铁路时间同步网NTP授时服务监测技术

王子鉴[1]， 梁坤[1]， 赵俊良[1]， 王剑[1]， 陈龙泉[2]， 仲崇霞[3]

（1. 北京交通大学 自动化与智能学院，北京 100044；
2. 中国信息通信研究院，北京 100191；
3. 北京市计量检测科学研究院，北京 100029）

摘 要：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，通过对其进行实时监测，可及时发现潜在问题，减少运行风险。为进一步提升铁路时间同步网监测能力，解决无法准确获取时间节点相对于协调世界时（UTC）的可信时间偏差问题，针对网络时间协议（NTP）服务器的可溯源高精度监测技术开展研究，对监测过程中的影响要素进行分析，研制可溯源监测装置TLab-NM-001，构建能够获取NTP服务器相对于UTC时间偏差的监测系统，搭建验证平台对该监测方法的有效性进行验证。结果表明，该方法时差监测结果优于10 μs，远高于现行标准所提性能指标，且监测不确定度优于25 μs。研究成果可有效提升铁路时间同步网的监测能力，为增强铁路系统的可靠性与高效性提供技术支撑。

关键词：时间同步；铁路时间同步网；网络时间协议；监测；溯源；协调世界时

中图分类号：TB939；U285 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-683X（2025）02-0119-09
DOI：10.19549/j.issn.1001-683x.2024.06.07.011

0 引言

铁路作为国民经济的大动脉，其正常、安全、高效的运营至关重要。随着我国铁路的高速发展，时间同步在铁路系统中的重要性愈加凸显。准确的时间同步不仅可确保各系统间的协调一致，还直接影响列车调度、安全监控、信号系统等关键环节的可靠性和运行效率。2015年，国家铁路局发布TB/T 3283—2015《铁路时间同步网技术条件》[1]，对铁路时间同步网的网络架构、时间节点功能及性能进行规范，并详细规定了不同应用场景下，时间节点设备输出各种时间信号相对于协调世界时（Coordinated Universal Time，UTC）所需满足的指标要求。

基金项目：国家自然科学基金项目（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：王子鉴（1999—），男，硕士研究生。
E-mail：w5216647@163.com
通信作者：梁坤（1980—），男，教授。
E-mail：liangk@bjtu.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

铁路时间同步网在实际应用中曾出现分钟级的时间偏差[2]，通过对时间同步网进行实时监测，可及时发现潜在问题，减少运行风险。已有研究[3-4]指出，现有监测技术存在有效性不足的问题，监测模块长期依赖设备自身时钟模块，参考基准缺少可信性，不同节点监测过程溯源参考不一致，无法获得现行技术标准中要求的时间节点设备性能相对于UTC的准确时间偏差。

网络时间协议（Network Time Protocol，NTP）由David L. Mills于1985年提出，是1种针对互联网的时间同步协议，该协议可向互联网中的计算机设备提供统一的标准时间，目前在铁路时间同步网中已得到广泛应用。基于NTP协议的NTP授时服务由网络路径、NTP服务器和NTP客户端3个因素组成，其中网络路径包括广域网和局域网，是协议的承载介质[5]。

文献［6-7］设计针对NTP服务器的监测系统，均以全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）作为参考基准；文献［8-10］提出采用地方协调时UTC（k）作为监测装置的参考，将NTP服务器相对于监测装置的时差向上溯源到UTC；文献［11］通过将监测装置与参考源为UTC（k）的NTP服务器进行同步，提高溯源监测技术的适用性；文献［12］借助1种可远程溯源至UTC（k）的时间频率标准，对NTP服务器进行高精度远程溯源监测。

研究提出将NTP溯源监测技术应用于铁路时间同步网性能监测中，可获取每级时间节点提供的授时服务相对于UTC的可信时间偏差。在上述工作基础上，阐述铁路时间同步网架构和NTP服务器监测机制，分析监测过程中的影响因素，设计可溯源监测装置TLab-NM-001，构建可溯源至UTC的监测链路，给出相应不确定度评定，搭建验证平台对所提方案进行验证。该研究结果可为铁路时间同步网的溯源性监测发展提供一定的理论参考依据。

1 铁路时间同步网

铁路时间同步网分为地面时间同步网和列车时间节点。其中，地面时间同步网（见图1）采用树形三级结构，由一级、二级、三级时间节点及其相应的时间传递链路构成。一级时间节点设于中国国家铁路集团有限公司（简称国铁集团），二级时间节点设于各铁路局集团公司，三级时间节点设于车站、段、所[13]。时间节点设备主要由卫星信号接收模块、时钟模块和时间服务器模块等组成。对于列车时间节点，各列车时间同步设备相互独立。目前，一、二级时间节点间常用授时方式为NTP以及精确时间协议（Precision Timing Protocol，PTP），二、三级时间节点间主要采用NTP进行时间频率传递。在节点内部，例如牵引供电、运营调度、通信信号和客运服务等系统之间，也首先采用NTP进行授时。列车时间节点内部，各车载系统之间也通常采用NTP进行授时。作为铁路时间同步网中的主要授时方式，NTP因其广泛应用性，成为监测铁路时间同步网的切入点。

