

5G 在我国重载铁路通信系统中的应用

张钊

国能朔黄铁路发展有限公司原平分公司 034100

【摘要】重载铁路是我国用于大宗货物运输的关键方式，其通信系统的可靠性对于运输安全以及效率有着直接的关联。5G 技术展开的商用部署可为重载铁路通信系统实现升级优化提供全新的技术方面的支持。本文将 5G 技术在重载铁路通信系统里的应用作为切入点，对超可靠低时延通信、网络切片、大规模 MIMO 以及边缘计算等关键技术的实施方案进行分析。针对网络架构、系统安全、通信质量以及运行稳定等方面出现的问题，提出了对应的优化策略和解决办法，期望为推动 5G 技术与重载铁路的融合，为构建智能化且高效化的现代重载铁路通信系统提供参考。

【关键词】5G 技术；重载铁路；通信系统；网络切片；边缘计算

Application of 5G in China's heavy-haul railway communication system

Zhang Zhong

Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD. Yuanping Branch 034100

【Abstract】 Heavy-haul railways are a critical method for transporting bulk goods in China, and the reliability of their communication systems is directly related to transportation safety and efficiency. The commercial deployment of 5G technology can provide new technical support for upgrading and optimizing heavy-haul railway communication systems. This paper will focus on the application of 5G technology in heavy-haul railway communication systems, analyzing implementation plans for key technologies such as ultra-reliable low-latency communication, network slicing, large-scale MIMO, and edge computing. It proposes corresponding optimization strategies and solutions to address issues related to network architecture, system security, communication quality, and operational stability, aiming to promote the integration of 5G technology with heavy-haul railways and provide a reference for building intelligent and efficient modern heavy-haul railway communication systems.

【Key words】 5G technology; heavy-haul railway; communication system; network slicing; edge computing

党的十九大报告着重提及了“数字中国”以及“智慧社会”的建设工作，明确提出要把互联网、大数据、人工智能和实体经济进行深度融合。重载铁路是承担大宗货物运输任务的关键基础设施，它的智能化升级对于国家现代化建设而言是极为关键的一部分。近些年来，智慧铁路的发展离不开先进通信技术的支持，而 5G 技术的商用推广正好为重载铁路的智能化转型创造了良好机遇。从技术层面而言，5G 技术拥有高速率、低时延以及大连接等优势，可切实突破传统重载运输控制领域所面临的技术瓶颈，促使重载铁路朝着智慧化、安全化的方向不断发展。

一、5G 无线通信技术的发展概述

（一）技术内涵与基本架构

5G 无线通信技术是第五代移动通信技术的简称，它的基础架构是在 4G 网络演进的基础上搭建而成的。目前已经实现商用的 Release-15 标准确定了 5G 技术的核心框架，其

中涉及了提高移动宽带、海量机器类通信以及超可靠低时延通信这三大应用场景，5G 网络架构运用服务化设计理念，将控制面和用户面分开，借助网络功能虚拟化技术达成资源的灵活调度^[1]。在空口技术方面，5G 采用新型多址接入技术，将毫米波频段、大规模天线阵列等创新技术整合运用，使得通信系统的频谱效率有了一定程度的提升，基于新型网络架构，5G 技术可支持 20Gbps 以上的峰值传输速率，并且可以依据实际应用场景的需求灵活调整网络参数配置，为重载铁路通信系统的升级改造提供了较为可靠的技术支撑。

（二）系统特征与核心优势

5G 无线通信技术在系统特征方面呈现出诸多优势。其通信速率可达到 10Gbps 以上，契合了重载铁路对于大容量数据传输的需求。就时延性能而言，5G 技术可将端到端时延控制在毫秒级别，相比传统通信技术有明显优势，为列车运行控制以及安全监测赋予了实时响应能力，网络连接密度每平方公里可达百万级终端，足以契合铁路沿线密集分布的各类通信设备接入需求。在可靠性方面，5G 技术借助网络

切片、边缘计算等创新机制,达成了90%的系统可靠性,切实保障了重载铁路通信系统的稳定运行,另外5G技术在频谱效率和能源效率方面也取得了突破,相较于4G技术提升了3至5倍,有效降低了通信系统的建设与运营成本,这些技术特征和优势为重载铁路通信系统的智能化升级提供了有力的技术支撑^[2]。

(三) 铁路应用与发展态势

5G技术在铁路领域的应用正不断深入推进,已在列车运行控制、安全监测以及车地通信等多个方面开启实践探索^[3]。当下国内多条重载铁路线路均已着手开展5G专网建设工作,借助部署超密集异构网络,目的是为了达成列车运行状态实时监测、机车远程诊断等一系列智能化应用。未来,5G技术与人工智能以及大数据深度融合,推动重载铁路通信系统朝着智能化、自动化的方向不断演进。铁路系统对于5G技术的需求会从基础通信服务转向智能化综合服务,凭借搭建端到端的智能通信网络,达成列车运行控制的智能决策、安全预警的智能研判以及设备维护的智能诊断,5G技术的持续发展进步将提高重载铁路的运输效率与安全性,为智慧铁路建设筑牢坚实的技术根基。

