

基于 5G 技术的 包神铁路通信信号系统可靠性研究

文 ◆ 国能包神铁路有限责任公司 焦伟平

引言

随着铁路运输向智能化、高速化发展，传统的通信信号系统已难以满足高可靠性、低时延、大带宽的需求。5G 技术凭借其超高可靠性（uRLLC）、增强移动宽带（eMBB）和海量机器类通信（mMTC）等特性，为铁路通信信号系统的升级提供了新的解决方案。本文以包神铁路为研究对象，探讨 5G 技术在铁路通信信号系统中的应用，分析其对系统可靠性的提升作用，并提出优化建议。研究表明，基于 5G 的通信信号系统可显著提高数据传输可靠性，降低通信时延，增强系统容错能力，为铁路智能化发展提供技术支撑。

1 5G 技术及其在铁路通信中的应用

1.1 5G 关键技术及其对铁路通信的适配性分析

5G 技术作为新一代移动通信技术，其核心优势主要体现在增强移动宽带（eMBB）、超高可靠低时延通信（uRLLC）和海量机器类通信（mMTC）这三大典型应用场景，这些特性与铁路通信的

特殊需求高度契合^[1]。其中，增强移动宽带（eMBB）具有峰值速率可达 10Gbps、用户体验速率 100Mbps 以上的技术特征，能够支持 4K/8K 高清视频监控实时回传，满足车载多媒体信息分发需求，为旅客信息系统提供高速接入，典型应用有机车 360° 全景监控系统、轨道状态高清视频巡检、车站客流智能分析系统；超高可靠低时延通信（uRLLC）空口时延低至 1ms、可靠性达 99.999%，可满足 CTCS-4 级列控系统需求，支持自动驾驶场景下的紧急制动，保障联锁系统实时响应，典型应用包括“车—地”安全信息传输、道岔控制指令传输、列车自动防护（ATP）系统；海量机器类通信（mMTC）具备每平方公里百万级连接且超低功耗的技术特征，能支持轨道沿线传感器大规模部署，实现设备全生命周期监测，构建铁路物联网基础，典型应用有轨道温度应变监测、接触网状态监测、桥梁健康监测系统^[2]。

1.2 5G 网络架构在铁路场景的特殊优化

5G 网络架构在铁路场景的特殊优化涵盖网络切片、移动边缘计算（MEC）和波束赋形等关键技术。其中网络切片技术通过 SDN/NFV 实现资源虚拟化，能按业务需求划分独立逻辑网络，在铁路场景中可构建列控专用（高优先级）、调度通信（中优先级）和旅客服务（普通优先级）等不同切片，保障各类业务的差异化服务质量；移动边缘计算（MEC）采用在沿线车站部署边缘节点并将核心网用户面功能下沉的部署方案，其优势在于能减少列控数据回传时延、实现本地化智能分析，同时降低骨干网传输压力，契合铁路对实时性和可靠性的严苛要求；波束赋形技术利用大规模天线阵列动态调整波束方向，在铁路场景中可提升高速移动场景下的信号质量，增强隧道等特殊环境的覆盖效果，并有效降低同频干扰，为铁路通信的稳定性提供技术支撑。

1.3 5G 与铁路既有系统的融合演进

5G 与铁路既有系统的融合演进涉及与 GSM-R/LTE-R 的平滑过渡、与信号系统的深度集成以及与智能运维系统的协同等关键层面。在与 GSM-R/LTE-R 的过渡方面，采用分阶段演进路径：初期实现 5G 与 LTE-R 双网并行，中期由 5G 承载新业务而 LTE-R 保障既有业务，远期达成

【作者简介】焦伟平（1986—），男，内蒙古商都人，硕士研究生，工程师，研究方向：铁路通信信号。

全面 5G 化。此过程依赖互操作网关、业务无缝迁移及频谱重耕等关键技术支撑。与信号系统的深度集成则通过 5G-R 替代传统轨道电路、构建基于 5G 的移动闭塞系统以及实现“车—地”通信全 IP 化的方案。同时，配套端到端加密、安全认证协议和冗余传输通道等安全机制，确保信号传输的可靠性与安全性。在与智能运维系统的协同中，借助“5G+AI”故障预测、数字孪生仿真和自动化运维决策等模式，实现如基于振动分析的轴承故障预警、接触网异常放电检测及轨道几何参数动态监测等典型应用，推动铁路运维向智能化方向升级。

