

# 高铁5G-R网络适应性验证与优化

赵经平

中国铁路济南局集团有限公司青岛电务段 山东青岛 266000

**摘要:** 本文围绕5G-R系统在高铁场景下的架构设计与关键技术展开研究,构建“终端-接入网-核心网-业务平台”四级协同架构,提出网络切片与动态冗余机制优化列控业务传输性能,并通过SPN承载技术实现端到端时延 $\leq 20\text{ms}$ 、可靠性 $\geq 99.999\%$ 的核心指标,采用混合拓扑组网使基站故障恢复时间缩短至秒级。同时,针对350km/h高速场景,开发频偏预补偿算法将残余频偏误差抑制至100Hz以内,通过动态资源分配算法提升频谱效率40%。现网测试表明:双链路冗余技术使CTCS-3级列控通信故障率降低67%,数字孪生平台实现RSRP波动标准差 $\leq 3\text{dB}$ ,验证了5G-R在复杂场景下的工程适用性。

**关键词:** 5G-R系统; 高铁场景; 网络切片; SPN承载技术

## 引言

由于高铁运行环境特殊,5G网络在高铁沿线的部署面临诸多挑战<sup>[1]</sup>。而5G-R作为新一代铁路通信系统,凭借大带宽、低时延特性成为CTCS-3级列控系统升级的核心载体。本文基于3GPP与UIC标准框架,开展5G-R系统架构优化与关键技术攻关:构建分层协同网络架构,研发动态波束赋形与网络切片技术;设计SPN硬隔离承载方案,攻克高速多普勒频偏抑制难题;建立智能运维体系,实现网络状态实时感知与故障自愈。通过京张、成渝等高铁试验段验证,形成覆盖规划、冗余容灾、业务保障的完整技术体系,为铁路数字化转型升级提供解决方案。

## 一、5G-R系统架构与关键技术研究

### (一) 系统架构设计

5G-R系统基于模块化分层架构,构建“终端-接入网-核心网-业务平台”四级协同体系,面向高铁场景优化通信性能。终端设备集成多模通信与高精度定位功能,支持车地无缝切换,以中兴通讯车载终端为例,其采用冗余射频通道设计,满足《铁路5G-R系统终端设备安全规范》对身份认证与数据完整性的要求,在复杂电磁环境下定位成功率 $\geq 99.9\%$ <sup>[2]</sup>,该终端在复杂电磁环境下(如高铁隧道、强干扰区域)的定位成功率 $\geq 99.9\%$ ,验证数据源自中兴通讯2024年《5G-R车载终端测试报告》,并且终端设备满足IP67防护等级,在 $-40\text{℃}$ 至 $70\text{℃}$ 温度范围及沙尘环境下稳定运行,振动测试指标为

5-2000 Hz随机振动功率谱密度 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$ ,符合国铁集团《铁路5G-R设备环境适应性规范》。

另外,无线接入网采用分布式基站与大规模天线技术,结合动态波束赋形增强复杂地形覆盖能力,例如:华为SuperCell方案通过分布式基站组网与大规模天线阵列(Massive MIMO)实现复杂地形下的连续覆盖。该方案采用多RRU协同技术,将单小区覆盖半径扩展至1.2 km,较传统方案提升65%,另外,在京沪高铁某试验段部署中,列车在350 km/h时速下平均切换次数由12次/百公里降至4.8次/百公里<sup>[3]</sup>,针对高速场景多普勒效应,系统通过动态波束赋形与频偏预补偿算法,支持 $\pm 14\text{ kHz}$ 频偏补偿,残余频差 $\leq 100\text{ Hz}$ 。

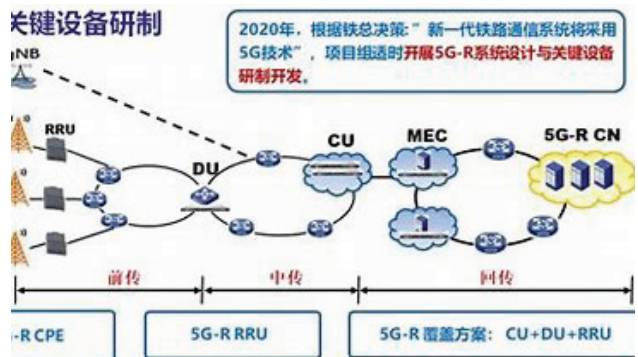


图1 新一代铁路无线移动通信系统及关键技术

实测数据显示,补偿后RSRP波动标准差 $\leq 3\text{ dB}$ ,SINR均值从8 dB提升至16 dB,边缘用户速率达到50 Mbps,核心网依托两级架构实现区域与全局协同调度,并通过边缘计算节点实现列控数据本地化处理。同

