

地铁 5G 无线通信与 CBTC 信号协同管控方案探讨

赵露涛

常州地铁集团有限公司, 江苏 常州 213000

[摘要]在轨道交通向高密度、高速度及智能化方向发展的背景下, 第五代移动通信技术(5G)与基于通信的列车控制系统(CBTC)的深度融合已成为提升运营效能的关键路径。本文针对两者融合过程中面临的频谱干扰、时延抖动、移动性管理及安全可靠性等核心难题, 深入剖析了异构网络间的耦合机理。通过构建基于网络切片的资源隔离架构, 提出了一种动态优先级的协同调度策略, 实现了控制业务与感知业务的差异化保障。研究重点探讨了隧道复杂电磁环境下的信号传播特性与抗干扰机制, 设计了具备故障自愈能力的容错控制模型, 并构建了端到端的纵深防御体系。该方案旨在解决高并发场景下通信链路的稳定性瓶颈, 为地铁信号系统的安全可靠运行提供理论依据与技术支持, 推动城市轨道交通向智慧化运维转型。

[关键词]5G 无线通信;CBTC 信号系统;协同管控

DOI: 10.64635/ja.2026.1289

中图分类号: U284

文献标识码: A

Discussion on a Collaborative Control Scheme for Metro 5G Wireless Communication and CBTC Signaling

Zhao Lutao

Changzhou Metro Group Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China

Abstract: Against the background of rail transit development toward higher density, higher speed, and greater intelligence, the deep integration of fifth-generation mobile communication technology (5G) and communication-based train control (CBTC) systems has become a key path for improving operational efficiency. Focusing on core challenges in the integration process, such as spectrum interference, latency jitter, mobility management, safety, and reliability, this paper deeply analyzes the coupling mechanism between heterogeneous networks. By constructing a resource isolation architecture based on network slicing, a collaborative scheduling strategy with dynamic priorities is proposed to achieve differentiated guarantees for control services and sensing services. The study focuses on the signal propagation characteristics and anti-interference mechanisms in the complex electromagnetic environment of tunnels, designs a fault-tolerant control model with fault self-healing capability, and establishes an end-to-end defense-in-depth system. The proposed scheme aims to solve the stability bottleneck of communication links in high-concurrency scenarios, provide theoretical basis and technical support for the safe and reliable operation of metro signaling systems, and promote the transformation of urban rail transit toward intelligent operation and maintenance.

Keywords: 5G wireless communication; CBTC signaling system; collaborative control

引言

城市交通拥堵问题日趋严重, 地铁作为大运力公共交通的骨干, 运能释放和运行安全同城市的运转效率息息相关。传统的基于无线通信的列车控制系统, 当面对超大规模客流和高密度行车的时候, 就会出现带宽受限、时延抖动大等问题。第五代移动通信技术因为具备超大带宽、超低时延、海量连接等特点给轨道交通通信升级开辟了新的途径。但是将通用的公众移动通信网络直接用于对安全性

要求极高的信号控制领域, 会遇到很多复杂的工程问题和理论空白。怎样冲破通信网和信号网之间的壁垒, 达成两者在物理层、链路层以及应用层的深入协作, 成了当下学术界和产业界共同重视的问题。

1 5G 与 CBTC 系统融合的技术机理与耦合特征

1.1 异构网络底层协议的映射关系

地铁 5G 无线通信系统和 CBTC 信号系统底层架构是不同的。前者以 IP 化分组交换为基础, 采用扁平化的网

络结构,追求数据吞吐量的最大化,后者大多依靠专门的无线频段或者某种协议来保证控制指令的确定性、实时性。在融合的时候,必须解决两种完全不同的数据流怎样在同一个物理介质上无损传输的问题。5G网络QoS(服务质量)要重新定义,才能满足CBTC系统对于重要控制报文高优先级的要求。这并不是简单的参数调节,它牵涉到底层帧结构、调度算法和错误重传机制的重新构建。

1.2 时空同步与定位精度的相互制约

列车控制的关键之处就在于对列车的空间位置和时间状况有着准确的把握。5G网络具有高精度定位的潜力,但是它的定位精度受基站布局、多径效应和用户密度的影响比较大,而CBTC系统对于定位误差有着非常严格的阈值要求。融合之后,定位数据获取的方式就会由原来的测距测角变为网络侧多源融合计算。这就需要5G基站的时间同步精度达到微秒或者纳秒级别,消除由于时钟不同步造成的距离测量误差。另外,由于列车高速运动的特点,多普勒频移较大,同步更加困难。如果5G网络的同步机制不能和CBTC的时序逻辑完全匹配,就会造成列车位置报告滞后或者超前,从而引起紧急制动或者追尾事故。