2 监测机制

监测原理见图2。对NTP服务器进行监测时，监测装置打包数据包发送给NTP服务器，该数据包中包含离开监测装置的时间戳T_1；数据包到达服务器时，服务器记录此时时间戳T_2；服务器对数据包进行处理，将数据包重新发送回监测装置，数据包携带离开服务器的时间戳T_3；当数据包到达监测装置时，监测装置记录此时时间戳T_4。数据包的发送和接收过程可分别用式（1）、式（2）表示；数据包传输往返总时延δ由式（3）给出；式（1）与式（2）相加可进一步得到式（4）；假设数据包上行与下行时延相等，式（1）与式（2）相减可进一步得式（5）。

$$T_2 = T_1 + \theta + d_1 \ , \tag{1}$$

$$T_4 = T_3 - \theta + d_2 \ , \tag{2}$$

$$\delta = d_1 + d_2 \ , \tag{3}$$

$$\delta = (T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) \ , \tag{4}$$

$$\theta = [(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)]/2 \ , \tag{5}$$

式中：d_1为数据包上行传送时延；d_2为数据包下行传送时延；θ为NTP服务器相对于监测装置的时间偏差。

实际传输过程中，数据包会在网络设备中进行驻留，导致数据包在2条路径上的实际传输时延不同，路径不对称现象导致真实时间偏差θ'的计算由式（5）变形为式（6），定义路径不对称偏差为Δd，网络不对称系数为k，可得式（7）—式（9）。根据式（8）和式（9），以

中国知网 https://www.cnki.net

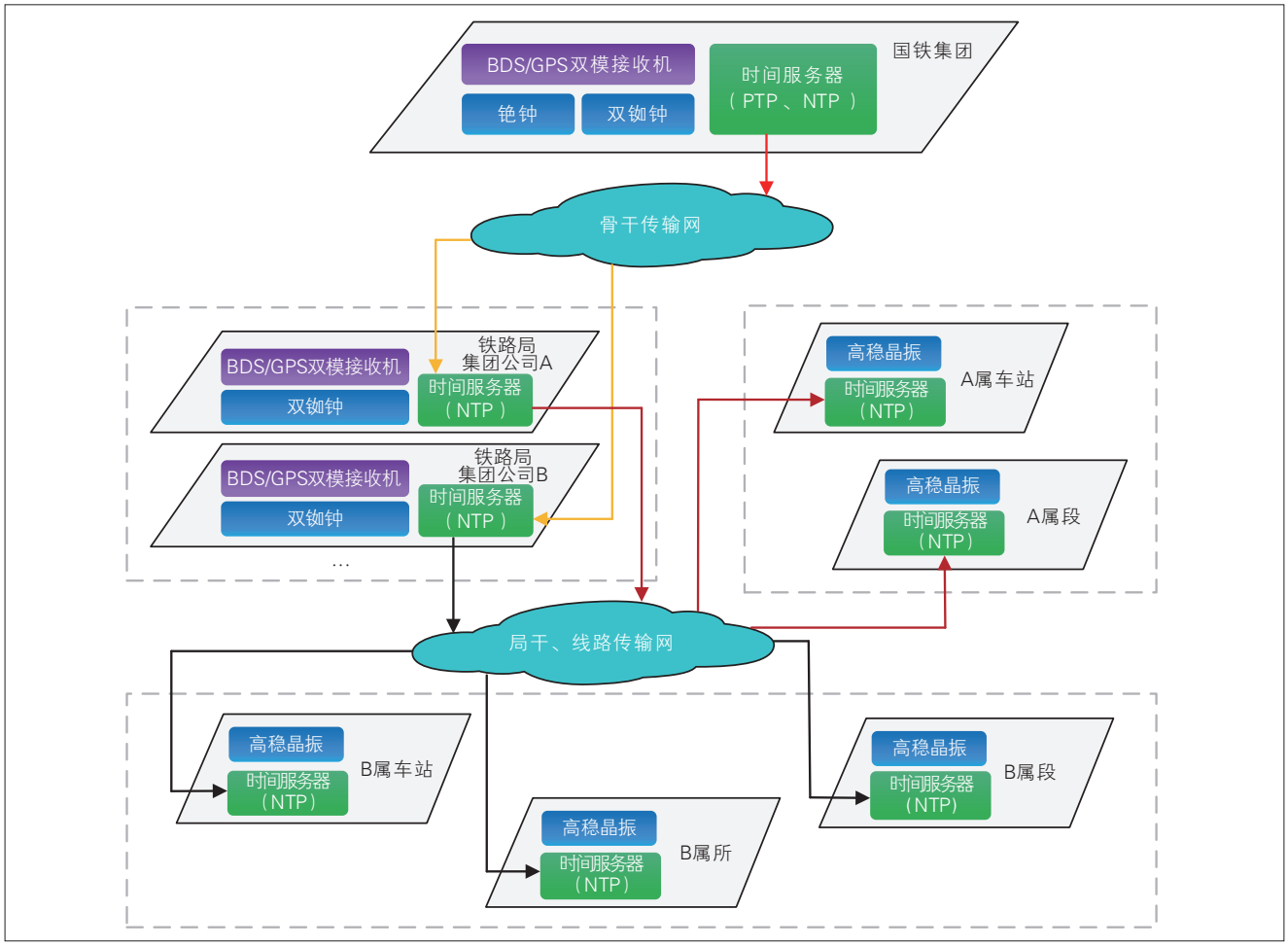

图1　铁路地面时间同步网

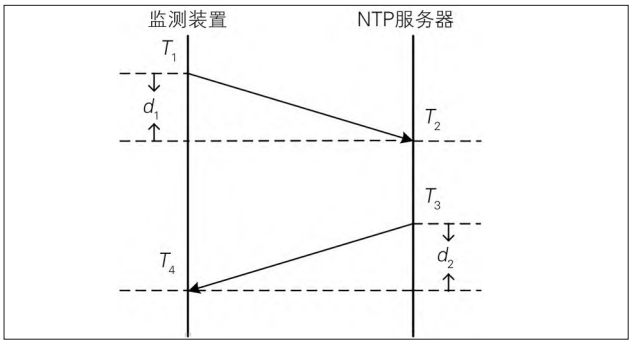

图2　监测原理

及d_1和d_2的非负性，可知$-1 \leqslant k \leqslant 1$。路径不对称性对时间偏差造成的误差范围为$\pm 0.5\delta$，该误差固定包含在真实时间偏差$\theta'$的计算中。当$k = 0$时，即为数据包上行与下行传送时延相等。