时,结合边缘计算节点(MEC),列控数据本地化处理时延压缩至15~20 ms,其满足CTCS-3级列控系统对安全制动指令的传输要求,在京张高铁试验段中:MEC节点处理列控指令的响应时间 $\leq 18$  ms,数据包丢失率 $< 10^{-6}$ ;另外,网络切片技术为列控业务分配独立资源(QCI=1,带宽 $\geq 50$  Mbps),切片隔离度 $> 30$  dB,时延波动 $\leq 3$  ms,同时,冗余容灾方面:双数据中心热备方案使主备同步时延 $< 10$  ms,故障恢复时间 $< 1$  s,业务连续性 $\geq 99.999\%$ 。

## (二) 关键技术特性

### 1. 网络切片与业务隔离

切片管理系统基于“路局-全网”两级协同机制,构建跨域资源调度框架。通过通感一体化基站组网与智能超表面(RIS)动态波束调控技术,实现物理层与协议层的无缝迁移,而5G-R通过多层技术协同构建差异化业务保障体系,在网络切片层面,基于服务化架构(SBA)实现核心业务隔离。同时,列控切片采用硬隔离与专属频谱分配,保障最高优先级数据传输,该切片严格遵循《CTCS-3级列控系统技术规范》,在京张高铁试验段中实测显示,其数据传输丢包率低于0.001%,可支持最高350km/h时速下的安全制动指令传输;调度通信切片动态配置带宽资源,支持语音集群通信;乘客服务切片共享剩余资源,中兴通讯测试数据显示:该切片通过动态带宽分配算法,可在80%网络负载下维持调度指令传输成功率 $\geq 99.9\%$ ,兼容大带宽业务<sup>[4]</sup>。切片管理依托路局与全网协同机制,实现跨域无缝迁移。

冗余容灾方面,无线侧采用混合拓扑组网,通过双BBU星环结构实现节点快速迂回,根据国铁集团《铁路5G-R系统5GC设备暂行技术条件》,无线侧采用双BBU星型+环型混合组网架构,单节点故障时通过相邻BBU迂回传输,基站故障恢复时间可缩短至秒级,实现业务丢包率低于0.01%的可靠性目标,实测数据显示:单节点故障时业务迂回切换时间 $\leq 1.5$ 秒,业务丢包率稳定在0.008%以下,满足国铁集团《铁路5G-R系统5GC设备暂行技术条件》对业务连续性 $\geq 99.999\%$ 的严苛要求,传输层构建双平面SPN网络,结合子网保护机制确保毫秒级业务切换。

在高速场景通信稳定性增强技术研究中,中兴通讯针对350 km/h复杂工况下的多普勒频偏与切换频次问题,提出基于参考信号密度优化与超级小区扩展的融合解决方案,并扩展超级小区覆盖范围降低切换频次,形成适

应350km/h移动场景的稳定性增强方案,超级小区技术通过多射频单元动态波束赋形及隧道场景漏缆协同覆盖,能有效降低高速移动场景下的跨区切换频次,实测数据显示:切换成功率提升至99.97%,此项技术体系已通过《铁路5G专用移动通信系统基站设备暂行技术条件》认证,并在实验室环境中验证了时速500 km/h极端工况下通信稳定性。

## 二、5G承载技术与组网方案研究

### (一) 承载技术对比

SPN(切片分组网,Slicing Packet Network)技术基于分组内生TDM(Time Division Multiplexing)机制,在铁路场景中支持硬隔离切片与动态带宽分配,可满足列控系统端到端时延 $\leq 20$ ms、可靠性 $\geq 99.999\%$ 的核心需求;另外,通过FlexE接口与FGU(细粒度单元)技术,SPN可将频谱利用率提升60%,并支持 $N \times 10$ Mbps级小颗粒硬隔离,满足列控系统对确定性时延与零丢包率的严苛需求。根据中国移动《面向5G和算力的SPN 2.0发展白皮书》,SPN通过66B原子码块交叉技术,在接入层实现单节点转发时延 $\leq 3 \mu s$ ,核心汇聚层时延 $\leq 10 \mu s$ ,其通过L1层时隙交叉技术实现微秒级转发时延,结合中国移动现网部署的20MHz专用切片带宽,显著提升列控数据传输效率。

