

数字时钟同步技术在地铁通信网络中的应用

颜晓倩 陈 冉

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文深入探讨了数字时钟同步技术在地铁通信网络中的核心作用,首先分析了地铁各子系统对时间同步的需求及其精度等级;其次,详细阐述了当前主流的时钟同步协议(如NTP、PTP)的工作原理、性能特点及在地铁环境下的适用性;再次,结合具体应用场景,论证了高精度时钟同步如何赋能CBTC(基于通信的列车控制)、视频联动、故障诊断与日志分析等关键功能;最后,针对地铁复杂电磁环境、长距离传输、网络安全等挑战,提出了相应的解决方案,并展望了5G TSN(时间敏感网络)等新兴技术对未来地铁通信网络时钟同步架构的影响。研究表明,构建一个高可靠、高精度、高安全的全网统一时间基准,是保障现代地铁安全、高效、智能运营的基石。

关键词: 数字时钟同步; 地铁通信网络; PTP; NTP; CBTC; 时间敏感网络

引言

城市轨道交通是缓解拥堵、提升居民生活质量的关键基础设施。随着地铁线网规模扩张,运营管理模式从“人控”向“自动驾驶”“智慧运维”转型,其核心驱动力是地铁专用传输网。该网络如同地铁“中枢神经系统”,连接着数十个专业子系统。但仅实现物理互联互通不够,统一精确的时间基准至关重要。列车高速运行时,若车载与地面控制器时间有毫秒级偏差,可能引发错误制动或危险追踪间隔;全线各站摄像头时间不同步,突发事件后将无法准确还原过程,给事后调查带来困难^[1]。因此,数字时钟同步技术已从辅助性支撑技术,跃升为关乎地铁运营安全、效率与智能化水平的战略性关键技术,能确保终端设备时钟一致,为上层应用提供可靠时空坐标。

1 地铁通信网络对时钟同步的需求分析

1.1 高精度同步需求(微秒至亚微秒级)

主要服务于直接关系行车安全的CBTC系统。该系统通过车-地双向无线通信实现列车控制,时间同步精度决定行车安全边界。计算列车精确位置时,所有参与数据都需精确时间戳,若车-地时间不同步,高速运行下位置计算误差会迅速放大,可能引发重大安全事故。地面区域控制器为列车动态计算移动授权,要求车-地时间高度一致,否则会触发紧急制动,影响运营效率甚至造成乘客恐慌。无人驾驶模式下,ATO系统控制列车精准对标,也依赖高精度时钟同步。

1.2 中等精度同步需求(毫秒级)

涵盖大部分运营管理和乘客服务系统。视频监控系统由数以万计的高清摄像头组成,发生事件时需调取多摄像头录像回溯,毫秒级同步精度可准确拼接事件时间

线,明确因果关系。乘客信息系统实时推送信息,不同站点或显示屏时间不同步会导致信息发布混乱,误导乘客。电力监控系统监控电网参数,故障时需通过各监测点记录的故障波形定位故障点,各监测点时间戳一致才能有效运用算法,快速锁定故障点,缩短抢修时间。

1.3 低精度同步需求(秒级)

主要面向后台管理、日志记录等非实时性业务。自动售检票系统的交易记录需准确时间戳用于财务结算等,秒级同步精度即可满足。综合监控系统海量运行日志是故障诊断等的重要依据,统一日志时间戳是跨系统关联分析的前提。内部办公自动化系统如邮件服务器等,采用标准NTP协议同步,对时间精度要求宽松。

2 主流数字时钟同步技术原理与比较

为满足上述差异化需求,业界发展出了多种时钟同步协议和技术。其中,NTP(Network Time Protocol)和PTP(Precision Time Protocol, IEEE 1588)是两种最主流的解决方案。

2.1 NTP(网络时间协议)

NTP是互联网上广泛使用的标准时间同步协议,其设计目标是在广域网上提供秒级乃至亚秒级的时间同步。NTP采用分层的客户端-服务器模型。顶层是Stratum 0的原子钟或GPS接收机等高精度时间源。Stratum 1服务器直接连接Stratum 0设备,作为一级时间服务器。下层客户端(Stratum 2, 3...)通过向其上层服务器发送请求/响应报文来校准自身时钟。NTP通过测量报文往返延迟(Round-Trip Delay)和时钟偏移(Offset)来计算并调整本地时钟。它使用复杂的滤波算法(如Marzullo算法)来抵御网络抖动和异常值的影响^[2]。在局域网环境下,NTP通常能达到1-10毫秒的同步精度;在广域网环境下,受网络延迟和

