间节点时间稳定度。

3.2 综合原子时标向UTC溯源的不确定度

影响TE向UTC溯源的不确定度分量包括TE与UTC(k)时差测量不确定度、UTC(k)与UTC时差的不确定度。在BIPM主导的产生UTC的时频领域唯一关键比对(CCTF-UTC, K001)中, GPS载波相位法和GPS码基时频传递法不确定度A类评定结果

表1 各时间节点向TE同步后与UTC(k)频差

时间节点	频差	时间节点	频差
TE	5.4×10^{-14}	1	-3.5×10^{-14}
21	-9×10^{-15}	22	1.42×10^{-13}
23	-9.4×10^{-14}	24	4.6×10^{-14}
25	7.9×10^{-14}	26	-6.5×10^{-14}
27	-1.55×10^{-13}	28	-9.7×10^{-14}
29	-1.00×10^{-13}	210	-2.8×10^{-14}
211	-2.34×10^{-13}	212	-5.3×10^{-14}
213	-4.0×10^{-14}	214	-6.1×10^{-14}
215	-2.6×10^{-14}	216	-1.5×10^{-14}
217	-2.03×10^{-13}	218	-2.0×10^{-14}

表2 1级时间节点故障前后TE同步架构/传统同步架构下2级时间节点1相对UTC(k)的标准差、均值变化(ns)

	向TE同步	通过GNSS单向授时进行同步
标准差变化	6.96	23.99
均值变化	0.02	0.14

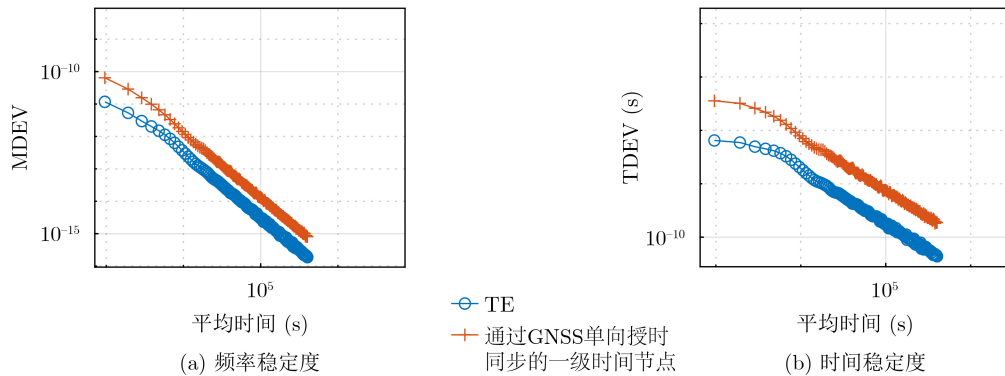


图 7 TE、通过GNSS单向授时同步的1级时间节点频率稳定度、时间稳定度

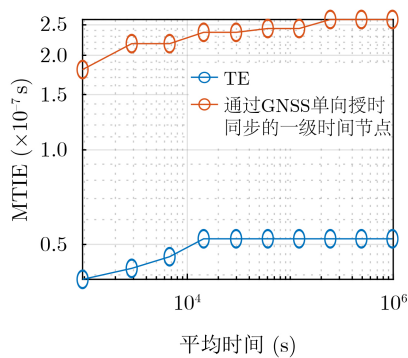


图 8 TE、通过GNSS单向授时同步的1级时间节点MTIE

分别为0.3 ns和0.7 ns；B类评定由于主要受到比对链路校准的影响，两种方法的结果几乎都为1.5~2.5 ns。故两种方法的合成标准不确定度均为2~3 ns，即基于GNSS全/共视法测量的TE与UTC(k)时差的标准不确定度为2~3 ns。UTC(k)与UTC时差的标准不确定度可通过Circular T获取，一般为几纳秒。在各标准不确定度分量不相关的前提下，TE向UTC溯源的不确定度 u_{TE-UTC} 可由式(15)评定

