

文章编号: 1001-4632 (2026) 03-0220-10

引用格式: 徐宁, 韦宝盈, 何之煜, 等. 基于 GNSS 的列车时频溯源与同步方法及性能评估[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(3): 220-229.

Citation: XU Ning, WEI Baoying, HE Zhiyu, et al. A GNSS-Based Method for Train Time-Frequency Traceability and Synchronization with Performance Evaluation [J]. China Railway Science, 2026, 47 (3): 220-229.

基于 GNSS 的列车时频溯源与同步方法及性能评估

徐 宁¹, 韦宝盈², 何之煜¹, 梁 坤²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081;

2. 北京交通大学 自动化与智能学院, 北京 100044)

摘 要: 针对当前铁路时间同步网中列车时间节点溯源不统一、车地及车车间时频相互孤立的问题, 提出 1 种基于全球导航卫星系统 (GNSS) 的列车时频溯源与同步方法。通过构建车地、车车间高精度时频传递与溯源同步链路, 实现列车与地面节点、列车与列车节点的时频传递和溯源同步; 研制专用装置, 并基于中国国家铁道试验中心环行铁道完成列车时频传递与溯源一体化性能首次评估。结果表明: 车地时频传递链路噪声水平为 2~6 ns, 时频传递不确定度为 6.6 ns; 车车间时频传递链路噪声水平为 4~7 ns, 不确定度为 7.5 ns; 在 90% 以上的工况中, 列车节点可实现对地面节点偏差优于 ± 10 ns 的高精度时标复现。该方法可为车地、车车间高精度时频传递与溯源同步提供参考与支撑。

关键词: 铁路时间同步网; 列车时间节点; 传递与溯源; 环行铁道; GNSS

中图分类号: U285 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.03.19

时间是目前准确度最高、应用最广的物理量, 已渗透至众多领域。随着我国铁路高速发展, 行车密度和运行速度持续升高, 对列车间、列车与地面时间系统的高精度时频同步提出了更为严苛的要求。高速运行状态下, 列车安全距离计算、多时延条件下列车自动驾驶优化曲线计算与控制指令输出等方面均与高精度的时频信号密不可分。同时, 在铁路智能运维技术发展背景下, 列车与地面需协同进行故障信号的诊断、排查和处理。

当前列车时间同步方法存在一定局限性, 主要表现为列车时频溯源不统一, 且车地间与车车间的时频偏差无法精确获取。在现有架构中, 铁路时间同步网由地面 1 级、2 级、3 级时间同步节点 (下文简称为地面节点) 及列车时间同步节点 (下文简称为列车节点) 组成^[1-3]。地面 3 个层级的节点采用主从树状结构, 而列车时间同步节点独立于该结构之外。具体而言, 一级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; 2 级、3 级节点通过传输网分别获取 1 级、2 级节点的时间信息。列车节点依赖 BDS 或 GPS 单向授时获取标准时间, 当 BDS 或 GPS 信号失效时, 采用内置钟守时。单向授时场景下, 节点可获取的标准时间包括 BDS 系统时间 (BDT) 和 GPS 系统时间 (GPST), 或由 BDS 预测的协调世界时 UTC (BDS), 或由 GPS 预测的协调世界时 UTC (GPS)。这类多源时间基准导致列车节点的时频溯源链路不统一, 进而造成节点间性能差异。

据文献 [2] 研究, 未经校准的不同接收机所观测到的 GPST 与 BDT 时间偏差最高可达数百纳秒。此类源头时间偏差在向下传递中还可能放大。此外, 单向授时模式使列车隔离于地面, 列车间亦相互孤立, 任意二者间时频偏差无法获知。据文献

收稿日期: 2025-10-21; 修订日期: 2026-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12473072); 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心开放课题 (2023YJ360)

第一作者: 徐 宁 (1981—), 男, 江苏沭阳人, 研究员。E-mail: jsxuning@aliyun.com

通讯作者: 梁 坤 (1980—), 男, 山西大同人, 教授, 博士。E-mail: liangk@bjtu.edu.cn

[4] 的调查, 部分涉及行车安全分析的系统中曾出现 17 min 以上的时间偏差却未被及时发现, 给系统运营带来了极大的安全隐患。

围绕列车时间同步技术, 已有研究主要从编组内同步和向外部参考源同步等方向展开。文献 [5] 将“时间同步”明确列为列车通信网络引入时间敏感网络时必须优先标准化的关键技术之一, 指出需保证列车骨干网 ETB 与组成网 ECN 中所有交互时间敏感流的设备时钟一致, 以支撑全局时间基础上的流量调度。文献 [6] 通过改进 PI 控制算法优化精确时间协议同步机制, 将列车通信网络中主从节点间的时间偏差压缩至 1.38 ns。文献 [7] 引入 IEEE 802.1 AS 时间同步协议, 在 IEEE 802.3 以太网与 IEC 61375-2-3 TRDP 框架下实现列车以太网通信网络主从节点约 $\pm 1 \mu\text{s}$ 的时间同步。文献 [8] 提出 2 种授时思路: 一是布设列车基准时频源, 借助 GPS 溯源标准时间并为全车车载设备提供统一时间基准; 二是各车载设备直接通过 GPS 独立获取标准时间。文献 [9—10] 均设计了基于 BDS/GPS 单向授时的列车运行监控装置 LKJ 校时器, LKJ 再通过自身计时器获取标准时间。文献 [11] 提出并分析各信号车载设备通过 BDS 单向授时方案的可能性。文献 [12] 提出网络时间协议辅助 BDS/GPS 的 LKJ 授时方法。现有成果多聚焦单车内部授时与组网同步, 尚未涉及多列车时频溯源统一、车车节点时间偏差获取的问题, 未见将列车、地面节点纳入同一框架的方案研究, 车地与车车时频同步仍处于相对割裂状态。

本文提出 1 种基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的列车节点时频溯源与同步方法, 可实现以地面节点为参考的列车时频溯源同步, 以建立列车与地面的联系, 并拓展至车车间时频传递, 构建车地、车车时频链接, 推动铁路时间同步网的一体化建设。基于所提方法, 研制列车时频溯源与同步装置, 构建移动列车与地面间、移动列车间的时频传递链路, 搭建移动列车溯源与同步平台; 在中国国家铁道试验中心环形铁道进行验证测试, 并基于环形铁道试验对列车时频传递与溯源一体化性能开展首次评估。