$$\theta' = \theta + (d_2 - d_1)/2 \ , \tag{6}$$

$$d_2 - d_1 = \Delta d = k \times \delta \ , \tag{7}$$

$$d_1 = (1 - k) \times \delta/2 \ , \tag{8}$$

$$d_2 = (1 + k) \times \delta/2 \ 。 \tag{9}$$

网络路径不对称性作为1种系统误差，会影响监测过程，包括静态和动态不对称特性[14]。对于固定路径，静态不对称特性在每次监测期间基本不变，但广域网环境下，k的恒定取值部分通常比在局域网环境下大，因此可以在局域网环境下对NTP服务器进行监测，尽量减小该部分带来的误差。此外，通常情况下无法对k的随机取值部分进行直接测量，可通过优化轮询周期来降低动态不对称性带来的影响[15]。

NTP服务器与监测装置时间戳产生过程见图3。监测装置和NTP服务器在发送数据包时，首先产生用户空间时间戳T_{1usr}和T_{3usr}，并将其写入数据包，操作时间为t_{NTP-A}；随后对数据包进行格式化和校验，操作时间分别为$t_{Protocol-Stack}$和t_{NTP-B}。上述3个操作产生的总时延在监测装置和NTP服务器中分别为$t_{Packet-M}$和$t_{Packet-S}$，

中国知网 https://www.cnki.net

数据包封装结束后生成内核空间时间戳T_{1so}和T_{3so}。驱动程序将数据包通过硬件传输到网络路径中，操作时间为t_{TX-M}和t_{TX-S}；传输结束后生成硬件时间戳T_{1hw}和T_{3hw}。NTP服务器和监测装置在接收数据包时，生成硬件时间戳T_{2hw}和T_{4hw}；驱动程序将数据包传入内核空间，操作时间为t_{RX-S}和t_{RX-M}；传输结束后生成内核空间时间戳T_{2so}和T_{4so}[16]。理想状态下，T_{1hw}与T_{2hw}之间的时间为NTP数据包发送时间，T_{3hw}与T_{4hw}之间的时间为NTP数据包返回时间。$t_{Packet-M}$、t_{TX-M}、t_{RX-S}、$t_{Packet-S}$、t_{TX-S}和t_{RX-M}共同构成的协议栈误差会影响监测结果。监测装置的类型及配置通常会影响协议栈误差大小。嵌入式系统处理任务较少，系统负载较低，且可以通过设计合适的软硬件架构，降低协议栈误差带来的影响，提高监测结果的准确性。因此，该研究选用嵌入式架构作为监测装置的实现方案。

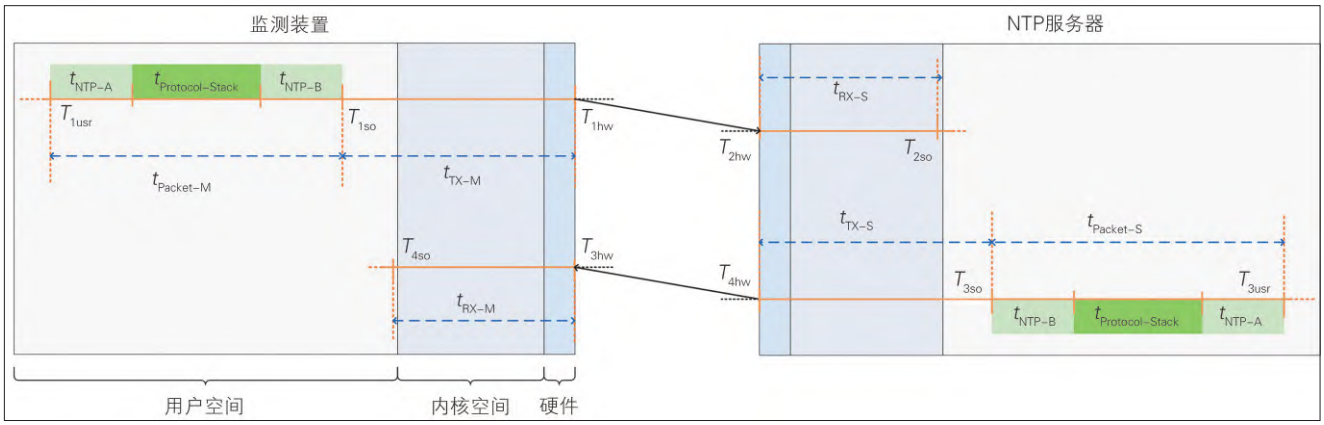

图3 NTP服务器与监测装置时间戳产生过程

3 铁路时间同步网监测系统

3.1 系统框架设计

研制的NTP服务器可溯源监测装置TLab-NM-001在局域网环境下与NTP服务器进行交互，记录发送请求和接收应答过程中产生的4个时间戳T_1、T_2、T_3和T_4，计算NTP服务器相对于监测装置的时间偏差θ和往返总延时δ，实现对NTP服务器的监测。TLab-NM-001需要外部提供高精度且可溯源的时间频率信号，10 MHz信号提供工作频率，实现频率信号溯源，时间信息（Time of Day，TOD）提供粗略年月日时分秒信息，秒脉冲（1 Pulse Per Second，1PPS）信号同时包含精确时频量值信息。该研究设计的铁路时间同步网NTP服务器监测系统采用北京交通大学的时标TS（BJTU）作为参考时间频率源，基于精密比对链路实时溯源至UTC（k），并向上溯源至UTC。监测系统框架见图4。