$$u_{TE-UTC} = \sqrt{u_{TE-UTC(k)}^2 + u_{UTC(k)-UTC}^2} \quad (15)$$

以2023年7月12日发布的Circular T中， $u_{UTC(NIM)-UTC}$

为2 ns的结果， u_{TE-UTC} 评定3~4 ns，即TE向UTC溯源的不确定度为3~4 ns。

3.3 2,3级时间节点鲁棒性的提高

1级时间节点故障时，根据新主钟选取原则，2级时间节点3成为新主钟，TE持续生成，并作为网内统一的时间溯源参考提供标准时间量值，保证网内各时间节点溯源一致。节点鲁棒性由1级时间节点故障前后TE同步架构与传统同步架构下2,3级时间节点时间信号的稳定程度体现，指标有节点时间相对UTC(k)的标准差变化、均值变化、基于MDEV计算的频率稳定度、基于TDEV计算的时间稳定度。以2级时间节点1为例，通过分析1级时间节点故障前后TE同步架构下与传统同步架构下2级时间节点1的上述4个指标，并根据铁路时间同步网同步原则推断向其同步的3级时间节点性能，验证TE对2,3级时间节点鲁棒性提高的有效性。

表2显示，1级时间节点故障前后，2级时间节点1在TE同步架构下相对UTC(k)标准差变化、均值变化较传统同步架构下转为通过GNSS单向授时同步要小。图10(a)、图10(b)显示了TE同步架构下2级时间节点1的MDEV与TDEV小于传统同步架构，时间、频率稳定度提高约35%。仿真结果说明，相比于传统同步架构，TE同步架构下2级时间

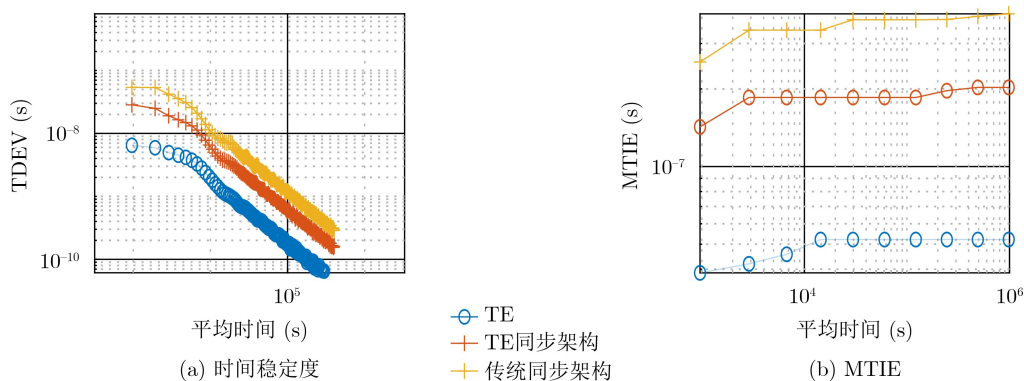


图 9 TE、TE同步架构下/传统同步架构下2级时间节点1的时间稳定度、MTIE

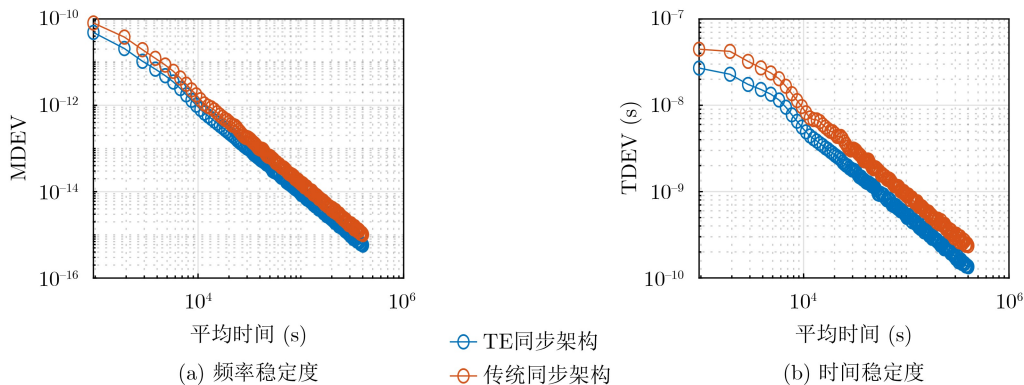


图 10 TE同步架构/传统同步架构下2级时间节点1的频率稳定度、时间稳定度

节点受1级时间节点故障影响减小, 3级时间节点由于向2级时间节点同步, 所受到的1级时间节点故障的影响也减小, 验证了TE可有效提高2,3级时间节点鲁棒性。

3.4 基于综合原子时标的自动监测

设置仿真总时长为 1×10^7 s, 各2级时间节点与1级时间节点测量间隔为10 s。权重由前500个测量周期时差数据的标准差决定。为验证综合原子时标节点监测功能, 从仿真时刻 5.501×10^4 s开始, 2级时间节点18加入标准差为 $20 \mu\text{s}$ 的高斯白噪声; 从仿真时刻 1.000×10^5 s开始, 2级时间节点17加入标准差为 $15 \mu\text{s}$ 的高斯白噪声; 从仿真时刻 1.500×10^5 s开始, 3级时间节点16的时差数据被抹去; 模拟时间同步节点数据异常或中断时的情景。

