

铁路时间同步网溯源 及同步性能研究

梁坤¹, 余油¹, 杨志强², 程华³, 何之煜⁴, 王子鉴¹, 王剑¹, 程进⁵

1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 中国计量科学研究院 时间频率计量科学研究所, 北京 100029;
3. 北京铁路通信技术中心, 北京 100038;
4. 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;
5. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 集成中心, 北京 100070)

摘要: 铁路时间同步网是为铁路各通信子系统提供精确时间的重要支撑系统, 其运行性能非常重要。针对铁路时间同步网及其3层固定结构以及移动列车时间同步节点, 分析铁路时间同步网4种不同的溯源参考, 并基于经过校准的全球导航卫星系统(GNSS)时间频率传递装置, 设计了铁路时间同步网溯源监测方法, 评估了铁路时间同步网中不同溯源源头可能造成的时间同步性能差异。针对铁路时间同步网现状, 测量分析其现有性能能否对未来5G-R提供有效支撑具有重要意义。

关键词: 铁路时间同步网; 授时; 同步性能; 溯源; GNSS; 5G-R

中图分类号: TB939; U285 文献标识码: A
DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2023.04.26.003

文章编号: 1001-683X(2023)08-0043-09

1 研究背景

“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个基本单位中最基础也

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900704、2021YFB3900701)

第一作者: 梁坤(1980—), 男, 教授, 博士。

E-mail: liangk@bjtu.edu.cn

通信作者: 王剑(1978—), 男, 教授, 博士。

E-mail: wangj@bjtu.edu.cn

是最重要的一个。其他基本单位大多通过链接到秒的复现来提升复现精度。各种卫星导航系统包括我国的北斗卫星导航系统(BDS)是高精度时间频率(简称时频)应用的典型范例, 正是由于高精度的时频, 才使定位精确到几十米、几米乃至几厘米成为可能。在科学发展史上, 时频测量准确度的每一次提高, 都会有难以预计的新现象被发现、新理论被证明。高精度时频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, 渗透到从基础研究领域到工程技术领域, 甚至于国计民生的诸多方面, 关系着国家社会

的安全稳定。在电力、通信、金融、公安、交通以及工业互联网等行业，用户对安全、稳定有非常高的要求，精准守时系统和时间同步网络尤为重要。

高精度时间同步对当前高速铁路专用5G移动通信系统（5G-R）等前沿技术的超前部署与战略支撑具有重要意义。目前，现有铁路时间同步网虽已初具规模，建成一、二级时间同步节点，但三级节点仍相对较少，新建铁路工程引接时间信号时尚未形成体系结构；二级与三级节点之间的联系未全部完成，网管功能不齐全；移动列车节点相较于地面同步网，车载设备接口尚未形成统一的标准。以上均使铁路时间同步网仍存在溯源参考不统一、高度依赖外部参考源、自主可控性不高等问题。

目前，铁路行业正在积极开展5G-R技术研究，申请5G-R专用频段。5G-R技术的各项业务时间同步需求与5G相同：基本业务有 μs 量级需求，要求每个基站无线空口输出相对于国际标准时间，即协调世界时（UTC）的绝对时间偏差满足 $\pm 1.5 \mu\text{s}$ 的限值^[1]，5G基站的带内非连续载波聚合和带间载波聚合的同步要求是 $3 \mu\text{s}$ ，带内连续载波聚合的同步要求是 260 ns ，多输入多输出（MIMO）技术的同步要求是 65 ns ^[2]。随着5G网络规模扩张，无人驾驶、无人物流、智能机器人等基于5G的垂直行业应用层出不穷，这些应用也对5G网络的超高精度时间同步提出了更高的指标要求。例如，北斗+5G的室内外一体时空融合位置服务，符合国家战略的未来产业发展方向，而时间同步是定位服务的基础，要满足米级的定位精度，基于5G的高精度定位业务对时间同步的要求甚至达到 $\pm 3 \text{ ns}$ 以内^[3]。随着5G-R的未来应用，这种超高精度的时间同步需求也需要由铁路系统自身来保证。所以，针对铁路时间同步网现状，测量分析其现有性能能否对未来5G-R发展提供有效支撑具有重要意义。

2 铁路时间同步网溯源现状分析

铁路时间同步网为铁路各子系统提供精准、统一的时间信号，保障系统稳定、可靠运行，是铁路运行保障的核心支撑系统，包括一级、二级、三级地面时间同步节点设备，移动列车时间同步节点和时间同步

链路（见图1）。一级时间节点设置在中国国家铁路集团有限公司（简称国铁集团）调度中心，二级时间节点设置在各铁路局集团公司调度所，三级时间节点设置在各车站、段、所等处。三级地面时间同步节点间时间同步信号的传送采用主从方式，一级时间节点从北斗或全球卫星定位系统（GPS）单向授时接收机获取时间信号，二级时间节点通过地面定时链路从一级时间节点或本地单向授时接收机获取时间信号，三级时间节点通过地面授时链路从二级时间节点获取时间信号。对于移动列车时间同步节点，列车内各时间同步设备相对独立，时间与频率同步基准源依赖于全球导航卫星系统（GNSS）授时。