1 列车节点时频溯源与同步方法

基于 GNSS 的列车节点时频溯源与同步原理如

图 1 所示, 图中: C_g 和 C_t 分别为地面节点和列车节点的时频源, 分别用于保持地面和列车的本地时间; $\Delta T_{g, \text{GNSS}}$ 为 C_g 与 GNSS 系统时间的偏差, 由地面节点配备的 GNSS 时频传递系统测量; $\Delta T_{t, \text{GNSS}}$ 为 C_t 与 GNSS 系统时间的偏差, 由列车节点配备的 GNSS 时频传递系统测量; $\Delta T_{t, g}$ 为 C_t 与 C_g 的偏差, 由 $\Delta T_{t, \text{GNSS}}$ 和 $\Delta T_{g, \text{GNSS}}$ 单差计算所得, 作为车地时间传递结果。进一步地, 车地频率传递结果可由 $\Delta T_{t, g}$ 导出。列车节点的驯服控制系统基于 $\Delta T_{t, g}$ 调整 C_t , 实现列车节点向地面节点的溯源同步。

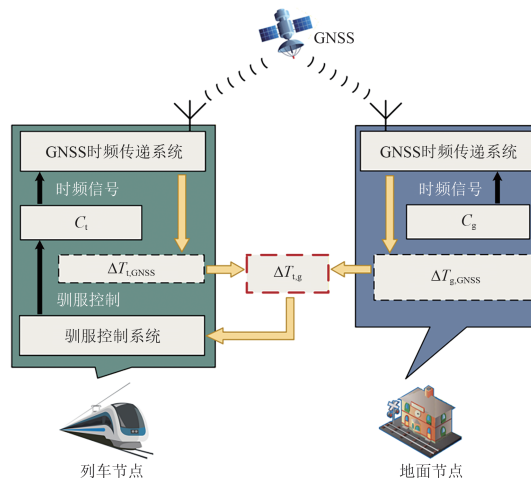


图1 基于GNSS的列车节点时频溯源与同步原理

1.1 时间频率传递

基于GNSS的时频传递法可分为共视法和全视法, 2种方法的本质为时频传递站双方在同一时段观测GNSS卫星并记录数据, 通过差分处理消除作为媒介的卫星系统时间影响, 从而实现站点间高精度时频传递。列车节点的 $\Delta T_{t, \text{GNSS}}$ 计算式为

$$\Delta T_{t, \text{GNSS}} = \frac{1}{c} \left(P - \|\vec{x}_{\text{rec}} - \vec{x}_{\text{sat}}\| - \delta_{\text{tropo}} - \delta_{\text{iono}} \right) - T_{\text{GD}} + T_{\text{sat}} + \delta_{\text{rel}} \quad (1)$$

式中: c 为光速; P 为补偿硬件延迟的列车节点GNSS伪距观测值; $\vec{x}_{\text{rec}}$ 和 $\vec{x}_{\text{sat}}$ 分别为列车节点坐标矢量和卫星坐标矢量; δ_{tropo} 和 δ_{iono} 分别为卫星至列车节点视线矢量上的对流层效应修正值和电离层效应修正值; T_{GD} 为卫星广播群延迟; T_{sat} 为卫星钟差; δ_{rel} 为相对论效应修正值。

各参数的获取方式为: P 和 $\vec{x}_{\text{rec}}$ 分别由GNSS时频传递系统测量和计算获得; $\vec{x}_{\text{sat}}$ 基于广播星历提供的卫星轨道参数计算; δ_{tropo} 和 δ_{iono} 可通过文献 [13—16] 提出的模型计算, 若列车节点具备双频观测能力, 可通过不同频率观测值的线性组合, 获

得电离层效应修正值； T_{GD} 可从广播星历获取； T_{sat} 通过二次项式计算，相关卫星钟偏差系数、钟漂移系数和钟漂移率系数取自广播星历； δ_{rel} 可通过广播星历提供的卫星轨道偏心率、星轨道长半轴和轨道偏近点角计算。

地面节点的 $\Delta T_{\text{g,GNSS}}$ 计算方法与式(1)一致，仅需将式中列车端参数替换为地面节点对应参数，为避免冗余，此处不再重复列出。将 $\Delta T_{\text{t,GNSS}}$ 和 $\Delta T_{\text{g,GNSS}}$ 进行单差处理，可得 $\Delta T_{\text{t,g}}$ 为

$$\Delta T_{\text{t,g}} = \Delta T_{\text{t,GNSS}} - \Delta T_{\text{g,GNSS}} \quad (2)$$

进一步将上述原理推广至列车节点与列车节点之间，即可获得任意2列列车的时间传递结果。由于频率是时间的导出量，车地、车车间的频率传递结果可从时间传递结果导出。

1.2 列车时频源驯服控制

驯服控制是对本地自由运行时频源频相特性的精确调控与补偿，可实现参考源的远端同步复现与溯源，目的是使时频源与参考源保持零（或设定的）时间偏差^[17]。比例-积分-微分（Proportional-Integral-Derivative, PID）控制器是工业控制领域中1种最为经典的闭环控制器，其核心工作原理是根据目标值和实际输出值构成控制偏差，将偏差按比例、积分和微分线性组合构成控制量，反馈至被控对象输入端以修正输入偏差，使输出趋近于目标值。具体而言，比例调节环节能够成比例地、即时地响应控制系统的当前偏差信号，偏差一旦出现，立即产生直接控制作用以减小偏差；积分调节环节则主要致力于消除系统的稳态误差，通过对历史偏差的持续累积提供必要的修正力，其调节作用的强弱直接取决于积分系数，系数越大，积分作用越强，但过强易导致积分项饱和，引发控制系统的超调或振荡；微分调节环节可敏感地捕捉偏差信号变化速率与趋势，并在此偏差进一步扩大前，为系统引入1个有效的、具有预测性质的提前修正信号，其核心作用在于加快系统的整体响应速度，以缩短调节时间，改善动态性能。