TLab-NM-001采用FPGA+ARM的嵌入式组合架构，通过串口获取时标TS（BJTU）提供的NMEA-0183协议语句，解析TOD时间信息。时间戳记录通过微秒计数器和秒计数器实现，10 MHz信号驱动计数器计数，并通过引脚中断方式同步到外部1PPS信号和TOD时间信息，相邻2次时间戳偏差可稳定保持在65 μs以内，后续计算时间偏差θ时需要对该部分误差进行补偿。同时，TLab-NM-001产生用于参与溯源链路的1PPS信号，通过时间间隔计数器测量监测装置与时标TS（BJTU）1PPS信号的差值，得到两者时间偏差为1.57 μs，标准偏差为0.04 ns。TLab-NM-001构建NTP数据包，通过网口芯片向NTP服务器发送时间同步请求，记录时间戳T_1，接收到返回数据包时，记录时间戳T_4。工控机通过串口数据采集脚本对T_1、T_4时间戳以及NTP数据包数据进行采集。

3.2 溯源链路构建

NTP服务器的监测过程本质上是1个测量过程，在计量学中需确保其可溯源性。对于时频计量中的时间差值测量，应最终溯源至协调世界时UTC。首先，NTP服务器相对于监测装置的时间偏差θ表示为式（10），UTC通过国际时间公报Circular T与UTC（k）联系起来，UTC作为纸面时标，以参与UTC计算的［UTC－UTC（k）］形式给出，可表示为式（11）[17]。时标TS（BJTU）通过与

中国知网 https://www.cnki.net

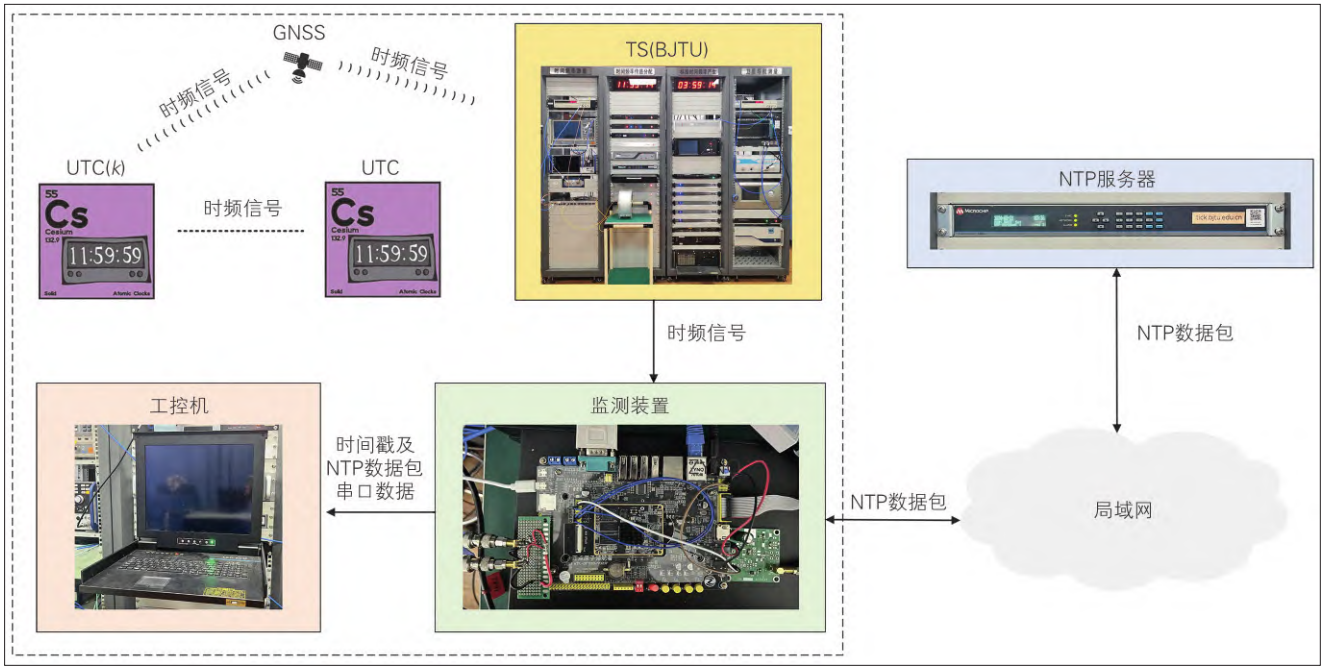

图4 监测系统框架

UTC（k）构建比对链路进行实时比对，并通过驯服控制使自身精确同步于UTC（k），确保自身时间频率输出准确、稳定以及保持与远端站维持的地方协调时UTC（k）的实时溯源性[18]，可通过GNSS共视技术测量得到时标TS（BJTU）相对于UTC（k）的时间差值，定义为式（12）。TLab-NM-001通过相位锁定与TS（BJTU）持续同步，以TS（BJTU）提供的10 MHz信号作为工作时基，测量自身与TS（BJTU）IPPS信号之间的时间间隔，表示监测装置相对于TS（BJTU）的时间差值，定义为式（13）。将式（10）—式（13）相加整理后得到式（14），可表征监测过程的溯源链路构建，即D_1、D_2、D_3的测量形成可溯源链路，将NTP服务器监测过程溯源到UTC。