目前，铁路时间同步网领域的很多学者和技术管理者都进行了研究和调查：文献[4]最早概述了铁路时间同步网的3层架构以及时间信号在其中的传递方式；文献[5-6]对铁路时间同步运用的现状及存在问题进行分析，针对性地提出基于网络授时协议（NTP）与北斗授时等技术的铁路时间同步网优化和组网融合方案。2015年，国家铁路局颁布实施TB/T 3283—2015《铁路时间同步网技术条件》^[7]，详细说明了铁路时间同步网架构及功能，规定了铁路其他专业应用系统的接引方式与各层节点时间准确度、稳定度等参数。此后，文献[8]对铁路时间同步网时间传递链路及节点性能展开研究，探讨了适用于铁路地面信号系统的时间同步方案，提出了同步节点建模与性能分析手段。

国外有关铁路时间同步的研究文献较少，比较有代表性的内容有文献[9]中提出的应答器子系统时间同步方案，以及文献[10]中提出的基于多级以太网组成网络（ECN）的多列车精确时间同步协议与性能评估。

时间溯源参考为铁路时间同步网的重要内容，文献[11]针对铁路时间同步网缺少统一溯源等问题，提出了铁路时间同步网优化组网方案；文献[12]深入分析了基于BDS的同步网和基于GPS的同步网性能，比较了2个不同卫星信号溯源参考的差异；文献[13]从同步网现状及铁路通信信号时频同步需求入手，对未来5G-R业务同步需求进行了分析，探讨了铁路时间同步架构对5G-R技术的支撑作用；文献[14]针对时