在时频源驯服控制中，被控量为时频源的相位或频率，控制量被输入至时频精细调整装置。常用的时频精细调整装置（如相位微跃计）通过调整频率实现相位连续调整。因此，应用于时频源驯服的PID控制器，其控制偏差采用频率偏差表征。在 t_k 时刻，列车节点时频源 C_i 相较于地面节点时频源 C_g 的频率偏差 $f(t_k)$ 以及频率漂移率 $d(t_k)$ 分别为

$$f(t_k) = \frac{\Delta T_{\text{t,g}}(t_k) - \Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 1)}{\tau} \quad (3)$$

$$d(t_k) = \frac{\Delta T_{\text{t,g}}(t_k) - 2\Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 1) + \Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 2)}{\tau^2} \quad (4)$$

式中： $\Delta T_{\text{t,g}}(t_k)$ 、 $\Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 1)$ 和 $\Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 2)$ 分别为 t_k 、 $t_k - 1$ 和 $t_k - 2$ 时刻 C_i 相较 C_g 的时间偏差； τ 为时间偏差测量间隔。

PID控制器的控制量 $u(t_k)$ 为

$$u(t_k) = K_P f(t_k) + K_I (\Delta T_{\text{t,g}}(t_k) - \Delta T_{\text{t,g}}(t_k - 1)) + K_D d(t_k) \quad (5)$$

式中： K_P 、 K_I 和 K_D 分别为比例控制、积分控制和微分控制系数。

时频精密调整装置获取控制量 $u(t_k)$ 后，即可实现对 C_i 的频率调整。综上，列车节点时频源驯服控制流程如图2所示，经过循环调整，最终实现列车节点时频源与地面节点时频源同步。

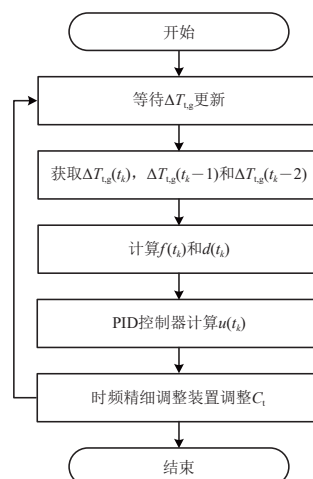


图2 列车节点时频源驯服控制流程

2 试验设置

试验于2025年8月8日—9日在中国国家铁道试验中心（东郊分院）环行铁道试验列车上进行。地面节点设于距试验中心约17 km的北京交通大学时间实验室，其运行的TS（BJTU）原子时标可精确溯源至中国原子时标计量基准UTC（NIM）。

试验场景与平台构成如图3所示，为构建列车节点与地面节点间时频传递链路（车地链路）、列车节点间的时率传递链路（车车链路），研制了2套列车时频溯源与同步装置 TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2。图中： C_{i1} 和 C_{i2} 分别为 TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2 的时频源； $\Delta T_{\text{t1,BDS}}$ 和

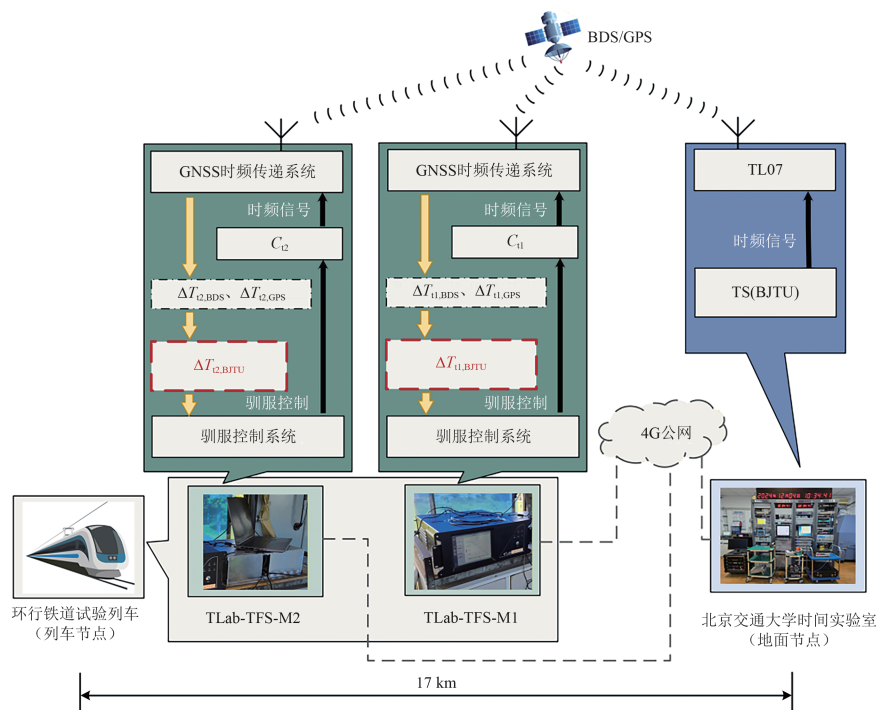


图3 试验场景与平台构成

$\Delta T_{t1, \text{GPS}}$ 为 C_{t1} 分别与 BDT 和 GPST 的偏差; $\Delta T_{t2, \text{BDS}}$ 和 $\Delta T_{t2, \text{GPS}}$ 为 C_{t2} 分别与 BDT 和 GPST 的偏差; $\Delta T_{t1, \text{BJTU}}$ 和 $\Delta T_{t2, \text{BJTU}}$ 分别为 C_{t1} 与 TS (BJTU)、 C_{t2} 与 TS (BJTU) 的时间偏差。GNSS 时频传递装置 TL07 以 TS (BJTU) 为参考, 观测 BDS/GPS 卫星并测量 TS (BJTU) 与 BDT/GPST 的时间偏差。该偏差通过 4G 公网发送至 TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2, 以实现 $\Delta T_{t1, \text{BJTU}}$ 和 $\Delta T_{t2, \text{BJTU}}$ 的解算, 进而通过驯服控制系统对时频源进行驯服控制。TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2 安装在同一列试验列车上, 基于 BDS B1I, BDS L3B (BDS B1I 和 B2I 信号的无电离层组合), GPS L1 C/A 和 GPS L3P (GPS L1P 和 L2P 信号的无电离层组合) 信号, 以 30 s 为间隔向地面节点溯源同步。基于后处理 TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2 数据, 模拟列车间的时间传递。

3 试验结果与分析

3.1 链路噪声

车地链路噪声引起的附加时间偏差可从时间传递结果提取, 并进行链路噪声水平评估。在列车节点与地面节点间构建另一条不确定度更低、性能更好的时频传递链路, 以消除列车节点时频源和地面节点时频源的差异, 提取链路噪声。其中, link1