1.3 电磁环境与干扰抑制的博弈

地铁隧道属于封闭式强干扰环境,金属壁面引起的多重反射会造成严重的多径衰落,列车作为大型金属导体也会对无线信号产生屏蔽作用。5G高频段信号穿透力差,容易受到环境因素的影响。CBTC系统一般工作在一定的低频段内,抗干扰机制比较成熟但是灵活性差。当二者共用频段或者靠近布置的时候,互调干扰和邻道泄漏的风险会增大。尤其是在列车密集编组运行的时候,大量的终端设备同时接入会造成网络拥塞,从而引起信号控制报文丢失或者延迟。干扰不单来自于外部的电磁环境,也来自于内部网络资源的争夺。因此必须对5G信号在隧道内传播模型进行深入研究,分析其和CBTC信号在频域、时域上的交叉干扰机理,进而提出有效的隔离抑制措施。

2 面向信号优先的动态资源协同调度策略

2.1 基于业务感知的网络切片构建

为了达到5G网络对CBTC业务的精准支持,应该抛弃一刀切的资源分配方式,而应该采用基于网络切片的差异化服务模式。根据CBTC系统不同的业务类型(移动授权、状态报告、视频监控等)对时延、带宽、可靠性不同的需求来建立独立的逻辑子网。控制类业务应该被划分为超高可靠低时延通信(URLLC)切片,这个切片要独占一部分物理资源,并且应该采用最严格的调度策略。视频类业

务属于增强移动宽带(eMBB)切片,可以牺牲一些时延来换取更大的吞吐量。关键之处在于切片之间要具备资源隔离的功能,在公网流量急剧增加的时候,CBTC专用切片仍然可以得到保底带宽以及最小的调度周期。需要引入智能控制器,对各个切片的负载情况实行实时监控,根据实际状况来调节虚拟基站的资源配置,从而达成网络资源的弹性伸缩。

2.2 毫秒级时延保障的调度算法创新

CBTC系统端到端时延一般要控制在几十毫秒之内,任何一个微小的抖动都会对行车安全造成影响。5G网络下传统轮询式调度不能达到如此高的要求。因此要设计一种基于事件触发的抢占式调度算法。当CBTC控制报文到达基站缓冲区的时候,不管当前有没有其他的业务正在传输,系统应该立即中断低优先级的任务,优先处理信号控制报文。利用边缘计算(MEC)把部分核心网功能下沉到车站或者隧道侧,减小数据传输的物理距离,进而缩减传输时延。另外还要对空口调度算法进行改进,采用预调度(Pre-scheduling),根据列车运行时刻表提前预留资源,缩短等待时间。主动式资源预留策略可以很好地规避由于突发流量造成的拥塞风险,保证控制指令及时到达。

2.3 移动性管理中的无缝切换机制

列车在隧道内高速行驶,经常穿越不同的小区覆盖范围,网络切换就是保证通信连续性的主要步骤。传统的切换过程耗时长,在切换瞬间就会出现数据包丢失的情况,对CBTC系统来说是致命的。协同管控方案中加入预测型软切换技术。根据列车的历史轨迹、当前位置和速度矢量来预先计算出下一个目标小区,在当前小区信号衰减之前开始切换准备流程。利用双连接(Dual Connectivity),使列车在切换时同时和源基站、目标基站都有连接,即先建后断。该种机制可以最大程度上减小切换中断的时间,保证CBTC控制链路的连续性。另外还需要对隧道特有的长直线路径进行优化切换门限参数,防止信号波动造成的乒乓切换,提高网络的鲁棒性。

3 协同管控下的安全防御与容错机制

3.1 信号完整性校验与加密认证体系

开放共享的5G网络环境之下传输敏感的列车控制信息时,存在着数据被篡改、监听、非法接入等危险。传统的CBTC加密方式已经不能抵御新的网络攻击。必须创建起从应用层开始的纵深防御体系,用高强度的身份认证和数据加密来构筑起一道防线。依靠5G网络本身具有的安全特性,即用户设备永久标识符加密、双向鉴权等,从源

头上阻止非法接入。同时对控制报文设计专用的完整性校验算法,每一帧数据都携带动态数字签名,接收端在解析之前会对其进行严格的验证,一旦发现数据被篡改就会立刻丢弃并发出警报。除此之外还要设置密钥动态更新机制来防止长期使用的密钥被破解,保证通信链路的安全性。

3.2 异常工况下的故障隔离与降级运行

虽然协同方案具有较高的可靠性,但是也不能忽略极端情况下系统失效的风险。当 5G 网络发生大面积瘫痪或者严重干扰的时候,CBTC 系统就要具备自动降级运行的能力。这就要求建立一套完备的故障检测和隔离系统,可以对网络的健康状况进行实时的监测。一旦检测到关键控制报文丢包率大于阈值或者时延超出限定范围的时候,系统就要立刻断开和 5G 网络的联系,转而采用备用通信方式或者降级为点式 ATP 模式。在降级模式下列车依靠车载存储下来的运行图和少量的地面信息保持基本的运行状态,直到网络恢复为止。协同管控平台应该具有故障自愈的功能,在后台可