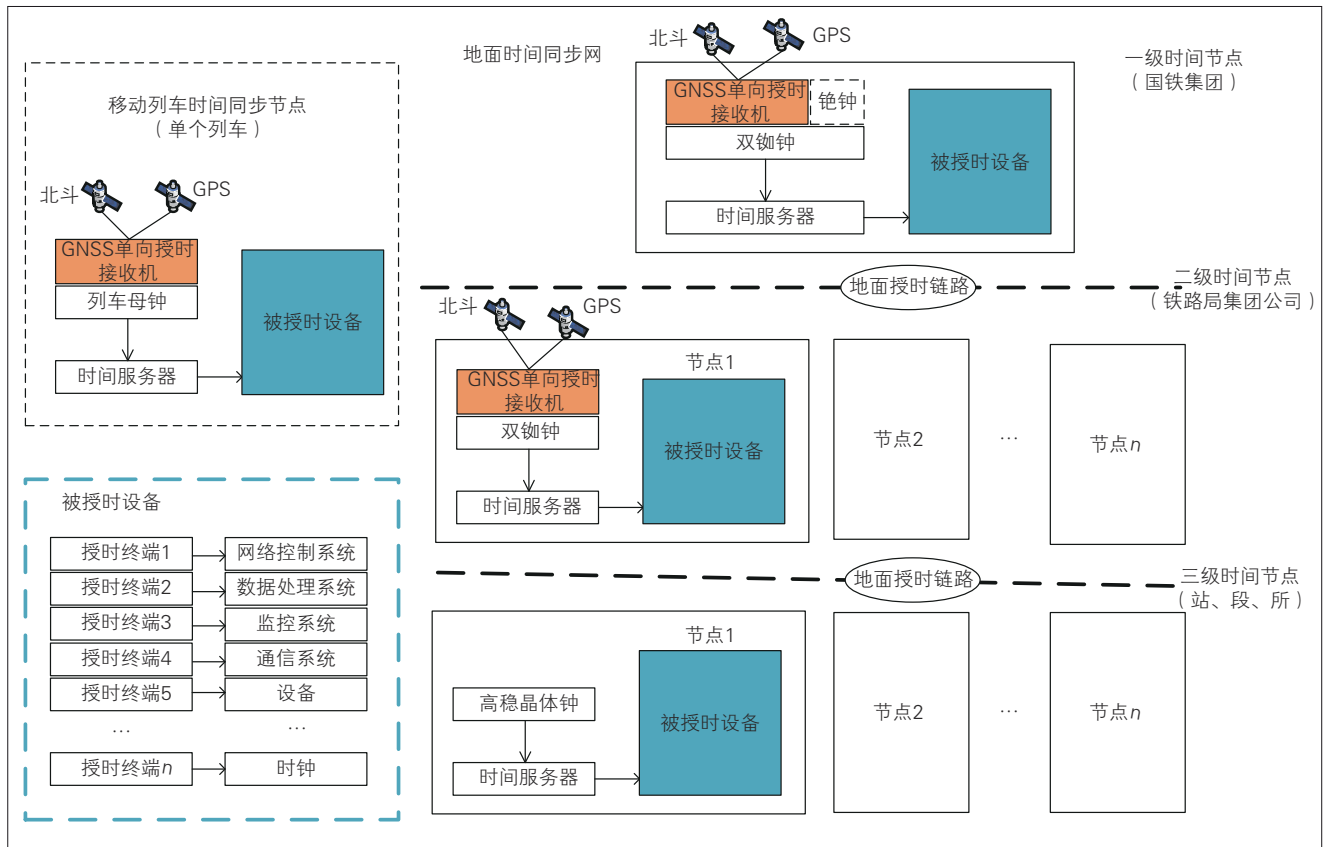


图1 铁路时间同步网

间同步网溯源方式单一、在线监测手段欠缺等主要问题，针对改变既有时频信号溯源方式等方面提出建议。

铁路时间同步网按照TB/T 3283—2015《铁路时间同步网技术条件》建设，其最高层级时间同步节点在标准中规定与UTC的偏差在±150 ns以内。同步网建设虽已初具规模，但尚未在国家法律法规层面对铁路相关标准时间的复现、保存、发播、重要领域的使用等方面做出全面清晰的规定。同时，铁路时频相关专业应用系统的时间一致性无法保证，主要体现在很多专业应用系统并不具备时间同步功能，系统时间的准确度仅依靠内部石英晶体等器件的粗守时和维护管理人员定期校时；大部分专业应用系统仍处于相互孤立的简单运用，尚未形成整体的、彼此间的时间同步；不同的专业应用系统对时间同步信号的处理性能及处理方法等均可能存在较大差异，时间同步信号传递机制、方法也存在较大差异，都令各自下级系统实际采用的标准时间有所差异，甚至会有几秒的偏差。部分专业应用系统守时功能薄弱，高度依赖外部参考源，

同时选择的外部时间参考源非自主可控，使铁路时间同步网存在一定安全风险。在此，主要针对铁路时间同步网的时间源头进行讨论，研究分析时间同步节点时间溯源参考不一致性可能造成的时间同步性能差异。

时间溯源参考不一致性是上述现象的潜在重要诱因。铁路时间同步网溯源示意图2，铁路时间同步网中，第1层级时间同步节点优先通过BDS或GPS单向授时接收机同步至GNSS预测的UTC时间UTC(GNSS)或GNSS系统时间GNSST；第2层级时间同步节点溯源至地面一级节点，同时也可从GNSS获取时间，以满足不同业务系统的授时精度需求；第3层级只同步至第2层级时间同步节点时间。因此，各级时间同步节点的同步参考源有多种可能，即GPS系统预测的UTC时间UTC(GPS)、BDS系统预测的UTC时间UTC(BDS)、GPS系统时间GPST、BDS系统时间BDT及二级时间同步节点（相对于三级节点）时间，将间接导致时间同步节点的性能差异。其中，二级时间同步节点从GNSS

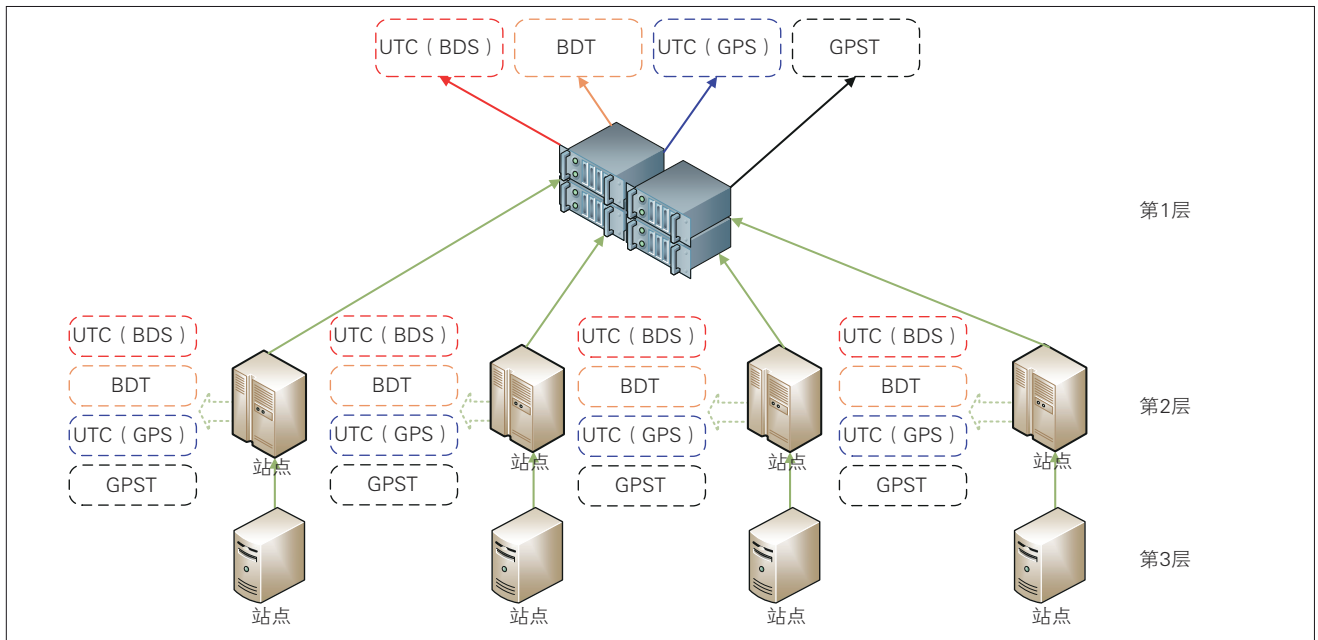


图2 铁路时间同步网溯源示意图

获取时间时通常同步于前述GNSS系统产生的4种时间。综上，评估并监测铁路时间同步网节点不同时间溯源参考之间的偏差非常必要。

3 铁路时间同步网溯源偏差估计方法

为对时间同步参考源间的偏差进行评估，主要对一级和二级时间同步节点的时间溯源参考即UTC(GPS)、UTC(BDS)、GPST和BDT间的偏差进行监测。

3.1 GNSS时频传递接收机及其硬件延迟校准

GNSS时频传递接收机是基于全/共视的专业用于时频精密比对和传递的GNSS接收机，同时具备通常的GNSS单向授时功能。通过GNSS多系统时频传递接收机对GNSS系统时间、UTC(GNSS)进行测量，以达到偏差评估的目的。