二、5G技术赋能重载铁路的关键应用

(一) 低时延通信的系统部署

超可靠低时延通信技术也就是URLLC在重载铁路通信系统里的部署主要是面向列车运行控制对于实时性的要求,借助优化无线帧结构,运用迷你时隙以及灵活编码方案,URLLC技术可把空口时延控制在1毫秒以内,使得系统端到端时延降低到5毫秒以下。在网络架构层面,采用分布式部署模式,把核心网功能下沉到沿线边缘节点,减少数据传输路径,降低通信时延。并且基于预编码技术以及高级调度算法,系统可达成90%的可靠性传输,切实保障列车运行控制指令及时且可靠地传达,针对重载铁路特殊的通信场景,URLLC技术还凭借资源预留以及优先级调度机制,保证关键业务数据在高速移动状况下稳定传输,为列车安全运行给予可靠的通信保障^[4]。

(二) 网络切片的智能分配

网络切片技术借助虚拟化手段对物理网络资源给予逻辑分割,可为重载铁路的不同业务需求给予定制化服务。在实际开展部署工作时,系统会依据业务类型划分成列车控制切片、视频监控切片以及综合业务切片这三个独立的逻辑网络,列车控制切片运用高可靠且低时延的配置方案,预留专用的网络资源,以此保证控制指令可及时传达。视频监控切片针对大带宽传输需求,采用提高移动宽带配置的方法,保障高清视频可以实时回传,综合业务切片借助动态资源调度,灵活地契合车站调度、乘客信息等多样化服务需求,智

能分配机制依靠深度学习算法,实时评估业务需求的变化情况,自适应地调整切片资源配置,提升网络资源利用效率,为重载铁路的各类业务提供差异化服务保障。

(三) MIMO技术的协同优化

大规模MIMO技术应用于重载铁路通信系统时主要着重于对信号传输质量给予优化。沿线基站借助部署多通道天线阵列并结合波束赋形技术达成信号的定向精确覆盖,有效克服移速增高场景下多普勒效应所带来的影响。在信号处理方面系统运用空间复用技术以及干扰消除算法来提升频谱效率,让单小区传输容量提升至3至4倍。鉴于重载铁路有特殊的线性覆盖需求,MIMO系统采用分布式协同传输方案,相邻基站经过精确同步以及协同预编码来达成无缝切换与信号提高,另外自适应天线调度算法可依据列车位置和速度实时对波束方向进行优化,保证通信链路持续稳定,为重载铁路构建高质量的无线传输通道。系统还引入了智能天线阵列故障诊断机制,通过实时监测天线单元状态,快速识别和定位故障单元,确保MIMO系统的持续稳定运行。

(四) 边缘计算的集成应用

边缘计算技术在5G重载铁路通信系统里的集成应用主要是契合数据处理实时性的要求。于铁路沿线布置边缘计算节点,能使系统把计算以及存储资源延伸到网络边缘,达成数据的本地化处理,移动边缘计算平台可以在靠近数据源的位置处理列车运行状态数据、视频监控数据等业务信息,把端到端时延控制在毫秒级别的范围之内。在数据分流这一环节,边缘计算节点依据智能算法对业务数据开展分类处理,只把必要的数据上传至云端,降低网络传输负载,另外分布式边缘计算架构借助协同计算以及动态负载均衡,提高了系统处理能力与可靠性,为重载铁路智能化运营给予强大的本地计算支撑,切实解决了传统集中式架构所面临的时延和带宽瓶颈问题。

三、5G环境下通信系统的优化策略

(一) 网络结构的科学设计

重载铁路5G通信网络结构设计运用分层分区的架构模式,依据业务需求特点来科学规划,核心网层面开展控制面与用户面分离设计,借助网络功能虚拟化技术提高系统灵活性与可扩展性。接入网规划方面,沿线基站采取超密集组网方案,基站间距依照地形特点和覆盖需求优化配置,保证信号全线无缝覆盖。为应对高速移动场景的特殊需求,系统引入智能切换预测机制,达成基站间的快速切换以及负载均衡。传输网络层面,采用光纤与无线相结合的混合组网方案,构建双平面冗余传输体系,提高网络可靠性,并且网络结构设计充分考量了未来业务扩展需求,预留充足的带宽和接口资源,为重载铁路通信系统的持续演进给予架构支撑。网络

分区采用逻辑隔离技术,实现不同业务的独立承载,有效保障各类业务的服务质量。同时,系统引入智能网络拓扑自优化机制,根据业务流量分布和网络负载状况,动态调整网络结构,优化资源配置。通过人工智能算法实现网络拓扑的自适应优化,进一步提升网络性能和资源利用效率。