为本文所提方法构建的车地链路; link2 为基于精密单点定位技术构建的性能更好的车地链路, 其 A 类不确定度评定可达 0.3 ns^[18-19]。基于上述链路, t_k 时刻由链路噪声引入的附加时间偏差 $T_{\text{noise}}(t_k)$ 为

$$T_{\text{noise}}(t_k) = T_{\text{link1}}(t_k) - T_{\text{link2}}(t_k) \quad (6)$$

式中: $T_{\text{link1}}(t_k)$ 和 $T_{\text{link2}}(t_k)$ 分别为 link1 和 link2 测得的 t_k 时刻列车节点与地面节点的时间偏差。

链路噪声水平可采用试验时长内 T_{noise} 的标准差表征, 车车链路噪声水平同理可基于上述方法进行评估。在环行铁道开展了 6 次列车节点向地面节点溯源同步试验, 车地链路噪声水平统计结果见表 1。进一步通过后处理获取 TLab-TFS-M1 与 TLab-TFS-M2 的比对结果, 以此模拟列车节点间的时间传递, 车车链路噪声水平统计结果见表 2。

表 1 车地链路噪声水平统计 ns

试验序号	BDS B1I	BDS L3B	GPS L1 C/A	GPS L3P
1	2.5	3.7	2.5	3.4
2	4.8	5.6	4.5	4.4
3	4.4	5.0	4.8	5.3
4	2.5	3.2	2.2	2.3
5	3.3	4.4	3.3	3.9
6	3.2	3.8	2.9	3.7

表 2 车车链路噪声水平统计 ns

试验序号	BDS B1I	BDS L3B	GPS L1 C/A	GPS L3P
7	79.0	4.6	5.1	4.3
8	161.0	4.9	6.6	5.4

链路噪声水平频数分布直方图如图4所示。由图4可知：车地链路噪声水平分布在2~6 ns；车车链路噪声水平分布在4~6 ns，略高于前者。与基于BDS B1I、GPS L1 C/A的单频时频传递链路相比，基于BDS L3B、GPS L3P的双频链路显示出

更高的噪声水平，这是由于双频观测为消除电离层延迟，需要对不同频率信号的观测值进行放大和组合，这个过程在消除一阶电离层效应的同时，放大了各信号的原始测量噪声。

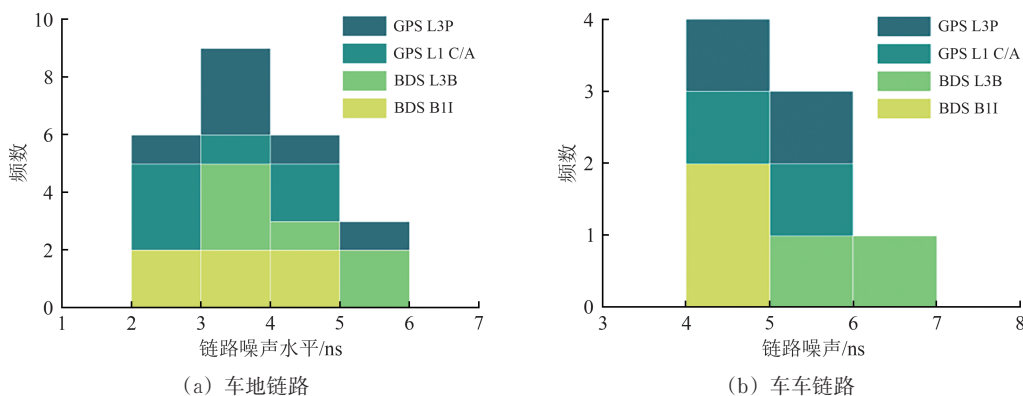


图4 链路噪声水平频数分布直方图

选择列车速度变化较明显的试验5和试验6数据分析列车速度对链路噪声的影响，2个试验的链路噪声和试验列车速度如图5所示。图中：上部分绘制了基于BDS B1I、BDS L3B、GPS L1 C/A和GPS L3P的附加时间偏差折线；下部分为试验列

车速度曲线，速度由伪距确定的坐标推导。由图5可知：不同速度工况下的附加时间偏差曲线抖动程度无明显差异，在试验5中，列车速度从约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升至约 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，再回落至约 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的过程中，各信号链路的附加时间偏差波动幅度基本保持

