

# 高速铁路无线通信公网融合设计要点

张佳琳

通号工程局集团有限公司天津分公司 天津 300000

**摘要:** 高速铁路无线通信涵盖运营管理与旅客服务需求,有严格性能指标,且覆盖场景复杂。公网在架构、服务目标等方面有差异,融合技术分网络架构、频谱资源、业务层三类,依赖网络切片等关键技术。设计要点包括网络架构秉持“共享协同、隔离安全”原则,频谱资源结合业务精准配置,覆盖增强针对场景定制策略,移动性管理保障通信连续,安全与可靠性设计采用分层防护与冗余备份机制,以实现高效稳定通信。

**关键词:** 高速铁路;无线通信;公网与专网融合

引言:在高速铁路飞速发展的当下,无线通信作为保障列车安全运行与提升旅客服务体验的关键支撑,面临着业务需求多样、性能指标严苛、覆盖场景复杂等诸多挑战。公网与专网在架构、服务目标等方面存在显著差异,而公网融合成为提升通信效能的有效途径。深入探讨高速铁路无线通信公网融合的设计要点,对于构建高效、稳定、安全的通信网络,推动高铁事业高质量发展具有重要意义。

## 1 高速铁路无线通信需求分析

### 1.1 业务需求分类

高速铁路无线通信业务需求围绕运营管理与旅客服务两大核心展开分类。运营管理类业务涵盖列车运行控制、调度指挥、行车安全监控等关键场景,其中列车运行控制业务需实现车地间实时指令传输,调度指挥业务要求支持多终端协同通信,行车安全监控业务需稳定传输视频监控与传感数据。旅客服务类业务包括高速上网、视频通话、流媒体播放等,随着5G技术普及,旅客对4K/8K视频、云游戏等大带宽业务需求显著提升<sup>[1]</sup>。另外,还包含应急通信业务,需在设备故障、自然灾害等突发情况下,保障语音、数据与视频的优先级传输,确保应急处置指令快速传达,同时兼顾铁路运维的设备远程诊断、人员定位等辅助业务需求,各类业务形成相互支撑的需求体系。

### 1.2 性能指标要求

高速铁路无线通信性能指标要适配高速移动场景。时延上,列车运行控制业务端到端时延须在50毫秒内,保障指令实时响应;调度指挥与应急通信时延不超100毫秒;旅客服务类业务时延可放宽至200毫秒内,满足流媒体播放需求。带宽方面,运营管理类业务单列车约5-10Mbps,旅客服务类按每列车800人算,人均带宽要达20Mbps以上。可靠性要求极高,运营关键业务通信中断

概率低于10的-6次方,旅客业务不超10的-3次方,切换成功率达99.9%以上,还要满足抗干扰、低误码率等。

### 1.3 覆盖场景挑战

高速铁路无线通信覆盖面临多样场景带来的复杂挑战。桥梁场景中,金属结构易产生信号反射与屏蔽,导致信号叠加干扰或覆盖盲区,且桥梁跨度较大时,中间区域信号衰减明显,需解决远距离传输问题。隧道场景是覆盖难点,封闭空间内信号传播损耗大,多隧道连续排布时,隧道间切换易出现中断,同时隧道内湿度、粉尘环境会影响设备稳定性。路基地段虽无明显屏蔽,但地形起伏可能导致信号阴影区,且沿线树木、建筑物会造成信号遮挡。高速移动导致多普勒频偏效应显著,列车时速350公里以上时,频偏值大幅增加,影响信号解调质量。

## 2 高速铁路无线通信公网融合技术基础

### 2.1 公网与专网技术对比

高速铁路公网与专网在技术架构和服务目标上差异明显。架构上,专网采用独立组网,核心网与接入网专为铁路设计,网络拓扑简单、层级少,便于集中管控;公网分层组网,核心网按区域部署,接入网覆盖广,拓扑复杂但扩展性强。服务目标上,专网聚焦铁路运营安全,优先保障列车控制、调度等关键业务,服务范围限于铁路沿线及运营区域;公网以公众通信服务为核心,满足多样化需求,覆盖城市、乡村及交通干线。技术参数上,专网带宽稳定但速率低、时延控制严、切换策略定制;公网带宽动态、峰值速率高、时延要求宽松、切换适配多场景。安全机制上,专网用独立加密协议与访问控制,公网采用通用架构,加密等级有差距。