$$\theta = T_{\mathrm{TLab-NM-001}} - T_{\mathrm{NTP}} \ , \tag{10}$$

$$D_1 = \mathrm{UTC} - \mathrm{UTC}(k) \ , \tag{11}$$

$$D_2 = \mathrm{UTC}(k) - T_{\mathrm{TS(BJTU)}} \ , \tag{12}$$

$$D_3 = T_{\mathrm{TS(BJTU)}} - T_{\mathrm{TLab-NM-001}} \ , \tag{13}$$

$$\theta = \mathrm{UTC} - D_1 - D_2 - D_3 - T_{\mathrm{NTP}} \ 。 \tag{14}$$

式中：$T_{\mathrm{TLab-NM-001}}$为监测装置TLab-NM-001的参照时间；T_{NTP}为NTP服务器的参照时间；$T_{\mathrm{TS(BJTU)}}$为时标TS（BJTU）的参照时间；D_1为UTC（k）与UTC的时间差值；D_2为时标TS（BJTU）相对于远端站维持的地方协调时UTC（k）的时间差值；D_3为监测装置TLab-NM-001相对于时标TS（BJTU）的时间差值。

3.3 不确定度评估

TLab-NM-001对NTP服务器监测过程的合成标准不确定度由式（15）表示，包括监测装置的重复性测量过程引入的A类标准不确定度，以及其他非重复性测量因素引入的B类标准不确定度。B类标准不确定度的来源包括测量过程中的往返总时延、监测装置向时标TS（BJTU）的同步过程、时标TS（BJTU）向远端站UTC（k）的同步过程、UTC（k）参与UTC的构建过程，需要将这4个非重复性测量因素造成的不确定度进行合成，由式（16）表示。对于监测装置向时标TS（BJTU）的同步过程，通过时间间隔计数器测量两者的时间差值进行表征，其标准不确定度又包括使用时间间隔计数器进行重复性测量引入的A类标准不确定度，以及时间间隔计数器测量误差引入的B类标准不确定度，由式（17）表示。B类标准不确定度的来源包括时间间隔计数器分辨率误差和相对误差，由式（18）表示。

$$u_{\mathrm{C}}^2(\theta) = u_{\mathrm{A}}^2(\theta) + u_{\mathrm{B}}^2(\theta) \ , \tag{15}$$

$$u_{\mathrm{B}}^2(\theta) = u^2(\delta) + u^2(D_3) + u^2(D_2) + u^2(D_1) \ , \tag{16}$$

$$u^2(D_3) = u_{\mathrm{A}}^2(D_3) + u_{\mathrm{B}}^2(D_3) \ , \tag{17}$$

$$u_{\mathrm{B}}^2(D_3) = u^2(\mathrm{TIC_{res}}) + u^2(\mathrm{TIC_{rel}}) \ , \tag{18}$$

式中：$u_{\mathrm{C}}(\theta)$、$u_{\mathrm{A}}(\theta)$和$u_{\mathrm{B}}(\theta)$分别为监测过程中引入的

中国知网 https://www.cnki.net

合成标准不确定度、A类与B类标准不确定度；$u(\delta)$为监测过程中往返总时延引入的标准不确定度；$u(D_3)$为监测装置与时标TS（BJTU）同步过程引入的标准不确定度；$u(D_2)$为时标TS（BJTU）向远端站维持地方协调时UTC（k）的同步过程引入的标准不确定度；$u(D_1)$为UTC（k）参与UTC构建过程引入的标准不确定度；$u_A(D_3)$和$u_B(D_3)$分别为监测装置与时标TS（BJTU）同步过程引入的A类和B类标准不确定度；$u(\mathrm{TIC_{res}})$和$u(\mathrm{TIC_{rel}})$分别为时间间隔计数器分辨率误差和相对误差引入的B类标准不确定度。

监测不确定度评估方法归纳见表1，D_3链路不确定度评估方法归纳见表2。

表1　监测不确定度评估方法归纳

不确定度		不确定度来源	类型	具体评估方法
$u_A(\theta)$		测量重复性	A	单次监测过程得到的时间偏差θ的标准偏差
$u_B(\theta)$	$u(\delta)$	往返总时延	B	单次监测过程中往返总时延δ平均值的1/2
	$u(D_3)$	D_3链路	B	使用时间间隔计数器测量监测装置与时标TS(BJTU)的时间差值
	$u(D_2)$	D_2链路	B	参考文献[19]给定
	$u(D_1)$	D_1链路	B	参考文献[17]给定

表2　D_3链路不确定度评估方法归纳

不确定度		不确定度来源	类型	具体评估方法
$u_A(D_3)$		测量重复性	A	使用时间间隔计数器单次测量得到的监测装置与时标TS(BJTU)时间差值的标准偏差
$u_B(D_3)$	$u(\mathrm{TIC_{res}})$	时间间隔计数器分辨率误差	B	参考文献 [20] 给定
	$u(\mathrm{TIC_{rel}})$	时间间隔计数器相对误差	B	参考文献 [20] 给定