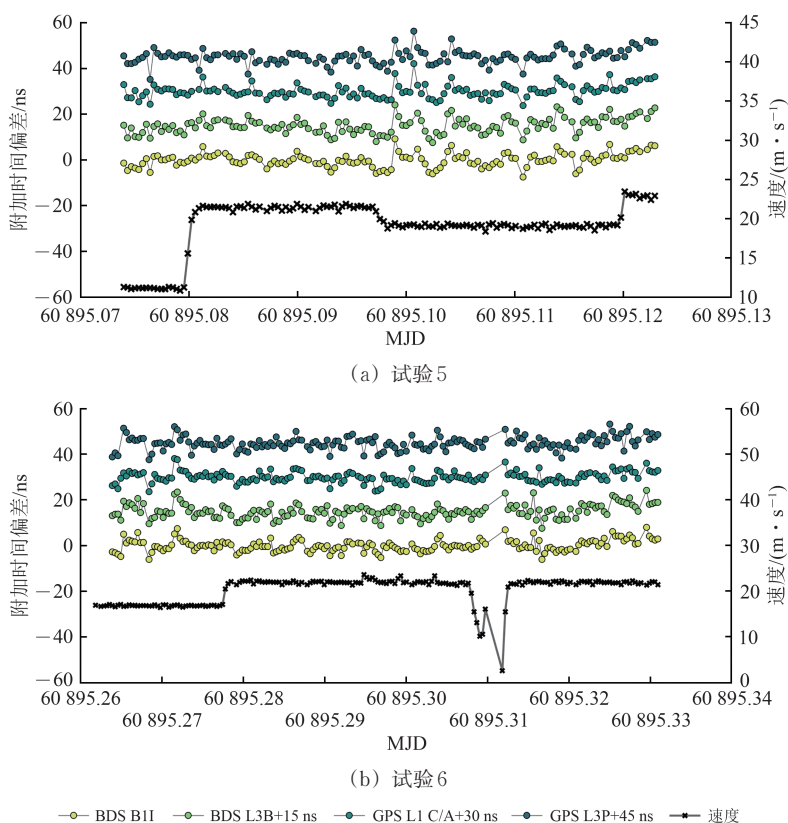


图5 链路噪声与列车速度对比

注：横轴时间采用修正儒略日 (Modified Julian Day, MJD)，又称简化儒略日，起点是1858年11月17日世界时0时。

稳定；在试验 6 中，速度由约 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升至约 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，偏差曲线的抖动特性也未发生显著变化。试验 6 的附加时间偏差曲线在 MJD 60 895.31 附近出现短暂中断，这是由于列车驶入隧道口区域，卫星信号被隧道遮挡，仅能接收到低仰角卫星信号或多路径反射信号，载噪比低至约 25 dB-Hz ，导致 link1 和 link2 临时中断。整体来看，不同列车速度下的附加时间偏差曲线抖动水平近似，表明车地时频传递链路噪声对列车速度变化不敏感。

3.2 时频传递不确定度

测量不确定度是根据所用的信息，表征被测量量值分散性的参数^[20]。既可表征测量结果的潜在误差范围，也可定量评判测量结果的质量。完整的测量结果，不仅需给出被测量的最佳估计值，还应同步给出测量结果的不确定度^[21]。为此，参考测量不确定度评定的一般流程，结合列车运行场景时频传递链路特点，对车地、车车时频传递的不确定度进行分析与评定。

基于 1.1 节阐述的原理，可分析时频传递不确定度来源包括：列车节点 GNSS 时频传递链路校准、地面节点 GNSS 时频传递链路校准、GNSS 时

频传递测量重复性、电离层和对流层效应补偿误差影响、列车节点线缆转接头延迟误差影响、地面节点线缆转接头延迟误差影响、卫星轨道误差影响、列车节点 GNSS 时频传递系统环境多径影响和地面节点 GNSS 时频传递系统环境多径影响。将以上 9 项来源引入的标准不确定度基于方差合成定理，即可获得合成标准不确定度。选取 1.20 ns 的差分校准不确定度，作为列车节点与地面节点 GNSS 时频传递链路各自的校准不确定度分量。GNSS 时频传递测量重复性通过车地链路噪声水平评定。电离层和对流层效应补偿误差、线缆转接头延迟误差、卫星轨道误差、接收机环境多径效应等不确定度分量，参考国家计量技术规范《JJF 1206—2018 时间与频率标准远程校准规范》^[22] 取值，依次为 2.10 ns （扩展因子 $k=1$ ）、 0.50 ns （扩展因子 $k=1$ ）、 0.47 ns （扩展因子 $k=\sqrt{3}$ ）和 0.40 ns （扩展因子 $k=\sqrt{3}$ ）。

列车节点与地面节点间时频传递不确定度评定分项见表 3。其中，GNSS 时频传递测量重复性取自 3.1 节评估所得车地链路噪声水平最大值，即 6 ns 。经计算，列车节点与地面节点间时频传递合成标准不确定度为 6.6 ns 。

表 3 列车与地面节点间时频传递不确定度评定分项

不确定度来源	评定方法	扩展不确定度/ns	扩展因子 k	标准不确定度/ns
GNSS 时频传递链路校准(列车节点)	B 类	1.20	1	1.20
GNSS 时频传递链路校准(地面节点)	B 类	1.20	1	1.20
GNSS 时频传递测量重复性	A 类	6.00	1	6.00
电离层和对流层效应补偿误差影响	B 类	2.10	1	2.10
线缆转接头延迟误差影响(列车节点)	B 类	0.50	1	0.50
线缆转接头延迟误差影响(地面节点)	B 类	0.50	1	0.50
卫星轨道误差影响	B 类	0.47	$\sqrt{3}$	0.27
GNSS 时频传递系统环境多径影响(列车节点)	B 类	0.40	$\sqrt{3}$	0.23
GNSS 时频传递系统环境多径影响(地面节点)	B 类	0.40	$\sqrt{3}$	0.23
合成标准不确定度				6.6

同理，可对列车间时频传递不确定度进行评定，其中，GNSS 时频传递测量重复性取自 3.1 节评估所得车车链路噪声水平最大值，即 7.0 ns 。经计算，列车间时频传递合成标准不确定度为 7.5 ns 。

3.3 列车时频源溯源同步时频特性

对驯服时频源同步性能的量化评估，需从相位与频率 2 个维度展开。前者通过时间偏差直接表征，即列车节点与地面节点的时间传递结果；后者则可由平均频率偏差来衡量，能够反映驯服控制系统对受控频率源的频率补偿效果。

图 6 和图 7 展示了 6 次溯源同步试验中，列车节点与地面节点的时间偏差及其平均频率偏差的统

计分布。由图 6 和图 7 可知：2 类偏差均呈现出以 0 为中心的类正态分布特征，表明驯服控制系统有效调控与补偿了车地节点时频源的系统时间偏差与固有频率偏差，实现了对地面节点时频源频相特性的锁定。

对各次试验中车地节点间时间偏差落在 $\pm 5\text{ ns}$ 与 $\pm 10\text{ ns}$ 范围内的数据点占比进行统计，结果见表 4。由表 4 可知，所有试验中偏差值在 $\pm 5\text{ ns}$ 和 $\pm 10\text{ ns}$ 范围内的数据点占比分别不低于 67.50% 和 90.43% 。该结果验证了驯服控制系统核心算法的正确性与闭环控制过程的有效性，可实现列车节点向地面节点的准确同步。