GNSS时频传递接收机在使用前需对接收机的硬件延迟进行精密测量并补偿，该延迟通常从几ns到几百ns不等，所以在硬件延迟未知情况下无法实现精准的时间传递或授时，偏差最大可以达到数百ns。GNSS时频传递接收机硬件延迟的测量及补偿通常称为接收机内延迟校准，主要方法分为绝对校准和差分校准。

绝对校准主要通过GNSS信号模拟器模拟产生标准场景信号，使用设定的卫星信号与大气延迟参数构建标准模拟测试场景，对接收机硬件延迟进行校准。由

于该方法需要发射模拟产生的GNSS信号或对天线进行校准，为避免杂波干扰，需在暗室屏蔽环境下完成(见图3)，总体技术复杂度偏高，需要较复杂的环境设置和多台复杂设备之间的配合。同时，该方法从细节上又分为天线和接收机主机同时进行校准的整体绝对校准方法，以及天线和接收机主机分别校准的分步绝对校准方法。

差分校准则是利用至少1台已经被校准过内部硬件延迟的参考GNSS时频传递接收机，与被校准接收机进行共钟差实验，通过零时间偏差原则，解算得到被校准接收机的内部硬件延迟测量值(见图4)。该方法的前提条件是已有1台内部硬件延迟经过校准的GNSS时频传递接收机。

2种校准方法的不确定度均为1~2 ns^[15-16]。绝对校准方法尤其是整体绝对校准方法的校准不确定度控制得更好，可优于1 ns；差分校准方法则是国际原子时合作组织或某一时频比对活动中通常会采用的方法，利用1台已知内部硬件延迟量值的传递标准接收机逐一访问被校准接收机所在地，进行差分校准操作，即可完成对多台接收机的校准，而绝对校准方法在这种情况下难以开展实施。通常，在利用绝对校准方法得到第1台参考GNSS时频传递接收机的内部硬件延迟校准值后，利用差分校准方法进行移动的大范围校准，是2种方法融

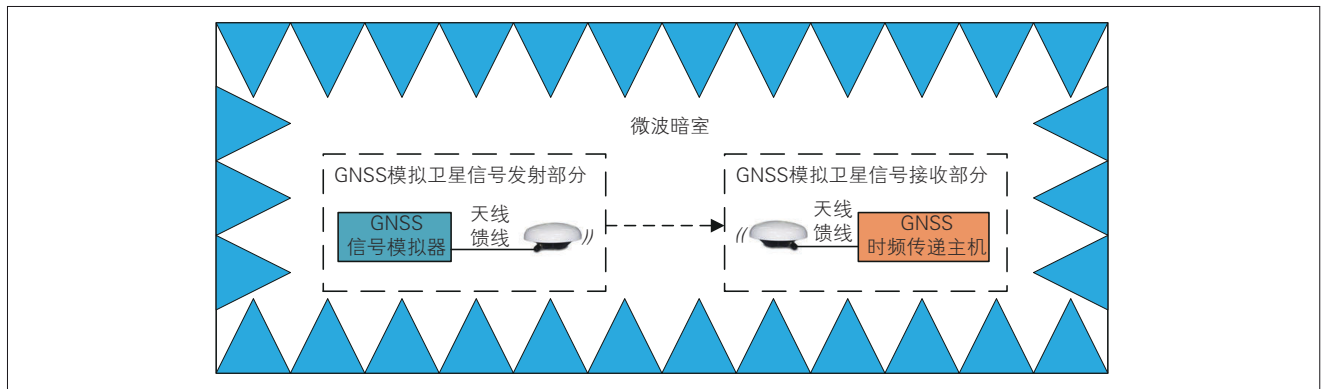


图3 GNSS时频传递接收机绝对校准示意图

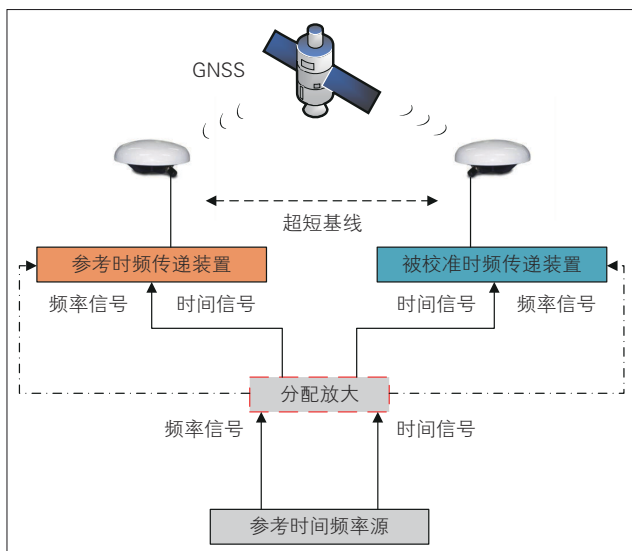


图4 GNSS时频传递接收机差分校准示意图

合使用的理想模式，可覆盖多场景下的校准要求。

3.2 溯源参考时差监测

为实现GNSS系统时间监测评估，需使用GNSS时频传递接收机链接到1个可溯源至UTC的原子时标作为参考（见图5），此处选择BJ01接收机链接到北京交通大学时间实验室自主生成的标准时间TS(BJTU)，由于BJ01硬件时延已通过差分校准的方法进行了精密测量和补偿，故利用上述提到的频点进行测量时，可以得到精确的TS(BJTU)–GPST和TS(BJTU)–BDT的测量值，通过式（1）进行单差处理，即可得到GPST–BDT的偏差结果：