4　实验与结果分析

为验证监测装置的有效性，使用另一型号监测装置Timeacc-007对实验室内某一NTP服务器进行监测，将得到的监测数据与TLab-NM-001监测得到的数据进行比对分析。NTP服务器（型号SyncServer S650，简称S650）、时标TS（BJTU）、TLab-NM-001和Timeacc-007均部署在北京同一实验室内，时标TS（BJTU）与中国计量科学研究院维持的地方协调时UTC（NIM）通过构建比对链路进行比对，2台监测装置与NTP服务器均以时标TS（BJTU）作为参考时间频率源。Timeacc-007监测实验实施日期为MJD 60285，TLab-NM-001监测实验实施日期为MJD 60408，2次实验测量环境均为局域网，测试时长均为18 h，轮询周期均设为1 s。监测结果见图5—图8和表3。通过Stable32软件计算得到时间偏差（Time Deviation，TDEV）和修正阿伦偏差（Modified Allan Deviation，MDEV）分别见图9、图10。

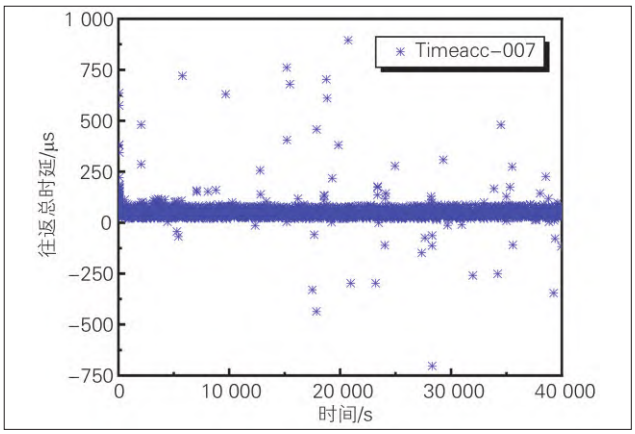

图5　S650与Timeacc-007的往返总时延

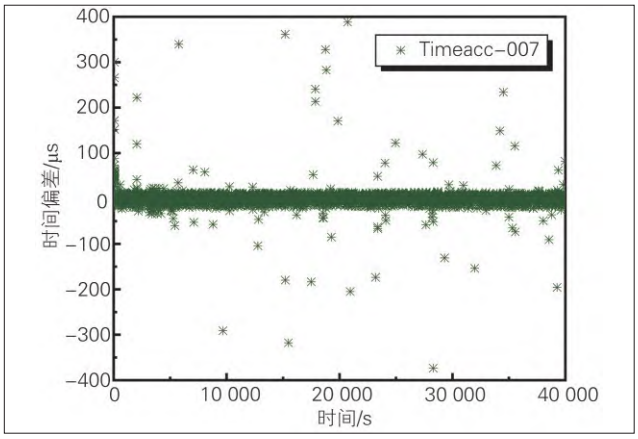

图6　S650与Timeacc-007的时间偏差

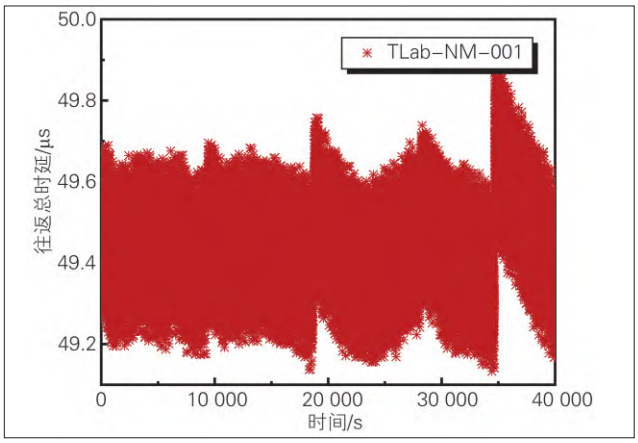

图7　S650与TLab-NM-001的往返总时延

中国知网 https://www.cnki.net

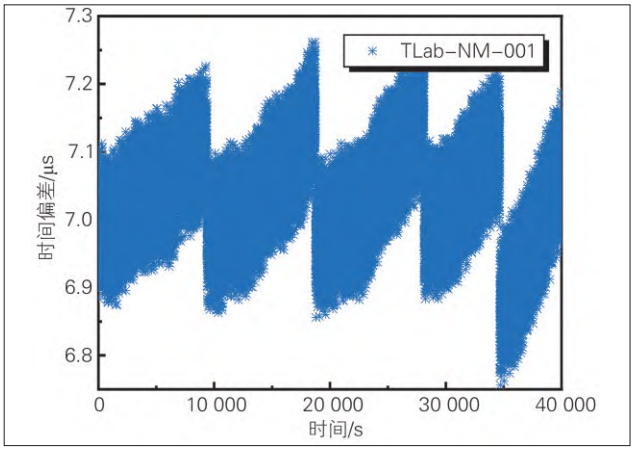

图8 S650与TLab-NM-001的时间偏差

表3 不同装置监测结果 μs

采样频率	装置	时间偏差		往返总时延	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
1 s/次	Timeacc-007	1.92	8.41	43.06	16.87
	TLab-NM-001	7.03	0.07	49.44	0.11