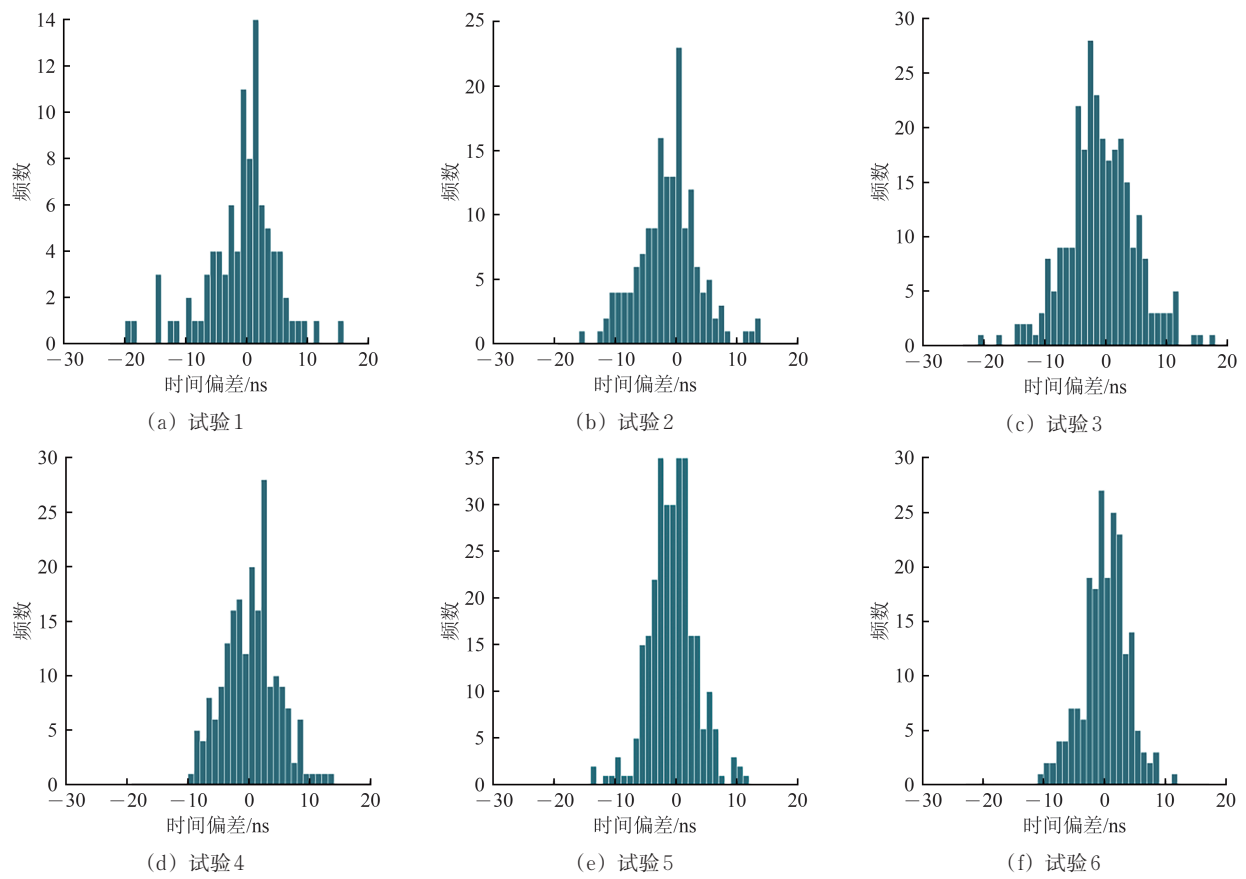


图6 各试验车地节点的时间偏差频数分布直方图

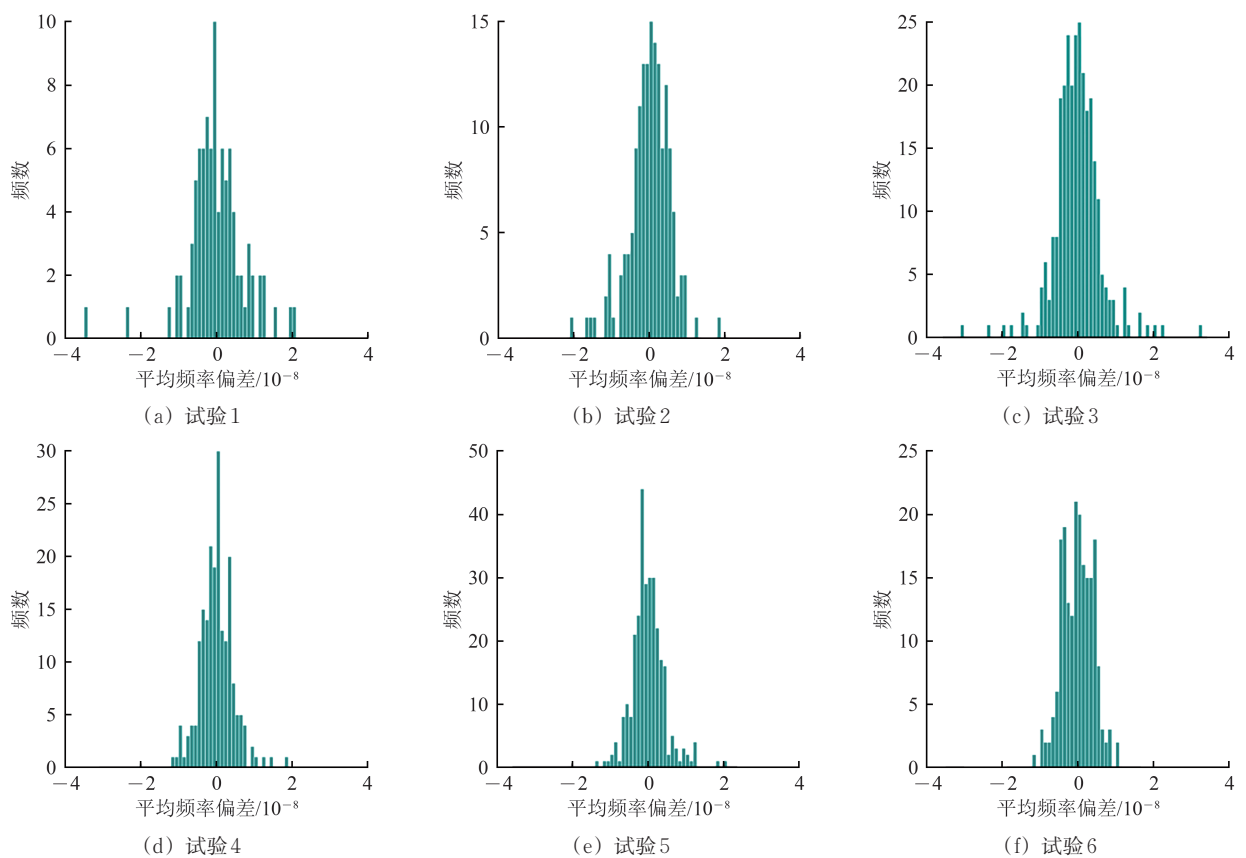


图7 各试验车地节点的平均频率偏差频数分布直方图

表 5 ±5 ns 和 ±10 ns 以内的时间偏差百分比统计 %		
试验序号	$ \Delta T_{i,g} \leq 5 \text{ ns}$	$ \Delta T_{i,g} \leq 10 \text{ ns}$
1	69.15	90.43
2	70.37	92.59
3	67.50	91.79
4	73.89	98.03
5	82.25	97.61
6	83.33	99.02