抖动影响，精度会下降到几十甚至上百毫秒。其优势在于协议成熟、兼容性好、部署简单、对网络设备要求低。几乎所有操作系统和网络设备都内置了NTP客户端。

2.2 PTP（精确时间协议，IEEE 1588）

PTP（精确时间协议，IEEE 1588）专为工业自动化、电信等领域设计，满足亚微秒级同步需求，适用于局域网。它采用主从架构，通过最佳主时钟算法选出最优Grandmaster（GM）时钟作为时间源。GM周期性发送Sync报文（含发送时间戳t1），从时钟记录接收时间戳t2；GM再通过Follow_Up报文告知t1。从时钟发送Delay_Req

报文（记录发送时间戳t3），主时钟回复Delay_Resp报文（含接收时间戳t4）。从时钟据此计算网络路径延迟和时钟偏移量，调整本地时钟。关键增强技术包括：硬件时间戳，由网络接口卡或交换机专用硬件打标，误差降至纳秒级；透明时钟，测量PTP报文穿越自身的驻留时间并累加到报文，从时钟计算时扣除，补偿网络设备抖动。在专用网络中，PTP可轻松实现亚微秒甚至纳秒级同步，但劣势在于对网络设备有特定硬件要求，部署成本和复杂度高于NTP。

2.3 技术选型对比

表1：技术对比

特性	NTP	PTP (IEEE 1588v2)
典型精度	局域网：1-10ms；广域网：>100ms	局域网（硬件支持）：<1μs
架构	分层客户端-服务器	主从（Grandmaster-Slave）
核心机制	软件时间戳，算法滤波	硬件时间戳，透明时钟补偿
网络设备要求	普通IP网络设备	需支持PTP的交换机（BC/TC）
部署复杂度	低	中到高
适用场景	秒级/毫秒级同步需求（AFC, 日志, PIS）	微秒/亚微秒级同步需求（CBTC, 高端视频联动）

在地铁通信网络中，通常采用“NTP+PTP”的混合架构。即，以一套高精度的PTP主时钟（通常由GPS/北斗授时）为核心，向下为CBTC等高精度需求系统提供PTP服务；同时，该主时钟也作为NTP服务器，为其他中低精度需求的系统提供NTP服务，从而实现全网统一的时间基准。

3 数字时钟同步在地铁关键业务中的应用

3.1 赋能CBTC系统，保障行车安全

数字时钟同步技术为CBTC系统构建贯穿车-地的统一时间基准，深度赋能行车安全与效率。车载控制器（VOBC）利用高精度本地时钟，为测速传感器数据打上精确时间戳，并将带时间标签的位置增量及应答器绝对位置信息封装上报；地面区域控制器（ZC）依托同步时钟验证时间戳，剔除网络延迟导致的陈旧数据，融合多源异步信息，精准解算列车实时位置与速度，确保全线状态图景真实一致^[3]。在移动授权（MA）交互中，ZC明确标注授权有效起止时间，VOBC据此校验并在超时后主动施加制动，形成基于共同时间的“契约式”安全闭环。多列车协同追踪时，微秒级时间同步使ZC能以高时间分辨率动态调整后车授权终点，实现连续平滑的速度控制，缩短行车间隔、提升运能与舒适性。故障诊断阶段，统一时间戳支持车地双方准确判定通信中断持续时间，合理选择缓行或紧急制动策略，避免因误判导致过度保守或危险运行，显著增强系统安全性与可用性。

3.2 提升视频监控与应急联动效能

在传统地铁视频系统中，各摄像头独立运行，时间

源各异，录像回放时常出现“时间错乱”的问题。引入全网PTP/NTP同步后，情况得到根本改善。（1）应用场景：假设在站厅发生一起乘客纠纷事件。安保人员接到报警后，可以立即在综合监控平台上，以事件发生的确切时间为锚点，一键调取站厅、闸机、出入口等多个关联摄像头在该时间点前后数秒的录像。由于所有视频流的时间轴完全对齐，可以清晰地看到事件的起因、经过和相关人员的行动轨迹，极大地提高了应急处置和事后调查的效率。（2）高级应用：在更先进的系统中，还可以实现“视频+业务数据”的联动。例如，当AFC系统检测到某张票卡在短时间内于相距甚远的两个站点刷卡时（可能存在票卡复制嫌疑），系统可以自动触发，调取这两个站点对应时间的视频进行比对分析。这种跨系统联动的准确性完全依赖于底层统一的时间基准。