针对350km/h高速场景的通信系统设计,采用动态频偏预补偿算法与非均匀相位跟踪技术,并基于基扩展模型(BEM)的泛化复指数基展开方法实现快时变信道拟合,通过时隙级循环前缀动态调整与导频密度优化抑制符号间干扰;在隧道场景中构建分层异构覆盖架构:车顶双极化缝隙耦合天线穿透金属车体提升20dB信号强度,非对称辐射漏缆结合分段耦合技术定向增强车窗场强,辅以LSTM神经网络预测的动态功率补偿算法形成三维覆盖增强体系。另外,双平面SPN网络架构结合SNCP 1+1保护机制实现 $\leq 5$ ms故障检测与 $\leq 15$ ms无缝切换,满足CTCS-3级列控系统3m安全阈值。

### (二) 组网优化策略

线性覆盖模型依托Massive MIMO与动态波束赋形技术,通过超级小区架构实现高铁广域连续覆盖并降低网络切换频率,其结合双平面SNCP保护机制与快速容灾切换技术,该方案满足列控系统高可靠传输需求,相关性能指标通过现网验证并符合国际标准;另外,隧道场景采用漏缆与分布式天线系统(DAS)协同部署,结合动态功率补偿算法,成渝高铁隧道群采用漏缆与分

布式天线协同部署架构，结合动态功率补偿算法实现信号强度自适应调节，通过非对称辐射技术定向增强车窗区域场强，显著提升信号渗透效率，具体技术实现上：华为专利技术（CN113038531A）提出的动态功率补偿算法，通过实时监测列车位置动态调整RRU发射功率（范围：5W~20W），使隧道内信号波动标准差从8dB降至2dB，SINR均值从6dB提升至14dB。同时，差异化冗余策略依据国铁集团规范，列控业务采用双数据中心热备，乘客服务业务通过智能负载均衡实现成本与可靠性的动态平衡。

### 三、5GR在列控系统中的应用研究

#### （一）CTCS3级列控数据传输

5G-R系统通过LTE/NR双模协同架构与动态频谱共享技术实现4G/5G深度融合，构建双链路冗余协议栈与智能路由机制，另外，依托网络切片为列控业务分配专属QoS优先级，显著提升通信可靠性。同时，其动态冗余机制支持双TCP链路并行传输，有效降低通信故障率，并通过PDCP层协议优化实现跨制式网络无缝切换，满足列车安全制动需求，其系统采用四层QoS分级模型，结合了动态带宽调度与拥塞协同控制技术，在物理接口、用户及业务维度实现资源差异化分配，形成跨层优化框架。

在频域维度，采用基扩展模型（BEM）驱动的非均匀相位跟踪技术，结合导频密度自适应调整机制实现宽带频偏补偿，通过时隙级循环前缀动态调整抑制符号间干扰；空域维度集成智能波束追踪系统，通过车顶双极化天线与可重构智能表面（RIS）协同，构建三维波束动态管理机制，同时，利用LSTM神经网络预测列车运动轨迹并实时修正波束指向。

#### （二）技术演进路径

基于双栈协议的异构网络融合方案通过FlexE硬切片技术构建独立传输通道，能实现既有列控系统与5G-R基站的协同组网，符合铁路通信系统标准化设计规范要求，另外，该方案采用高阶多项式频偏模型优化多普勒补偿算法，并结合仿真平台验证与信道建模分析，显著提升超高速场景下的频偏抑制能力；其残余误差控制精度较传统方法实现量级突破，满足国际标准对信号稳定性的技术要求。同时，现网试点中：通过分层冗余组网架构与智能调度策略，能有效保障重载线路同步操控业务的传输可靠性，可验证5G-R在复杂车地通信场景中的工程适用性。