为进一步验证列车节点时频源受驯服控制的有效性和时频特性，对频率稳定度和时间稳定度进行分析。前者使用修正阿伦偏差（Modified Allan Deviation, MDEV）表征，后者使用时间偏差（Time Deviation, TDEV）表征。选取试验时长较长的试验 3 和试验 5 数据，对比 TLab-TFS-M1 和 TLab-TFS-M2 各自的时频源 C_{11} 和 C_{12} 在自由振荡状态和驯服控制（即向地面节点同步）状态下的频率稳定度与时间稳定度，结果如图 8 所示。自由振荡状态下的稳定度数据，由以 TS（BJTU）为参考的比相仪通过直接测量法测得；驯服控制状态下的数据，则通过本文所提方法测得。当平均时间较短时，MDEV 和 TDEV 曲线主要反映时频传递链路噪声，由于该方法的链路噪声水平高于比相仪直接测量法，因此 C_{11} 和 C_{12} 在驯服控制状态下的频率与时间稳定度在平均时间较短时表现略差于自由振荡状态。随着平均时间增大，链路噪声被平滑，时频源特性得以体现。由图 8 可知：驯服控制状态下 C_{11} 和 C_{12} 的时间与频率稳定度相比自由振荡情况下均有提升；平均时间为 1 000 s 时， C_{11} 频率与时间稳定度提升接近两个数量级， C_{12} 频率与时间稳定度改善约 2.3 倍。该结果进一步验证了本文所提方法可在列车节点以一定性能复现地面节点时频源特性，确保下级应用系统能够获取溯源至地面节点的时频量值。

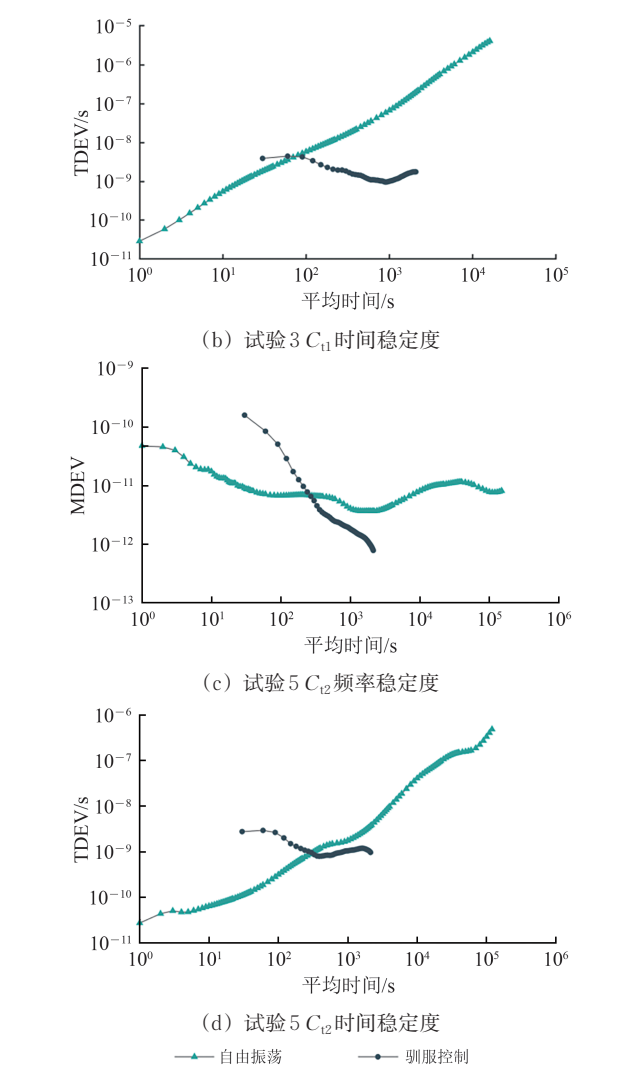
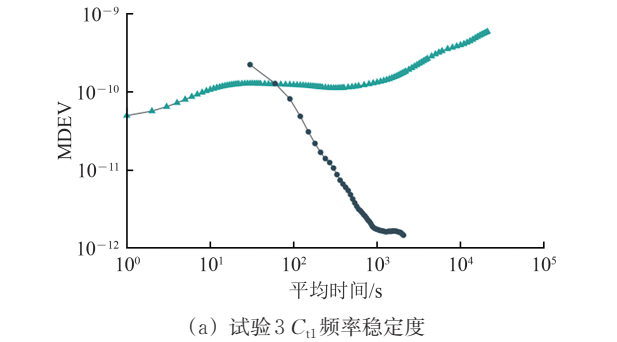


图 8 列车节点驯服控制前后的频率稳定度和时间稳定度

4 结 语

本文提出了 1 种基于 GNSS 的列车时频溯源与同步方法，构建了车地间高精度时频传递与溯源同步链路及车车间时频传递链路，实现了列车节点对地面节点的溯源同步与多列车节点间的时频传递。基于该方法，研制了列车时频溯源与同步装置，并开展列车时频传递与溯源一体化性能的首次评估。车地链路噪声水平分布在 2~6 ns，时频传递不确定度评定为 6.6 ns；车车链路噪声分布在 4~7 ns，时频传递不确定度评定为 7.5 ns。在超过 90% 的工况下，列车节点可实现偏差优于 ±10 ns 的地面节点时标复现；在超过 60% 的工况下，可实现偏差优于 ±5 ns 的复现，进而确保下级应用系统可获取溯源至地面时间同步网的时频量值。相比于列车节点时频源自由振荡状态，驯服控制后其时间与频