$GPST - BDT = TS(BJTU) - GPST - (TS(BJTU) - BDT)$ ，(1)
 式中：GPST及BDT分别为GPS及北斗系统时间；TS(BJTU)为由北京交通大学时间实验室自主生成的标

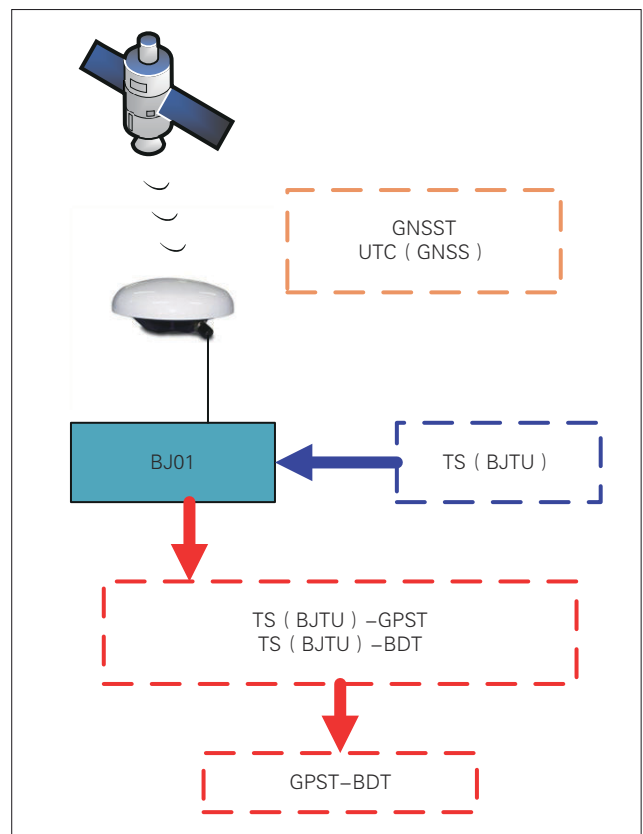


图5 GNSS系统间时间偏差监测原理

准时间。

通过单站监测，基于导航信息、GPST和BDT，可对UTC(GPS)和UTC(BDS)进行预测，可获得GPS DUTC(GPST–UTC(GPS))和BDS DUTC(BDT–UTC(BDS))2个量的测量值，进而通过式（2）可分别得到TS(BJTU)–UTC(GPS)和TS(BJTU)–UTC(BDS)，通过式（3）单差处理即可得到UTC(GPS)与UTC(BDS)的偏差结果：

$$TS(BJTU) - UTC_i(GNSS) = (TS(BJTU) - GNSST_i) + GNS_DUTC_i, \quad (2)$$

$$UTC(GPS) - UTC(BDS) = TS(BJTU) - UTC(GPS) - (TS(BJTU) - UTC(BDS)), \quad (3)$$

式中： $GNSST_i$ 为不同GNSS的系统时间； $UTC_i(GNSS)$ 为不同GNSS系统基于导航信息预测的UTC时间； GNS_DUTC_i 为不同GNSS的系统时间与其所预测UTC时间之差。

基于以上数据，便可得到4种溯源参考同时与TS(BJTU)的时差变化趋势。同时，BJ01与中国计量科学研究院保持的原子时标国家计量基准UTC(NIM)通过GNSS时间传递链路进行了比对，可以得到其参考时标TS(BJTU)与UTC(NIM)的比对结果。另外，通过参与国际时频唯一关键比对CCTF-K001.UTC（即国际原子时合作），守时实验室可以获得其保持的UTC(k)与UTC的溯源结果，每月由国际计量局(BIPM)发布在月际公报Circular T上，因此也可监测TS(BJTU)、GPST、BDT、UTC(GPS)和UTC(BDS)分别与UTC的时间偏差。

4 铁路时间同步网溯源偏差估计结果

4.1 GNSS时频传递接收机及其硬件延迟校准结果

根据目标，使用自主研发的时频传递接收机BJ01进行相关时差的精密测量。对BJ01接收机中的GPS L1 C/A、L1P和L2P，BDS B1I和B2I五个单频点，以及L3P和L3B两个双频组合的内部硬件延迟进行测量并补偿，得到其内部硬件延迟校准值见表1，合成标准不确定度为1.5 ns。

表1 基于差分校准的BJ01内部硬件延迟校准值

频点	校准值/ns	不确定度/ns
L1C/A	23.7	1.5
L1P	21.3	
L2P	18.9	
L3P	25.2	
B1I	19.8	
B2I	20.1	
L3B	19.4	