3.3 网络安全态势感知与主动防御

随着网络威胁越来越复杂,被动防御已经不能满足需要了,必须转为主动防御。创建以人工智能为基础的网络安全态势感知平台,对 5G 网络和 CBTC 系统所有的日志数据进行不间断地收集,用机器学习的方法来发现异常的流量模式以及可能的攻击行为。通过学习历史的攻击样本来预测未来攻击的趋势,进而提前下发防御策略。例如当检测到某个区域有异常扫描行为的时候,就会对这个区域的接入点进行限速或者隔离,防止攻击蔓延。另外还要建立多部门联动的应急响应机制,一旦发生安全事件,可以立即调动网络、信号、运维等部门的人员一起处理,从而形成一个闭环的安全管理机制。

4 协同管控方案的标准化演进与实施路径

4.1 技术标准体系的构建与完善

对地铁 5G 无线通信与 CBTC 信号协同控制提出的要求来说,技术标准体系的形成要突出打破壁垒,让各种类型的网络能够有机地融合在一起。首先要创建统一的接口和协议映射规范,确定 5G 空口资源块(RB)分配策略同 CBTC 控制报文优先级之间的对应关系,在 IP 化的扁平化架构里,保证重要的控制指令有确定的低时延保障。另外还要制定出适合于隧道复杂电磁环境的专项指标体系,包含高频段信号穿透损耗、多径效应抑制、微秒级时间同步精度等主要参数,给设备的选择和网络部署提供量化的依据。

还要建立以网络切片为基础的差异化服务标准,对

URLLC(超高可靠低时延)和 eMBB(增强移动宽带)的切片之间进行资源隔离,规定各个业务类型在带宽、抖动、丢包率等各方面的具体要求,在公网出现拥塞或者干扰的时候保证信号系统绝对的安全。另外还要建立跨系统联合测试认证规范,对物理层信号传播特性到应用层故障自愈能力的端到端验证过程进行规定,给出切换成功率、误码率、安全加密算法等各项要求的合规标准。经过以上标准的统一和细化之后,可以有效地降低产业链的成本,使 5G 和 CBTC 技术由试点走向大规模、规范化的应用,从而给城轨交通智能化转型打下良好的基础。

4.2 分阶段实施的工程落地策略

由于现网改造存在一定的复杂性以及风险,协同管控方案的实施要采取逐步推进的方式。第一阶段主要是对一部分具有代表性的线路、区间开展 5G 专网的小规模实验和测试,重点对网络切片、时延控制等主要业务的承载能力开展测试工作。第二阶段为规模组网,在主要干线全部开通 5G 网络,把非关键业务逐步迁移到 5G 通道上,并且保存原有的 CBTC 系统当作备用方案,从而达成双网并存的局面。第三阶段是深度融合,彻底淘汰掉旧的通信制式,全部采用基于 5G 的 CBTC 系统,加上智能化运维平台,使网络达到自优化、自愈合的效果。每一个阶段都要有严格的规定以及安全评价程序来保证顺利过渡。

4.3 运维模式的转型与人才队伍建设

新技术的应用必然会导致运维模式的改变。传统的分段式运维会变成一体化的智能运维。需要培养既有通信技术又有通信信号知识的复合型人才,创建起跨专业的联合运维团队。另外还要开发出一个智能化的运维管理平台,可以对 5G 基站、核心网设备、CBTC 车载和地面设备等所有的设备进行统一的监控和故障诊断。用大数据分析来预测设备寿命、预知性维修,即由原来的被动维修变成预防性维修。另外还要建立完善的培训体系,定期对运维人员开展新技术、新规范的培训,提高运维人员的应急处置能力,保证新系统高效稳定地运行。

5 结论

地铁 5G 无线通信同 CBTC 信号系统协同控制属于一项包含诸多学科交叉的系统工程,它的关键之处就在于冲破技术壁垒,达成通信资源和信号控制的深入耦合。采用网络切片技术、差分服务模型来保证毫秒级时延,用全局调度算法、全面安全防护、容错技术解决高密度车流场景下通信可靠性的难题。该方案不但提高了轨道交通的运载能力、安全性,而且为以后智慧城轨的发展打下了良好的

技术基础。伴随着相关技术标准不断健全和工程实践不断深入,5G 同 CBTC 的融合将会成为城市轨道交通高质量发展的主要动力,促使行业向更加智能、高效、安全的方向发展。

[参考文献]

- [1]左鸿超,张昱敏.5G 技术在城市轨道交通信号系统中的应用研究[J].现代城市轨道交通,2025,(09):77-81.
[2]周梓博.5G 公专网承载 CBTC 业务资源分配的研究[D].

北京交通大学,2024.

- [3]贺禧龙,杨曦,宋莉.基于车车通信虚拟编组的 CBTC 系统方案的研究[A]智慧城市与轨道交通 2022[C].中城科数(北京)智慧城市规划设计研究中心,2022:4.
[4]邵颖霞.基于 LTE-M 和 5G 混合组网的城市轨道交通通信系统无线资源管理研究[D].北京交通大学,2021.
[5]陶伟.5G 通信网络承载 CBTC 系统业务的方案研究及现场测试[J].城市轨道交通研究,2021,24(08):150-155.