率稳定度均有提升,当平均时间为1 000 s时,时间与频率稳定度提升近2个数量级。

受限于试验场地严格管控及审批流程,未来将进一步开展更长时间、更长距离的性能评估与分析,同时将探索基于载波相位与北斗PPP-B2b服

务的更低不确定度时频传递方法,并研究融合卡尔曼滤波等先进估计方法与现有PID控制器的协同优化架构,以进一步提升方法在参数自适应、抗截断误差与动态扰动抑制等方面的性能。

参 考 文 献

- [1] 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. in Chinese)
- [2] 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.
(LIANG Kun, YU Tian, YANG Zhiqiang, et al. Research on Traceability and Synchronization Performance of Railway Time Synchronization Network [J]. China Railway, 2023 (8): 43-51. in Chinese)
- [3] 陆红群.关于铁路通信同步网发展的探讨[J].铁道通信信号,2012,48(8):54-58.
(LU Hongqun. Development Investigation of Railway Communication Network [J]. Railway Signalling & Communication, 2012, 48 (8): 54-58. in Chinese)
- [4] 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.
(YU Jialiang, CHENG Hua, YU Tianze, et al. A Study of BeiDou Satellite Time Synchronization: Application Research and Testing [J]. China Railway, 2013 (4): 18-21. in Chinese)
- [5] 于泽人,王欣立.列车以太网通信与时间敏感网络技术标准化探索[J].中国标准化,2021(13):147-150.
(YU Zeren, WANG Xinli. Research on Standardization of Train Ethernet Communication and Time Sensitive Network Technology [J]. China Standardization, 2021 (13): 147-150. in Chinese)
- [6] 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 Shunling, LI Changxian, ZHAO Ke. Research on Time Synchronization Optimization of Train Communication Network Based on PTP Protocol [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (18): 91-98. in Chinese)
- [7] 张旭,马可.基于时间敏感网络的列车以太网通信技术研究[J].铁道机车车辆,2022,42(3):93-98.
(ZHANG Xu, MA Ke. Research on Train Network Technology Based on Time-Sensitive Networking [J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42 (3): 93-98. in Chinese)
- [8] 李天娇.铁路时间同步网形式化建模及性能分析[D].兰州:兰州交通大学,2016.
(LI Tianjiao. Formalized Modeling and Performance Analysis of Railway Time Synchronization Network [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. in Chinese)
- [9] 郑继东.LKJ时间校准器的设计与实现[J].铁道通信信号,2013,49(2):22-23.
(ZHENG Jidong. Design and Implementation of an LKJ Time Calibrator [J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49 (2): 22-23. in Chinese)
- [10] 高旭.LKJ2000监控装置自动校正时间系统的设计开发[J].内蒙古科技与经济,2018(19):76-77,79.
(GAO Xu. Design and Development of an Automatic Time Correction System for the LKJ2000 Monitoring Equipment [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2018 (19): 76-77, 79. in Chinese)
- [11] 吴茜,王力.基于北斗授时技术的信号车载设备时钟同步方案探讨[J].铁道通信信号,2019,55(10):54-58.
(WU Qian, WANG Li. Discussion of Clock Synchronization Scheme of On-Board Equipment Based on BeiDou Time Service System [J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55 (10): 54-58. in Chinese)
- [12] 仇福林.列车运行监控装置自动校时策略优化研究[J].铁道通信信号,2022,58(12):24-27.
(QIU Fulin. Research on Optimization of Automatic Timing Strategy for LKJ [J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58 (12): 24-27. in Chinese)
- [13] SAASTAMOINEN J. Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites [M]// The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2013: 247-251.
- [14] HOPFIELD H S. The Effect of Tropospheric Refraction on the Doppler Shift of a Satellite Signal [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68 (18): 5157-5168.

- [15] KLOBUCHAR J A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23 (3): 325-331.
- [16] WANG N, LI Z, YUAN Y, et al. BeiDou Global Ionospheric Delay Correction Model (BDGIM): Performance Analysis during Different Levels of Solar Conditions [J]. GPS Solutions, 2021, 25 (3): 97.
- [17] CHADSEY H. Methodologies for Steering Clocks [C]// Proceedings of the 26th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting. Washington, D.C.: NASA, 1995: 361-368.
- [18] PETIT G. The TAIPPP Pilot Experiment [C]// 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum. New York: IEEE, 2009: 116-119.
- [19] JIANG Z, LEWANDOWSKI W. On the Measurement Quality of UTC Time Transfer [J]. BIPM Technical Memorandum, TM 200, 2011: 1-17.
- [20] 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. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2012.
- [21] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 第6版. 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2020: 4.
(NI Yucai. Practical Evaluation of Uncertainty in Measurement [M]. 6th ed. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd., 2020: 4. in Chinese)
- [22] 全国时间频率计量技术委员会. JJF 1206-2018 时间与频率标准远程校准规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
(National Technical Committee for Time and Frequency Metrology. JJF 1206-2018 Calibration Specification for Remote Calibration of Time and Frequency Standards [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2018. in Chinese)

A GNSS-Based Method for Train Time-Frequency Traceability and Synchronization with Performance Evaluation

XU Ning¹, WEI Baoying², HE Zhiyu¹, LIANG Kun²

(1. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To address the issues of inconsistent traceability for train time nodes and the isolation between train-to-ground and train-to-train time-frequency within the current railway time synchronization network, a method based on Global Navigation Satellite System (GNSS) for train time-frequency traceability and synchronization was proposed. By constructing high-precision time-frequency transfer and traceable synchronization links between train-to-ground and train-to-train nodes, the time-frequency transfer and traceable synchronization between train and ground nodes and among train nodes were realized. A dedicated device was developed, and the integrated performance of time-frequency transfer and traceability of the train was first evaluated based on the round testing railway line of the National Railway Testing Center. The results demonstrate that the noise level of time-frequency transfer link between train-to-ground is 2-6 ns, with an uncertainty of 6.6 ns. The noise level of time-frequency transfer link between train-to-train is 4-7 ns, with an uncertainty of 7.5 ns. In over 90% of cases, the train node can achieve high-precision reproduction for the time scale of the ground node with a difference of less than ± 10 ns. This method can provide reference and support for high-precision time-frequency transfer and traceable synchronization between train-to-ground and train-to-train nodes.

Key words: Railway time synchronization network; Train time node; Transfer and traceability; Round testing railway line; Global Navigation Satellite System (GNSS)

(责任编辑 杨婧婕)