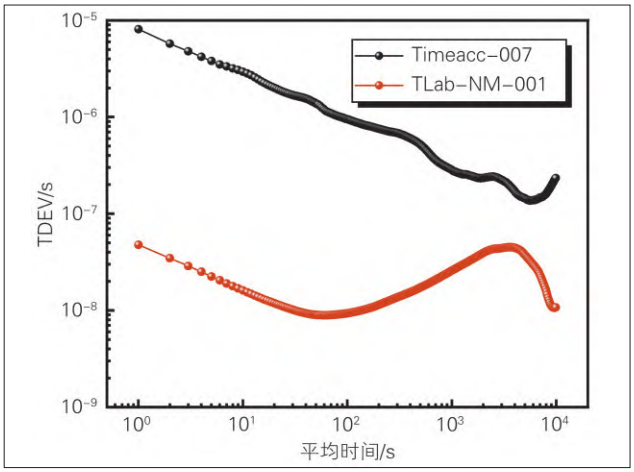

图9 时间稳定度

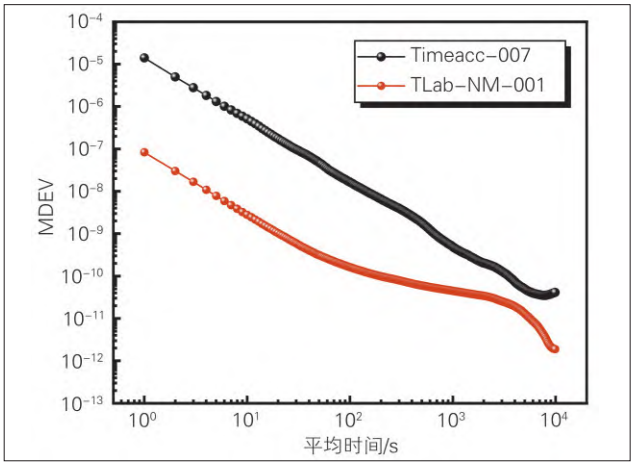

图10 频率稳定度

从长期来看，NTP服务器以时标TS（BJTU）为参考时，时钟性能指标较为稳定，可认为上述2次实验期间NTP服务器时钟性能对时间偏差监测结果的影响几乎一致。2台监测装置监测得到的往返总时延δ平均值相差6.38 μs，经式（6）计算，网络静态不对称性对时间偏差监测结果造成的影响被进一步减小，因此可以近似认为2次实验过程中网络状态对监测结果造成的影响一致，0.11 μs的标准偏差反映了TLab-NM-001监测期间网络动态不对称性更小。在保证网络路径和NTP服务器时钟性能对时间偏差监测结果影响近乎一致的前提下，2次不同时间段时间偏差比对分析结果可以用来分析TLab-NM-001监测性能。

对同一NTP服务器进行监测时，2台监测装置的时间偏差θ平均值相差5.11 μs，表明TLab-NM-001可达到与Timeacc-007相近的监测水平，当前监测结果也侧面反映出被监测NTP服务器的授时性能优于微秒量级，造成监测结果存在一定偏差的主要原因可能是TLab-NM-001未进行系统校正，存在一定的系统延时误差。而0.07 μs的标准偏差则说明TLab-NM-001的监测性能更稳定，且7.03 μs的时间偏差平均值远高于铁路时间同步网中现行技术标准中关于时间节点NTP授时服务的性能指标，说明基于TLab-NM-001搭建的可溯源监测系统能够有效监测铁路时间同步网时间节点NTP授时服务性能。平均间隔为10 000 s时，TLab-NM-001和Timeacc-007的TDEV分别约为10.71 ns和233.53 ns（见图9），MDEV分别约为1.88×10^{-12}、4.10×10^{-11}（见图10），进一步说明TLab-NM-001的监测性能更稳定。

针对TLab-NM-001的监测过程进行不确定度评估。根据表1、表2给出的不确定度评估方法，国际计量局（Bureau International des Poids et Mesures，BIPM）每月发布的国际时间公报Circular T给出MJD 60408期间D_1链路的标准不确定度$u(D_1)$为2.30 ns（2.30×10^{-3} μs）；根据文献［19］，将D_2链路中由于GNSS时频传递链路带来的标准不确定度$u(D_2)$评定为8.02 ns（8.02×10^{-3} μs）；在D_3链路测量中，由时间间隔计数器分辨率误差引入的标准不确定度$u(\mathrm{TIC}_{res})$为0.10 ns，由时间间隔计数器相对误差引入的标准不确定度$u(\mathrm{TIC}_{rel})$为0.05 ns。经测量，1PPS信号时差测量结果的标准偏

中国知网 https://www.cnki.net

差为0.04 ns，由实验重复性引入的标准不确定度评定为0.04 ns。D_3链路不确定度评估结果见表4，其合成标准不确定度为0.12 ns（1.20×10^{-4} μs）。往返总时延δ的平均值是49.44 μs，故$u(\delta)$的值被评估为24.72 μs。时间偏差θ的标准偏差是0.07 μs。综上，使用TLab-NM-001对NTP服务器进行监测的不确定度评估结果见表5。该结果表明，基于TLab-NM-001成功搭建了针对NTP服务器的可信监测溯源链路，且监测不确定度优于25 μs。

表4 D_3链路不确定度评估结果 ns

不确定度		不确定度来源	标准不确定度	合成标准不确定度
$u_A(D_3)$		测量重复性	0.04	0.12
$u_B(D_3)$	$u(\mathrm{TIC}_{res})$	时间间隔计数器分辨率误差	0.10	
	$u(\mathrm{TIC}_{rel})$	时间间隔计数器相对误差	0.05	

表5 监测不确定度评估结果 μs

不确定度		不确定度来源	标准不确定度	合成标准不确定度
$u_A(\theta)$		测量重复性	0.07	24.72
$u_B(\theta)$	$u(\delta)$	往返总时延	24.72	
	$u(D_3)$	D_3链路	1.20×10^{-4}	
	$u(D_2)$	D_2链路	8.02×10^{-3}	
	$u(D_1)$	D_1链路	2.30×10^{-3}	

5 结论

铁路时间同步网长期依赖时间节点设备自身的时钟模块，测量被监测信号与参考基准的偏差，通过与设定阈值进行比较从而实现性能监测。该方式所选用监测模块的参考基准缺少可信性，且不同节点监测过程溯源参考不一致，无法对时间节点实现可信溯源监测。