4.2 溯源参考时差监测结果

GPST-BDT 偏差监测结果为5~35 ns（见图6）。

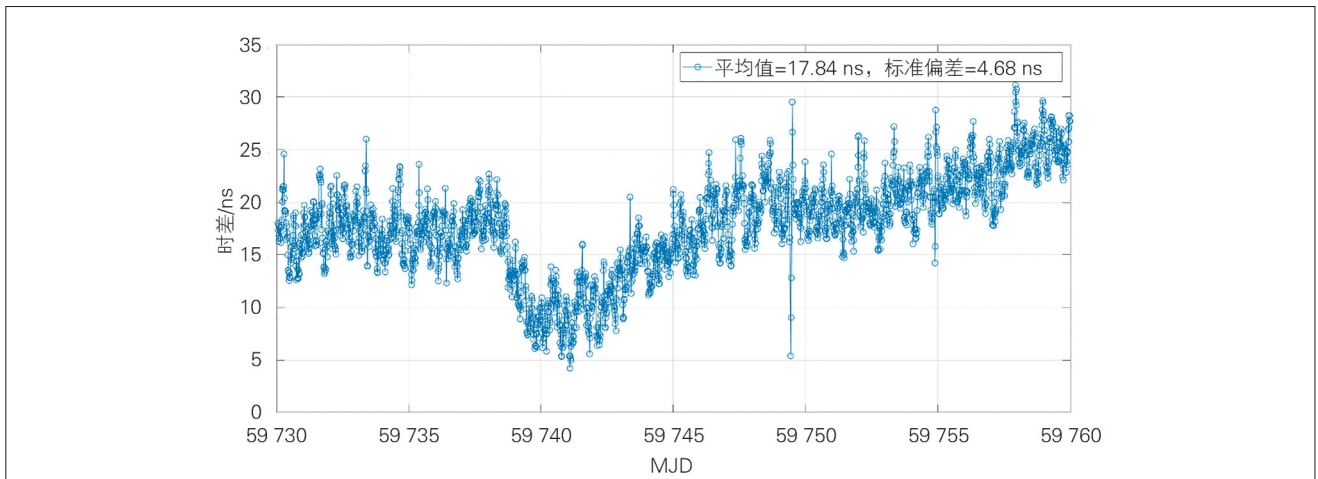


图6 GPST-BDT偏差监测结果

UTC(GPS)和UTC(BDS)的偏差监测结果为0~45 ns（见图7）。4种溯源参考在同一时段与TS(BJTU)的偏差结果见图8。

GPST、BDT、UTC(GPS)、UTC(BDS)分别与TS(BJTU)和UTC的时间偏差监测结果见图9，分别保持在2、5、25、10、35 ns之内的水平，为方便查看，部分曲线进行了一定程度平移。

可以看出，图8和图9中的GPST、BDT、UTC(GPS)、UTC(BDS)与TS(BJTU)和UTC的偏差峰峰值都保持在±45 ns范围内。也就是说，仅在时间同步源头部分，即溯源参考部分，铁路时间同步网各节点间就可能造成数十ns的误差，则即使在同步网中其他部分不存在任何误差的前提下，铁路时间同步网也不能满足铁路系统中优于几十ns的应用要求，其性能有待新方