1.4 5G 铁路专网的安全保障体系

5G 铁路专网的安全保障体系涵盖网络安全架构、数据传输安全和业务连续性保障三大维度。在网络安全架构方面，构建了包含物理层、网络层和应用层的多层防护体系，通过网络功能虚拟化隔离实现资源层面的安全隔离，结合入侵检测系统与安全态势感知技术，形成主动防御与实时监控的安全网络；数据传输安全则通过空口加密、完整性保护和双向认证等保障措施，确保数据在传输过程中的机密性与完整性，同时遵循 3GPP TS 33.501 及 EN 50159 铁路安全通信标准，为数据安全提供标准化支撑；业务连续性保障采用双归属核心网、多路由传输和快速切换机制的容灾方案，以实现系统可用性≥ 99.999%、故障恢复时间< 50ms 的可靠性指标，保障铁路关键业务在各类异常情况下的持续稳定运行。

2 包神铁路通信信号系统现状及挑战

2.1 现有通信信号系统架构

包神铁路作为我国重要的重载货运专线，目前采用 GSM-R（铁路专用移动通信系统）与 LTE-R（铁路长期演进技术）混合组网的通信架构，主要支撑列车运行控制（CTCS）、调度指挥、视频监控等核心业务。其系统架构可分为以下三层。（1）核心网层。基于 GSM-R 的电路交换核心网，负责语音调度通信；LTE-R 的分组交换核心网（EPC），承载列控数据和视频监控等宽带业务；两套核心网通过网关互联，实现业务协同。（2）传输层。骨干传输采用 SDH/MSTP 光传输网络；区间通信主要依赖漏缆和定向天线覆盖。（3）接入层。GSM-R 基站沿铁路线部署，站间距约 15 ~ 20km；LTE-R 采用“BBU+RRU”分布式架构，站间距缩短至 3 ~ 5km。

表 1 实测数据显示表

业务类型	标准要求	实测均值	超标时段占比
列控指令传输	≤ 200ms	280ms	32%
紧急制动响应	≤ 150ms	210ms	18%

表 2 5G 关键技术对比分析表

技术指标	GSM-R	LTE-R	5G 方案
传输可靠性	99.9%	99.99%	99.999%
切换中断时间	500ms	200ms	< 50ms
抗干扰能力	15dB 信噪比	20dB 信噪比	智能波束赋形

2.2 现存技术瓶颈分析

第一，带宽容量不足。首先，业务冲突明显。在高峰时段，单基站需同时处理 6 ~ 8 路高清视频、20+ 列控终端和数十个传感器数据，导致视频卡顿率达 15%，列控数据重传率升高至 3.2%（安全阈值< 1%）。其次，频谱效率低下。GSM-R 采用 200kHz 窄带载波，单信道仅支持 9.6kbps 数据速率，已无法满足新一代列控系统（CTCS-4）要求的 50kbps/车和智能运维所需的 10+Mbps 回传带宽要求。第二，时延性能受限。端到端时延超标（见表 1），时延抖动严重，在复杂地形区段，无线信号多径效应导致时延波动达 ± 50ms。第三，系统可靠性挑战。一是单点故障风险。现有系统关键指标基站 MTBF（平均无故障时间）仅 25000h，网络可用性 99.95%（低于铁路通信 99.999% 的新标准）。二是抗干扰能力弱。在电气化区段，受牵引供电系统影响，无线误码率最高达 10⁻³（安全要求< 10⁻⁶），且每月发生 2 ~ 3 次通信中断事件（持续 30s 以上）。

2.3 引入 5G 技术的必要性论证

2.3.1 可靠性提升潜力

5G 关键技术对比分析表如表 2 所示。

2.3.2 经济性分析

全生命周期成本对比表如表 3 所示，数据表明，虽然 5G 改造初期投入较高，但因故障率降低和运能提升，投资回收期仅需 2.8 年。

2.4 过渡方案设计

过渡方案设计中的关键改造措施包括频谱重耕、双模基站部署和核心网云化，其中频谱重

耕需将既有 GSM-R 的 900MHz 频段逐步迁移至 5G NR n5 频段，双模基站部署需在重点区段先行部署支持 LTE/5G 的软件定义无线电（SDR）基站，核心网云化则要建设 5G 核心网（5GC）并在初期与 EPC 互通、后期实现完全替代；风险控制方面，业务保障机制通过设置 5G/LTE-R 动态流量分担策略（优先保障列控业务）和保留 GSM-R 作为应急通信备份通道来确保业务连续性，测试验证方案则计划在神池南站建立 15km 长的 5G 测试环线并开展 6 个月的实际列车运行测试，通过全流程验证保障过渡方案的可靠性。