该研究提出从铁路时间同步网中被广泛使用的NTP授时服务入手，构建针对NTP服务器的可溯源监测链路。通过分析网络不对称性和协议栈误差对于监测过程产生的影响，设计基于可溯源时标TS（BJTU）的监测装置TLab-NM-001，该装置在局域网环境下对NTP服务器进行监测，其监测结果可向上溯源至UTC，采用该技术对铁路时间同步网节点进行监测，可有效解决既有监测技术溯源可信性不足的问题。

通过对比实验对该方案的有效性进行验证，实验结果表明，基于该装置搭建的监测系统监测结果优于10 μs，监测不确定度优于25 μs，远优于现行技术标准中关于时间节点NTP授时服务的性能指标，该技术可进一步提升铁路时间同步网监测能力。针对目前5G-R基站与铁路时间同步网互联所提出的±1.5 μs指标要求，未来研究将重点聚焦于针对PTP授时服务的高精度可溯源监测装置的研制。此外，未来可通过在多个时间节点处引入上述可溯源监测方案，获取时间节点间的可信偏差，从而对铁路时间同步网中网络路径异常和时间节点处NTP服务器故障进行有效区分，并进一步实现对铁路时间同步网的整体层面监测，提高铁路系统的安全性和可靠性。

参考文献

[1] 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.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.
[5] MILLS D L. Network Time Protocol (version 2) specification and implementation [J]. DARPA Network Working Group Report RFC-1119, University of Delaware, 1989.
[6] 王明. 便携式NTP测试仪设计与实现[D]. 北京：中国科学院研究生院(国家授时中心)，2016.
[7] 吴鹏. NTP授时服务性能监测及状态评估[D]. 北京：中国科学院研究生院(国家授时中心)，2016.
[8] JALDEHAG K, RIECK C, HEDEKVIST P O, et al. Surveillance of NTP-servers in customer's network[C]// 2014 European Frequenand Time Forum (EFTF). IEEE. Neuchatel, 2014: 487-490.
[9] LOMBARDI M A, LEVINE J, LOPEZ J M, et al. International comparisons of network time protocol servers [C]//Proceedings of the 46th annual precise time and time interval systems and applications meeting. Boston, 2014: 57-66.
[10] DOUGLAS R, CHARBONNEAU A, GERTSVOLF M. Remote calibration of time from NTP servers[J]. Metrologia, 2018, 55(6): 855.

中国知网 https://www.cnki.net

[11] ZHANG Y, WANG Y, LIU N, et al. Traceability of network time service to UTC (NIM): online calibration [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(5): 055008.
[12] 顾杨义. 基于NIMDO的数据安全性改进及NTP授时性能评估[D]. 北京:中国计量大学, 2021.
[13] 梁坤,余洄,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.
[14] MKACHER F, DUDA A. Calibrating NTP [C]// 2019 IEEE international symposium on precision clock synchronization for measurement, control, and communication (ISPCS). IEEE, 2019: 1-6.
[15] 陈希,滕玲,高强,等. NTP和PTP协议的时间同步误差分析[J]. 宇航计测技术,2016,36(3): 35-40.
[16] LANGER M, HEINE K, BERMBACH R, et al. Analysis and compensation of latencies in NTS-secured NTP time synchronization[C]//2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF). IEEE, 2020: 1-10.
[17] International Bureau of Weights and Measures(BIPM). Circular T[EB/OL]. (2024-05-14)[2024-06-07]. https://webtai. bipm. org/ftp/pub/tai/Circular-T/cirthtm/cirt. 436. html.
[18] 丁超,范军华,郁黎,等. 基于NIMDO时间频率计量标准的构建[J]. 计量科学与技术,2021,65(7): 3-8.
[19] 韩凯,丁超,郁黎,等. 基于NIMDO的时间频率远程校准应用研究[J]. 计量科学与技术,2021,65(7): 9-12.
[20] VALAT D, DELPORTE J. Absolute calibration of timing receiver chains at the nanosecond uncertainty level for GNSS time scales monitoring[J]. Metrologia, 2020, 57(2): 025019.

责任编辑 明芳
收稿日期 2024-06-07

Monitoring Technology of NTP Timing Services in Railway Time Synchronization Network

WANG Zijian[1], LIANG Kun[1], ZHAO Junliang[1], WANG Jian[1], CHEN Longquan[2], ZHONG Chongxia[3]
(1. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;
3. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The railway time synchronization network is an important component of the railway communication network, providing a unified standard time value for various railway systems. By conducting real-time monitoring of this network, potential issues can be promptly detected, thereby reducing operational risks. This paper aims to further enhance the monitoring capabilities of the railway time synchronization network and address the issue of accurately obtaining trustworthy time deviations of time nodes relative to Universal Time Coordinated (UTC). The study of the traceable high-precision monitoring technology for Network Time Protocol (NTP) servers was carried out to analyze the influential factors during the monitoring process and develop the traceable monitoring device TLab-NM-001. A monitoring system was constructed to obtain the time deviation of the NTP server relative to UTC, and a validation platform was established to verify the effectiveness of this monitoring method. The results indicate that the performance of this method in time difference monitoring is better than 10, significantly surpassing the performance indicators set by the current standards, and the monitoring uncertainty is better than 25. The findings can effectively enhance the monitoring capabilities of the railway time synchronization network, providing technical support for improving the reliability and efficiency of railway systems.

Keywords: time synchronization; railway time synchronization network; NTP; monitoring; traceability; UTC

中国知网 https://www.cnki.net