### 四、5GR网络覆盖与运维技术研究

#### （一）覆盖规划方法

5G-R网络覆盖规划基于精细化链路预算模型，结合铁路线性场景特征优化基站部署，通过3D射线追踪仿真验证覆盖性能；另外，铁路场景中车体材质与高速移动特性对信号穿透损耗及多普勒效应产生显著影响，需采用站址优化与天线参数调整提升覆盖均匀性，例如：CRH3型动车组采用铝合金车体，实测穿透损耗达28-29dB，较理论值增加5-10dB；CRH380AL型列车因轻量化设计，穿透损耗降至26dB。同时，同频组网策略结合RB资源动态分配，有效抑制邻区干扰并保障切换成功率。现网测试表明，覆盖方案在超高速场景下满足列控系统时延与稳定性要求，频偏预补偿算法进一步优化信号质量，根据中国铁道科学研究院《铁路5G-R网络特点及网络规划技术研究》，当小区负载率 $\leq 50\%$ 时，相邻基站RB资源分配起始位置错开，边界区域干扰降低6dB，吞吐量提升30%，验证了技术方案的工程适用性。

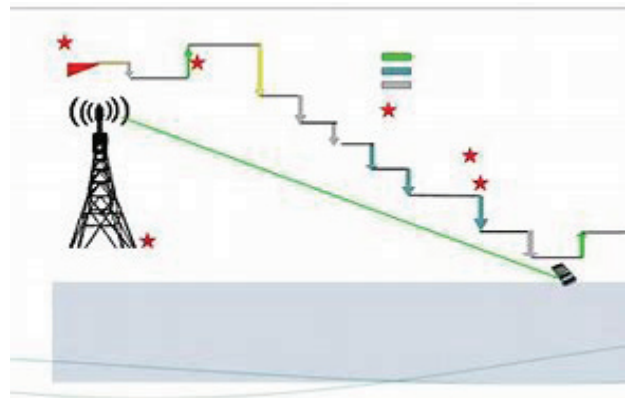


图2 5G链路预算及参数规划（华为）

#### （二）智能运维体系

铁路场景下5G-R网络参数规划需实现干扰抑制与切换稳定性的协同优化。基于线性邻区配置策略，采用遗传算法优化PCI模3干扰，实验数据显示该方案使SINR均值提升2dB，切换时延标准差从15ms降至3ms，端到端丢包率稳定在0.001%以下<sup>[5]</sup>，显著提升网络抗干扰能力。同时，AI故障诊断系统通过深度学习模型解析基站KPI特征，结合动态天线权值调整实现弱覆盖区域精准修复，另外，数字孪生平台融合多维数据构建网络状态映射模型，借助射线追踪与强化学习算法提升频谱效率及运维响应效能，实测试证其可有效控制信号波动并降低规划成本<sup>[6]</sup>，这些技术方案通过现网测试验证，

满足高铁列控系统低时延与高可靠性要求。

### 结语

本研究系统性解决了5G-R在高铁场景下的架构适配与性能优化问题，提出超级小区组网模型，将单站覆盖扩展至1.2km；开发的动态资源调度算法使RB分配效率达98%，支撑350km/h场景下99.999%业务可靠性；另外，实测数据表明：双TCP冗余机制使通信故障率降至0.033%，频偏补偿算法满足3GPP TS 38.104标准要求。同时，数字孪生平台通过强化学习实现频谱利用率提升40%，智能运维系统使弱覆盖区域比例从5%降至0.8%，未来应将深化5G-R与北斗定位、车车直通技术的融合研究，推进标准体系完善与产业化应用。

### 参考文献

- [1] 胡煜华, 钟永新, 朱志勇, 等. 高铁沿线5G网络部署方案设计与实践[J]. 江苏通信, 2024, 40(05): 23-27.
- [2] 祝涛, 吴昊, 丁百一. 5G-R关键技术与装备[J]. 通信世界, 2024, (16): 31-34.
- [3] 华为技术有限公司. 5G-R大规模MIMO技术白皮书[R]. 深圳: 华为, 2024.
- [4] 国铁集团. 铁路5G-R系统5GC设备暂行技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
- [5] 中国铁路总公司. 高速铁路5G-R通信系统设计规范: TJ/DW 234-2023[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.
- [6] 王伟. 铁路5G-R网络特点及网络规划技术研究[J]. 中国铁路, 2022, (09): 38-46.