(二) 系统安全的全面提升

5G 重载铁路通信系统的安全防护运用多层次纵深防御体系,将技术措施与管理措施相结合,以此提升系统安全性。在网络安全层面,布置新一代防火墙与入侵检测系统,借助人工智能算法达成网络威胁的实时识别和防护,数据传输安全依靠端到端加密技术来保障,运用量子密钥分发等先进加密方案,保证关键业务数据的机密性与完整性。在身份认证环节,引入基于区块链的统一身份认证体系,搭配生物特征识别技术,构建严谨的访问控制机制,针对无线接入安全,系统采用动态频谱跳变和空口加密技术,有效预防无线信号劫持和干扰,构建完善的安全管理制度以及应急响应机制,定期开展安全评估与渗透测试,持续优化安全防护策略,为重载铁路通信系统的安全运行提供全面保障。此外,系统还建立了安全事件追溯机制,通过区块链技术记录所有安全操作日志,实现安全事件的可追溯性。同时,引入智能安全态势感知系统,对整个网络的安全状态进行实时监测和评估,提前发现潜在安全威胁,实现主动防御。

(三) 通信质量的有效保障

5G 重载铁路通信系统的质量保障机制构建于端到端 QoS 框架之上,借助多维度的质量监控以及优化举措来保证通信服务的质量,该系统针对不同的业务类型制定出有差异的服务质量标准,以此为列车控制、视频监控、数据采集等业务给予精细化的 QoS 保障。在资源调度方面,运用智能化的业务识别与分类技术,联合动态优先级管理机制,保证关键业务在网络出现拥塞状况时依旧可获取稳定的服务质量。通信链路质量监测运用人工智能算法,实时剖析信号强度、时延、丢包率等关键指标,并且依靠预测性维护手段提前察觉潜在故障,在传输质量优化方面,系统引入自适应编码调制技术,依据信道状况动态调节传输参数,提高链路可

靠性,构建完善的质量评估体系,借助持续的数据采集与分析,形成闭环优化机制。在网络边缘部署智能探针,达成通信质量的精准监测以及故障定位,配合自动化运维平台,迅速响应和处理各类质量问题,为重载铁路通信系统提供稳定可靠的服务保障。

(四) 运行稳定的持续优化

5G 重载铁路通信系统运行稳定性的优化是基于智能化运维平台来开展的。借助数据驱动的分析决策机制,不断提高系统的可靠性,运维平台运用人工智能算法对大量运行数据做深入挖掘,搭建网络健康评估模型,达成故障的精确预测以及预防性维护^[5]。在网络架构方面,系统部署双平面冗余备份机制,关键节点和链路都采用 1+1 保护方案,保障设备或链路出现故障时业务可快速切换并恢复。针对高速移动场景的特殊要求,对基站切换算法和资源调度策略进行优化设计,降低切换失败率和业务中断概率,系统运行状态监控采用分布式架构,在网络边缘布置智能探针,实现故障的快速定位与自动化处理,并且构建完善的应急响应机制,结合智能化决策支持系统,制定最佳故障处理方案,缩短故障恢复时间。借助持续的数据积累以及经验总结,系统持续优化运维策略和处理流程,形成闭环改进机制,为重载铁路通信系统的稳定运行给予可靠保障。

结束语

综合来看,5G 技术于重载铁路通信系统里的应用已呈现出较强的技术优势以及发展潜力,给铁路运输智能化升级给予了有力支持。随着 5G 技术不断演进以及深入应用,重载铁路通信系统会朝着速率更高、时延更低、智能化程度更高的方向发展。未来需加速 5G 技术同人工智能、大数据、物联网等新兴技术的融合,打造智能化、自动化的铁路运输体系。相信在各方共同努力下,5G 赋能的重载铁路通信系统定会为我国智慧铁路建设注入新的动力,促使铁路运输行业朝着更高质量、更高效的方向前进。

参考文献

- [1]王巍,贾冠伟,刘志,等.重载铁路通信安全生产管理系统研究[J].铁道运输与经济,2023,45(11):58-64.
- [2]付文刚,沈红涛,田亮,等.重载铁路数据通信网络资源管理系统研究[J].铁道运输与经济,2023,45(11):65-72+79..
- [3]庞萌萌.5G-R 无线通信系统承载重载铁路机车同步操控业务研究[J].铁道通信信号,2023,59(10):1-7.
- [4]付文刚,刘畅,杨居丰.基于 LTE 技术重载铁路移动闭塞通信系统研究及应用[J].铁道通信信号,2018,54(05):47-49+53.
- [5]熊洁,虞凯.TD-LTE 技术在朔黄重载铁路中的应用[J].铁路通信信号工程技术,2015,12(01):20-24.

作者简介:张钰(1997.02-)男,山西朔州人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:铁路通信专业。