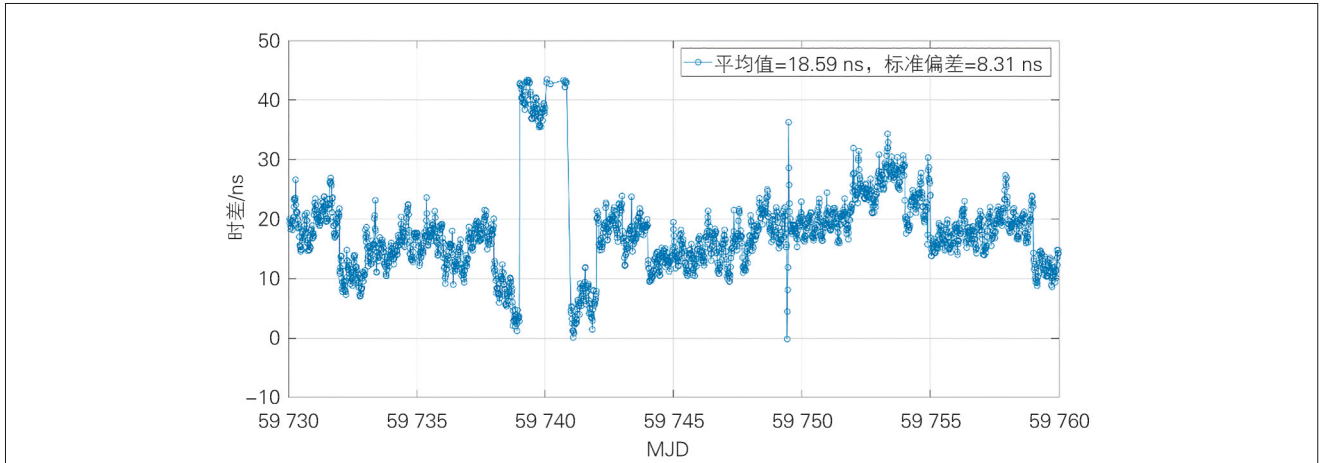


图7 UTC(GPS)-UTC(BDS)偏差监测结果

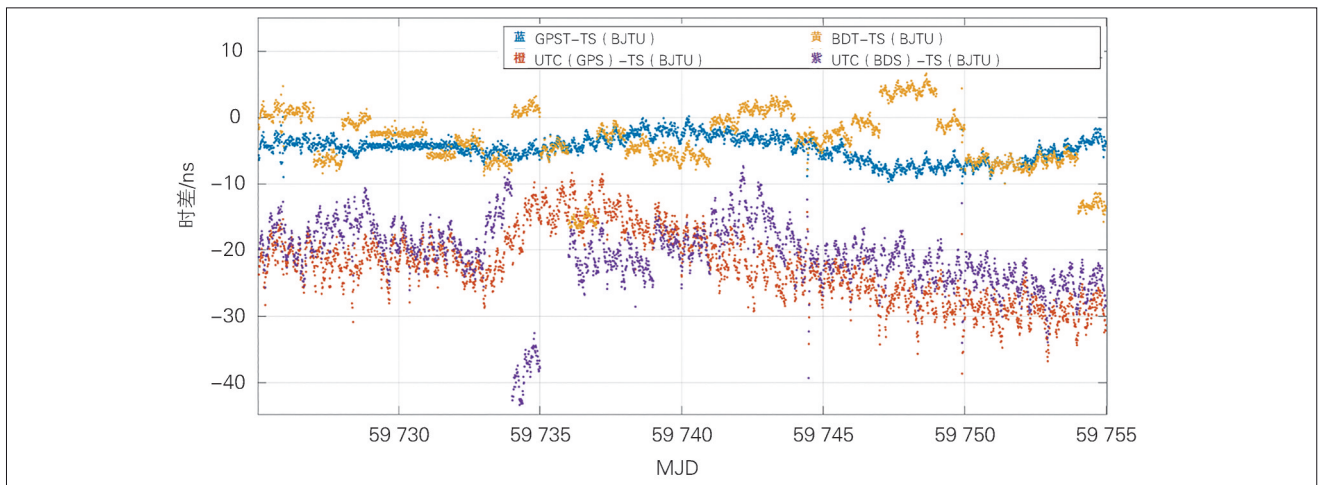


图8 4个溯源参考与TS(BJTU)的对比时差

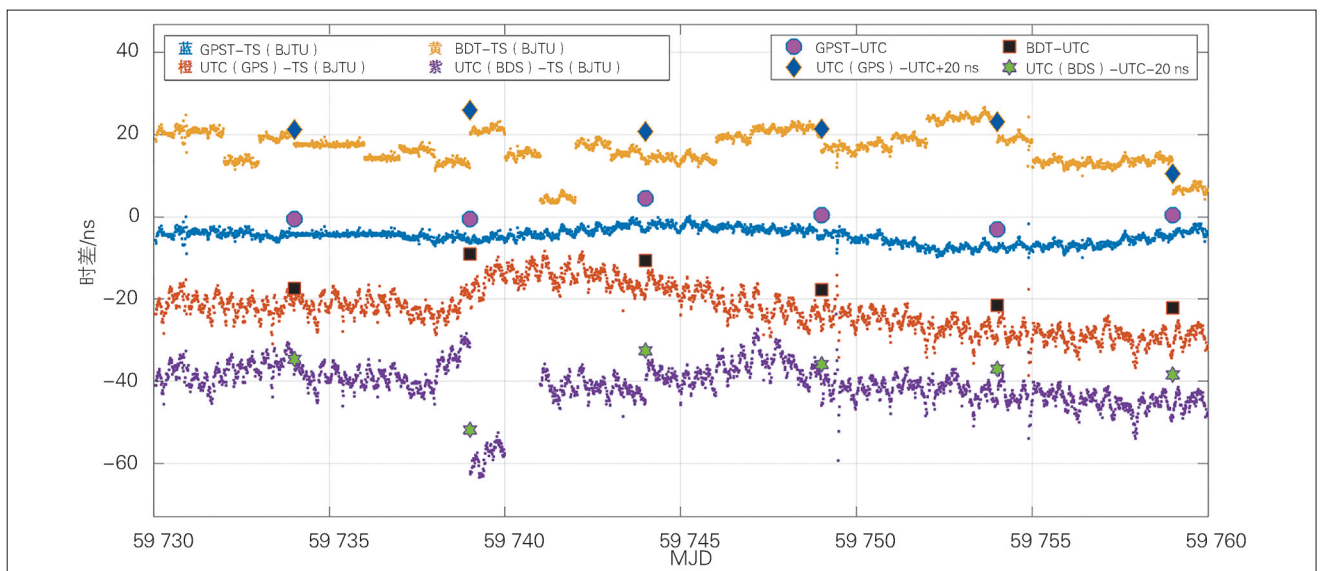


图9 4个溯源参考分别与TS(BJTU)及UTC的偏差

法和设备带来提升。

同时可以看出,图8和图9中的GPST、BDT、UTC(GPS)、UTC(BDS)与UTC和TS(BJTU)的偏差曲线趋势及偏置值基本吻合,这也证明了TS(BJTU)的稳定性,因此可直接基于TS(BJTU)对铁路时间同步网的4种溯源参考及类似时标进行及时监测。

5 结论

由于铁路时间同步网中第1、第2级时间同步节点和移动列车时间同步节点独立同步到GNSS系统时间,或者经由GNSS系统时间同步到其预测的UTC(GNSS),各时间同步的溯源参考并不一致,根据我国铁路时间同步网的硬件配置情况,这些溯源参考有可能是BDT、GPST、UTC(BDS)或UTC(GPS)。溯源参考中GNSS预测的UTC时间并非协调世界时UTC,基于经过精确内部硬件延迟校准的GNSS时间监测接收机进一步实验评估,可以看出在监测时段内GNSS预测的UTC时间与实际UTC之间仍存在45 ns以内的偏差。同时,实验结果表明:不同时间溯源参考间的偏差大致分布在几ns至几十ns范围内,导致铁路时间同步从源头上就可能出现一定偏差。