图11展示了部分2级时间节点与TE时差, 为方便显示, 时差数据进行了平移。图12(b)为2级时间节点16,17,18权重的局部放大图。2级时间节点17, 18与TE时差分别在约 1×10^5 s、约 1×10^4 s发生剧烈抖动, 图12(b)显示其权重骤降接近于0。由于2级时间节点1,15与TE时差数据抖动仍较为平稳, 且TE正常生成, 排除1级时间节点故障的可能, 大概率可判断2级时间节点17,18的时钟设备出现故障

或PTP链路不稳定, 但由于时差可持续获得, PTP链路仍连通。图12(a)显示2级时间节点16的时差数据在约 1.5×10^5 s时中断, 图12(b)显示对应时间节点权重降为0, 大概率可判断此时节点PTP链路断开或时间服务器出现故障。

仿真结果表明, 钟组某时间节点或某几个时间节点出现故障时, 通过对各级时间节点与TE时差、权重的分析, 能够准确实现对故障的初步排查与判断。又由于1级、2级时间节点与TE时差已知, 3级与2级时间节点间时差可通过PTP获取, 基于统一参考TE, 能够实现网内所有时间节点间时差的监测。

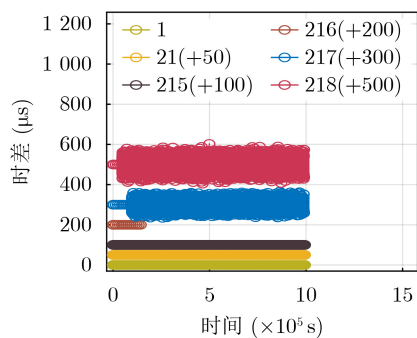


图 11 1级、部分2级时间节点与TE时差图

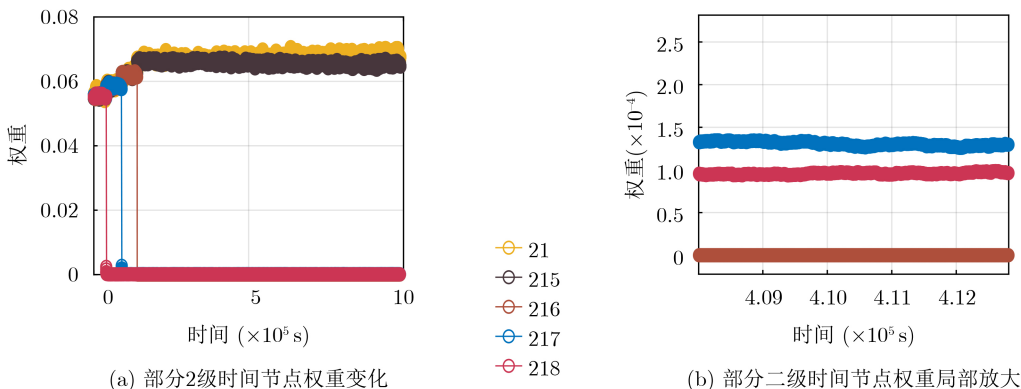


图 12 1级、部分2级时间节点与TE时差、权重变化图

4 结束语

针对目前铁路时间同步网各时间节点溯源不一致,且未精确溯源至UTC;2,3级时间节点受1级时间节点故障影响大,鲁棒性不足;缺乏整体层面的自动监测方法的潜在问题,提出铁路时间同步网综合原子时标TE,在不改变现有铁路时间同步网结构的条件下,基于1,2级共19个时间节点构建TE,设计TE同步架构,同时介绍了基于TE的时间节点及PTP链路监测方法,实现时间节点及其相应PTP链路通断、节点间时差自动监测。结果表明,TE与UTC(k)的最大偏差为27.12 ns,与UTC的溯源偏差可优于30 ns,溯源不确定度可优于5 ns,频差可达 10^{-14} 量级。相比通过GNSS单向授时同步的1级时间节点,TE的MDEV,TDEV小约1个数量级,频率、时间稳定度更优,其可为网内各系统提供统一的标准时间量值。1级时间节点正常运行时,引入TE可提高2级时间节点时间稳定度约40%。1级时间节点故障时,TE依然能够稳定、准确地持续生成,作为网内统一的时间溯源参考提供标准时间量值,保证网内各时间节点溯源一致;对比传统架构下2级时间节点转为通过GNSS单向授时进行同步,TE同步架构下的2级时间节点标准差、均值变化要小,时间节点时间、频率稳定度提高约35%,受1级时间节点故障影响小,验证了引入TE对提高2,3级时间节点鲁棒性的有效性。通过对时间节点权重、时间节点与TE的时差数据分析,可对节点间时差、时间节点及PTP链路通断进行自动监测,实现故障及时初步排查与判断。构建铁路时间同步网综合原子时标,从源头保证铁路各系统时间量值一致性、精确性及可溯源至UTC,减小1级时间节点故障对2,3级时间节点的影响,提高节点鲁棒性,实现时间节点及PTP链路通断自动监测,对于完善铁路时间同步网的建设,确保铁路系统安全、高效地运营具有积极作用。

参考文献

- [1] 于佳亮,程华,于天泽,等.基于北斗卫星同步授时的应用研究与试验[J].中国铁路,2013(4):18-21. doi: 10.3969/j.issn.1001-683X.2013.04.005.
YU Jialiang, CHENG Hua, YU Tianze, et al. Application research and experiment of synchronous timing service based on Beidou satellite[J]. *Chinese Railways*, 2013(4): 18-21. doi: 10.3969/j.issn.1001-683X.2013.04.005.
- [2] 国家铁路局. TB/T 3283-2015 铁路时间同步网技术条件[S].北京:中国铁道出版社,2015.
National Railway Administration of the People's Republic of China. TB/T 3283-2015 Technical conditions for railway time synchronization network[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015.
- [3] 梁坤,余涸,杨志强,等.铁路时间同步网溯源及同步性能研究[J].中国铁路,2023(8):43-51. doi: 10.19549/j.issn.1001-683x.2023.04.26.003.