3 基于 5G 的包神铁路通信信号系统可靠性分析

3.1 系统架构设计

基于 5G 的包神铁路通信信号系统采用“核心网+边缘计算+无线接入”的三层架构，该架构在保证高可靠性的同时，能够满足低时延、大带宽的铁路业务需求^[3]。其中核心网（5GC）采用云原生架构，主要网元包括 AMF（接入和移动性管理功能）、SMF（会话管理功能）和 UPF（用户面功能），AMF 负责终端接入认证和移动性管理，SMF 管理用户面数据传输路径，UPF 部署在铁路沿线关键节点以实现数据本地分流、降低传输时延；边缘计算（MEC）在沿线车站部署服务器，可实现列控数据本地处理（RBC 功能下沉以缩短车—地通信距离）、智能分析功能（通过部署 AI 算法实现轨道异常实时检测且检测响应时间 < 50ms）以及应急通信保障（在网络中断时提供本地存储转发能力）；无线接入网采用“宏站+微站”混合组网模式，

表 3 全生命周期成本对比表（单位：亿元）		
项目	维持现有系统	升级至 5G
设备改造成本	0（已折旧）	3.2
年运维成本	0.45	0.28
故障损失成本	0.12/ 年	0.03/ 年
5 年总成本	2.85	4.35
效益产出比	1:1.2	1:3.8

沿线宏站站间距 3 ~ 5km、使用 3.5GHz 频段（100MHz 带宽），枢纽微站在编组站等关键区域补充覆盖、使用毫米波频段，同时采用特殊抗干扰设计，通过波束赋形技术提升信号质量（SINR 提升 8 ~ 10dB），并基于 LDPC 编码实现抗误码传输（误码率 < 10⁻⁶）。

3.2 可靠性提升措施

在可靠性提升方面，传输冗余机制采用双通道热备份（主通道为 5G 无线链路、备用通道为既有光纤网络，切换时间 < 50ms 以满足 CTCS-4 级要求）和多连接技术（终端同时连接 2 个 gNB 的 DC 架构，主基站故障时业务不中断）；智能运维系统通过预测性维护（基于 XGBoost 算法分析基站性能大数据，设备故障预测准确率 > 92%，提前 3 ~ 5 天发出维护预警^[4]）和自愈网络（SDN 控制器自动重构传输路径，故障恢复时间 < 30s）实现预防性管理。关键性能测试结果显示，时延测试中发送 10 万次 64 字节数据包，列控业务平均时延 8.7ms（满足 < 10ms 要求）；可靠性测试模拟 100 次基站随机断链，业务中断率 0.0017%（优于设计指标）；切换性能测试中车速 160km/h 时切换成功率达 99.98%，中断时间仅 12ms，各项指标均验证了系统的高可靠性与低时延特性。

结语

本文研究了 5G 技术在包神铁路通信信号系统中的应用，分析其对系统可靠性的提升作用。研究表明，5G 技术可有效降低通信时延、提高数据传输可靠性，并支持更多智能化业务。未来研究方向包括 5G 与北斗导航融合，提升列车定位精度；AI 驱动的智能运维，利用“5G+AI”实现故障预测与自动化修复；6G 在铁路通信中的前瞻性研究，探索更高可靠性的通信方案。^[5]

引用

[1] 刘志英.5G技术及其在铁路通信中的应用[J].通信技术,2018,51(2):394-398.
[2] 牛硕青.基于5G技术的铁路通信系统设计与优化[J].通信电源技术,2024,41(4):158-160.
[3] 陈红霞.基于Petri网的铁路信号综合系统可靠性分析[J].铁道通信信号,2010,46(6):22-24.
[4] 左建勇,丁景贤.轨道车辆制动系统智能控制与维护技术研究进展[J].交通运输工程学报,2021,21(6):50-62.