以上结论是基于GNSS时频传递接收机经过精确内部硬件延迟测量和补偿后得出的,否则,偏差还会扩大几ns至几百ns,且由于当前铁路时间同步网大量采用GNSS单向授时技术,对GNSS单向授时接收设备实施硬件延迟测量和补偿非常必要。校准方法主要分为绝对校准和差分校准,分别适用于不同场景,融合使用时不确定度为1~2 ns。此外,针对溯源参考不同导致的偏差问题,可在节点增加GNSS全/共视时间传递技术装置进行实时监测,同时,未来期望引入基于多节点的虚拟溯源参考时标技术,使网内各时间同步节点统一溯源至由铁路地面及移动列车节点时钟通过融合算法生成的综合原子时,为铁路时间同步网提供高可靠性、高准确性、长期稳定的统一时间尺度。

参考文献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路5G专用移动通信(5G-R)系统总体技术要求(暂行): TJ/DW 246—2022[A]. 北京, 2022.
- [2] IMT-2020(5G)推进组. 5G同步组网架构及关键技

术白皮书[R]. 北京, 2019.

- [3] 中国通信标准化协会. 用于定位的纳秒级同步技术要求 and 测试方法: 报批稿[A]. 北京, 2023.
- [4] 曲博. 铁路时间同步网概述[J]. 铁路通信信号工程技术, 2010, 7(4): 43-45.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路时间同步网技术条件: TB/T 3283—2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [8] 张友鹏, 李天娇, 王锋, 等. 基于SPN的铁路时间同步网建模与性能分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(10): 55-61.
- [9] KURZ T, HORNSTEIN R, SCHWEINZER H, et al. Time synchronization in the eurobalise subsystem[C]// 2007 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. IEEE, 2007.
- [10] PARK P, LEE J, YOON J. Performance evaluation of a precise time synchronization technology for trains[C]// 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure. 2019.
- [11] 程华. 铁路时间同步网优化组网方案研究[J]. 电信网技术, 2016(7): 7-11.
- [12] 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.
- [13] 滕蕾. 铁路时间同步架构对5G-R的支撑[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(9): 48-51, 57.
- [14] 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.
- [15] 梁坤, 张爱敏, 杨志强, 等. 时间传递链路校准技术研究[J]. 计量学报, 2015, 36(6A): 100-103.
- [16] PROIA A, CIBIEL G, WHITE J, et al. Absolute calibration of GNSS time transfer systems: NRL and CNES techniques comparison[C]// 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings. IEEE, 2011.

责任编辑 卢敏

收稿日期 2023-04-26

Research on Traceability and Synchronization Performance of Railway Time Synchronization Network

LIANG Kun¹, YU Tian¹, YANG Zhiqiang², CHENG Hua³, HE Zhiyu⁴, WANG Zijian¹, WANG Jian¹, CHENG Jin⁵

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Division of Time and Frequency Metrology, National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China;

3. Beijing Railway Communication Technology Center, Beijing 100038, China;

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

5. Integration Center, CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Railway time synchronization network is an important supporting system to provide accurate time for each railway communication subsystem, and it is important to ensure its operation performance. For the railway time synchronization network and its 3-layer fixed structure as well as time synchronization nodes of moving trains, four different traceability references of the railway time synchronization network are analyzed. Based on the calibrated Global Navigation Satellite System (GNSS) time-frequency transfer device, a traceability monitoring method for the railway time synchronization network is designed to evaluate the possible differences in time synchronization performance caused by different traceability sources in the railway time synchronization network. In view of the current situation of railway time synchronization network, it is significant to measure and analyze whether its current performance can effectively support 5G-R in the future.

Keywords: railway time synchronization network; time service; synchronization performance; traceability; GNSS; 5G-R

轨道交通专业知识服务系统 (暨铁科院数字图书馆)

www.rail-info.com

铁科院信息所数据中心是**全路的科技文献中心**，经过其潜心准备和精良打磨的——轨道交通专业知识服务系统（暨铁科院数字图书馆）已正式上线，该系统于2019年被纳入中国工程科技知识中心支持项目，成为我国**轨道交通领域的高水平知识服务系统**。

- 涵盖中文期刊元数据**1.5**万种
- 涵盖外文期刊近**1.9**万种，其中轨道交通行业相关期刊**1000**余种并对其中**400**多种期刊实现中英文机器对照翻译
- 涵盖轨道交通行业内部刊物**56**种
- 涵盖中文科技图书**2**万本
- 涵盖欧洲结构标准库、铁路行业标准库、UIC、EN等标准资源
- 涵盖自1985年以来世界铁路科技动态20万条、目前月更新近150条
- 涵盖国内外铁路资讯网站近100个，轨道交通行业微信公众号30多个
- 涵盖铁道学会科技奖励数据库
- 涵盖国外专业报告或题名目录库1万册
- 涵盖铁路专业视频**2000**多部
- 涵盖世界铁路专利数据54万条





科学技术信息研究所 数据中心

联系人：阎海燕 010-51893504 郭肖肖 010-51849732

广告