3.3 优化故障诊断与日志分析

地铁系统每天产生TB级别的运行日志。没有统一的时间，这些日志就是一堆杂乱无章的数据碎片。（1）故障根因分析（RCA）：当一列车在区间发生不明原因的紧急制动时，维护人员需要排查信号、车辆、供电等多个系统。通过查询同一精确时间窗口（例如，制动触发前1秒到后5秒）内所有相关系统的日志，可以迅速发现是哪个系统最先发出了异常信号。例如，日志可能显示在制动前800毫秒，接触网电压出现了瞬时跌落，从而将故障根源锁定在供电系统，而非信号系统^[4]。（2）性能瓶颈定位：在分析网络或服务器性能时，统一的时间戳可以帮

助绘制出精确的事务处理链路图。例如，一笔AFC交易从刷卡到后台确认的全过程，涉及读写器、车站服务器、中央数据库等多个节点。通过比对各节点处理该交易的时间戳，可以精准定位出哪个环节耗时最长，为系统优化提供数据支撑。

4 面临的挑战与应对策略

4.1 复杂电磁环境与长距离传输

地铁隧道是一个典型的封闭、狭长、金属结构环绕的空间，存在强烈的多径效应和电磁干扰。这不仅影响车地无线通信，也会影响有线网络中PTP/NTP报文的传输质量，导致报文抖动和丢包，进而影响同步精度。应对策略包括：（1）高质量传输介质：主干网络采用抗干扰能力强的单模光纤，并做好屏蔽和接地。（2）冗余组网：采用双环网或Mesh等冗余拓扑结构，确保即使部分链路受损，时钟信号依然能通过备用路径送达。（3）鲁棒性算法：在PTP实现中，采用更先进的滤波和预测算法（如卡尔曼滤波），以更好地应对突发的网络抖动。

4.2 网络安全威胁

统一的时间服务器一旦被攻击或篡改，将导致全网设备时间紊乱，可能引发灾难性后果。例如，攻击者伪造一个未来的PTP主时钟，可能导致CBTC系统认为列车已超出移动授权范围而施加紧急制动，造成全线瘫痪。应对策略包括：（1）物理隔离与逻辑隔离：将高精度同步网络（如CBTC专用网）与办公网、乘客Wi-Fi等公共网络进行严格的物理或VLAN隔离。（2）协议安全增强：启用PTP的IEEE 802.1AS或AES67等带有安全扩展的版本，对PTP报文进行认证和加密，防止中间人攻击和报文伪造。（3）多重时间源验证：主时钟应同时接入GPS和北斗等多套卫星系统，并进行交叉比对。一旦发现某一路信号异常，可自动切换或发出告警。

4.3 系统兼容性与演进

地铁建设周期长，新旧线路并存，设备厂商众多，协议版本各异（如PTP v1/v2），给全网统一同步带来兼容性

难题。应对策略：（1）制定统一标准：在项目规划初期，就应明确时钟同步的技术规范、精度要求和接口标准，强制要求所有供应商遵循。（2）协议转换网关：对于无法升级的老系统，可通过部署协议转换网关，将其纳入统一的同步体系。（3）模块化、可扩展架构：设计时钟同步系统时，应考虑未来线路延伸和新业务接入的需求，采用模块化设计，便于平滑扩容。

5 结语

数字时钟同步技术已不再是地铁通信网络中的一个可选项，而是保障其安全、高效、智能运行的必备基础设施。本文通过对地铁各业务系统同步需求的深入剖析，明确了从微秒级到秒级的多层次精度要求。在此基础上，对比了NTP与PTP两种主流技术的优劣，并论证了二者在地铁网络中协同工作的混合架构模式。通过CBTC、视频联动、故障诊断等具体应用场景，充分展示了高精度时钟同步所带来的巨大价值。面对地铁复杂环境带来的电磁干扰、网络安全、系统兼容等挑战，必须采取系统性的工程措施予以应对。展望未来，5G TSN、网络虚拟化、人工智能等前沿技术的融合，将为地铁时钟同步体系注入新的活力，使其向着更高精度、更强韧性、更智能化的方向持续演进。可以预见，在一个由精确统一时间所编织的“时空网格”之下，未来的城市轨道交通将变得更加安全、可靠与智慧。

参考文献

- [1]王刚,刘晓旭,杨轩,等.数字高精度时钟同步系统设计与实现[J].中国信息界,2025,(09):217-219.
- [2]孙建鹏.基于高精度时钟同步的无人驾驶地铁数据处理系统设计与研究[D].中北大学,2021.DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000172.
- [3]李瀛生.地铁LTE-M1588V2时钟同步方案风险分析[J].数字通信世界,2022,(02):69-70+73.
- [4]张艺飞.高精度时钟同步策略研究及验证[D].北方工业大学,2025.DOI:10.26926/d.cnki.gbfgu.2025.001114.