LIANG Kun, YU Tian, YANG Zhiqiang, et al. Research on traceability and synchronization performance of railway time synchronization network[J]. *Chinese Railways*, 2023(8): 43-51. doi: 10.19549/j.issn.1001-683x.2023.04.26.003.
- [4] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). JCGM 200: 2012 International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM)[S]. 3rd ed. JCGM, 2012.
- [5] 卫龙,高红梅.基于北斗系统的铁路地面时间同步系统设计[J].西部交通科技,2016(2):77-80. doi: 10.13282/j.cnki.wccst.2016.02.018.
WEI Long and GAO Hongmei. Design of railway ground time synchronization system based on Beidou navigation system[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2016(2): 77-80. doi: 10.13282/j.cnki.wccst.2016.02.018.
- [6] 程华,吕博.卫星共视技术在铁路同步网性能监测中的应用研究[J].电信工程技术与标准化,2019,32(9):78-82. doi: 10.13992/j.cnki.tetas.2019.09.017.
CHENG Hua and LV Bo. Application research of satellite co-vision technology in railway synchronous network performance monitoring[J]. *Telecom Engineering Technics and Standardization*, 2019, 32(9): 78-82. doi: 10.13992/j.cnki.tetas.2019.09.017.
- [7] 王亚民.北斗卫星导航系统在铁路同步网中的应用[J].中国铁路,2013(4):8-11,29. doi: 10.3969/j.issn.1001-683X.2013.04.003.
WANG Yamin. Application of Beidou satellite navigation system in railway synchronization network[J]. *Chinese Railways*, 2013(4): 8-11,29. doi: 10.3969/j.issn.1001-683X.2013.04.003.
- [8] 程华.北斗卫星导航系统在铁路同步网中的应用研究[J].铁道通信信号,2019,55(7):31-34. doi: 10.13879/j.issn1000-7458.2019-07.19086.
CHENG Hua. Application of BDS in railway synchronization networks[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2019, 55(7): 31-34. doi: 10.13879/j.issn1000-7458.2019-07.19086.
- [9] 王胜军,李德利.OTN长距离传输时间同步的研究[J].光通信技术,2017,41(7):13-16. doi: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2017.07.004.
WANG Shengjun and LI Deli. Research on OTN long distance transmission time synchronization[J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(7): 13-16. doi: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2017.07.004.

- [10] 陈永, 詹芝贤, 刘雯. 下一代高速铁路LTE-R时间同步网协议脆弱性分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(1): 63–74. doi: [10.3969/j.issn.1001-8360.2023.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2023.01.008).
CHEN Yong, ZHAN Zhixian, and LIU Wen. Vulnerability analysis of next-generation high-speed railway LTE-R time synchronization network protocol[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(1): 63–74. doi: [10.3969/j.issn.1001-8360.2023.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2023.01.008).
- [11] 程华, 张萌, 李芳, 等. 铁路5G-R承载技术与组网方案研究[J]. 中国铁路, 2023(5): 1–7. doi: [10.19549/j.issn.1001-683x.2023.03.10.001](https://doi.org/10.19549/j.issn.1001-683x.2023.03.10.001).
CHENG Hua, ZHANG Meng, LI Fang, *et al.* Research on railway 5G-R carrying technology and networking scheme[J]. *Chinese Railways*, 2023(5): 1–7. doi: [10.19549/j.issn.1001-683x.2023.03.10.001](https://doi.org/10.19549/j.issn.1001-683x.2023.03.10.001).
- [12] 中国铁道学会. 铁路下一代承载网应用技术白皮书[M]. 北京: 中国铁道学会, 2020.
China Railway Society. White Paper: Application Technology of Next Generation Railway Carrying Network[M]. Beijing: China Railway Society, 2020.
- [13] 于天泽, 张俊. 新型铁路同步网及其关键技术研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(9): 43–45,49. doi: [10.13879/j.issn1000-7458.2019-09.19045](https://doi.org/10.13879/j.issn1000-7458.2019-09.19045).
YU Tianze and ZHANG Jun. Study on new type railway synchronization network[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2019, 55(9): 43–45,49. doi: [10.13879/j.issn1000-7458.2019-09.19045](https://doi.org/10.13879/j.issn1000-7458.2019-09.19045).
- [14] DIMARCQ N, GERTSVOLF M, MILETI G, *et al.* Roadmap towards the redefinition of the second[J]. arXiv: 2307.14141, 2023. doi: [10.48550/arXiv.2307.14141](https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.14141).
- [15] LEVINE J, TAVELLA P, and MILTON M. Towards a consensus on a continuous coordinated universal time[J]. *Metrologia*, 2023, 60(1): 014001. doi: [10.1088/1681-7575/ac9da5](https://doi.org/10.1088/1681-7575/ac9da5).
- [16] MILTON J and PANFILO G. A new way to set the maximum weight in the weighting algorithm of UTC[C]. 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Paris, France, 2022: 1–2. doi: [10.1109/eftf/ifcs54560.2022.9850789](https://doi.org/10.1109/eftf/ifcs54560.2022.9850789).
- [17] PANFILO G and HARMEGNIES A. A new weighting procedure for UTC[C]. 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Prague, Czech Republic, 2013: 652–653. doi: [10.1109/EFTF-IFC.2013.6702122](https://doi.org/10.1109/EFTF-IFC.2013.6702122).
- [18] International Bureau of Weights and Measures (BIPM). Circular T[EB/OL]. <https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t>, 2023.
- [19] MA Yuexin, TANG Chengpan, HU Xiaogong, *et al.* Discussions of a2-drift variations of BeiDou-3 satellite rubidium atomic clocks[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1004713. doi: [10.1109/tim.2022.3187744](https://doi.org/10.1109/tim.2022.3187744).
- [20] 程华, 胡昌军. 基于1588v2高精度时间远距离传送实践[J]. 电信技术, 2018(3): 78–81. doi: [10.3969/j.issn.1000-1247.2018.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1247.2018.03.020).
CHENG Hua and HU Changjun. Practice of long-distance transmission based on 1588v2 high-precision time[J]. *Telecommunications Technology*, 2018(3): 78–81. doi: [10.3969/j.issn.1000-1247.2018.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1247.2018.03.020).
- 梁 坤: 男, 教授, 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。
韦宝盈: 女, 硕士生, 研究方向为精密测量, 时间频率传递和同步等。

责任编辑: 余 蓉