### 2.2 融合技术分类

高速铁路公网融合技术按层次分三类。网络架构融合有核心网共享与无线接入网协同,核心网共享借虚

虚拟化技术建统一平台，共用硬件资源并逻辑隔离保障业务独立；无线接入网协同是专网与公网基站共站、共享天馈，用干扰协调技术减少冲突、实现覆盖互补。频谱资源融合含共享频段与动态分配，共享频段是专网与公网在指定频段分时复用；动态分配依业务负载实时调整，运营高峰向专网倾斜，旅客高峰增加公网频段占比。业务层融合有QoS优先级管理与跨网切换，QoS将列车控制业务设最高优先级，依次分配其他业务；跨网切换用无缝技术，实现列车进出隧道等场景的平滑过渡。

### 2.2.1 网络架构融合（核心网共享、无线接入网协同）

网络架构融合的核心在于核心网共享与无线接入网协同的深度适配。核心网共享采用云原生虚拟化技术，搭建统一的云核心网平台，将铁路专网的控制面与用户面功能模块和公网模块部署于同一硬件资源池，通过网络切片技术实现逻辑隔离，确保专网业务数据不与公网数据交互，同时共享计算、存储与传输资源，降低重复建设成本<sup>[2]</sup>。无线接入网协同推行基站共站址部署模式，在铁路沿线基站站点同时部署专网与公网基站设备，共享铁塔、电源、天馈系统等基础设施，通过统一的接入网管理平台实现资源调度。

### 2.2.2 频谱资源融合（共享频段、动态分配）

频谱资源融合通过共享频段与动态分配实现资源高效利用。共享频段采用授权共享接入模式，由行业主管部门划定特定频段作为公专网共用频段，明确专网与公网的基础使用份额，专网在运营高峰期可临时占用公网基础份额，公网在旅客流量高峰时也可调用专网冗余频段，使用过程中通过频谱感知技术避免同频干扰。动态分配依托智能频谱管理平台，实时采集专网运营业务量、公网用户数及带宽需求等数据，建立资源分配模型。当列车运行至隧道等专网关键区域时，平台自动将70%以上的共享频段分配给专网；当列车停靠枢纽站点，旅客业务激增时，公网频段占比可提升至60%以上。

### 2.2.3 业务层融合（QoS优先级管理、跨网切换）

业务层融合通过QoS优先级管理与跨网切换实现业务无缝衔接。QoS优先级管理采用业务分类与标记机制，将列车运行控制业务标记为最高优先级，调度指挥、应急通信设为二级优先级，旅客流媒体、语音通话设为三级优先级，运维辅助业务设为四级优先级。网络节点根据优先级标记执行差异化调度策略，最高优先级业务可抢占其他业务的资源，确保关键业务不受网络拥堵影响。跨网切换采用基于预测的切换机制，通过列车定位系统获取实时位置与速度，结合沿线基站覆盖范围，提前预测切换节点。在切换前，目标基站提前预留资源，建立

通信链路，当列车到达切换区域时，快速完成业务数据传输的无缝衔接。针对隧道与露天区域的切换场景，优化切换判决算法，将切换时延控制在50毫秒以内，避免业务中断。

## 2.3 关键技术支撑

高速铁路公专网融合依赖多项关键技术提供支撑。网络切片技术是核心支撑，通过在统一网络基础设施上划分多个逻辑隔离的切片，为专网关键业务与公网公众业务分别构建专属切片，每个切片具备独立的带宽、时延与安全属性，确保专网业务不受公网流量影响。Massive MIMO技术通过多天线阵列增强覆盖与容量，采用波束赋形技术将信号精准聚焦至列车运行区域，提升信号强度，同时增加接入用户数，满足旅客业务的高容量需求<sup>[3]</sup>。边缘计算技术将核心网部分功能下沉至基站边缘节点，缩短业务数据传输距离，降低端到端时延，尤其适配列车控制等低时延业务需求。区块链技术用于频谱资源分配记录，确保分配过程透明可追溯；人工智能技术实现网络状态实时监测与故障预测，提升网络运维效率；加密与身份认证技术保障跨网数据传输安全，为融合架构提供全方位技术保障。

## 3 高速铁路无线通信公专网融合设计要点

### 3.1 网络架构设计

高速铁路公专网融合的网络架构设计需秉持“共享协同、隔离安全”原则。核心层采用云原生架构，构建统一的云核心网平台，部署网络切片管理模块、资源调度模块与安全隔离模块，将专网核心网功能与公网核心网功能通过切片实现逻辑隔离，共享云服务器、存储设备等硬件资源，通过资源弹性伸缩机制适配业务流量波动。接入层推行“共站址、分小区”模式，在铁路沿线每2-3公里设置一个基站站点，每个站点部署专网与公网两套基站设备，共享铁塔与天馈系统，分别划分专网覆盖小区与公网覆盖小区，通过小区间协同技术实现覆盖衔接。传输层采用光纤传输与微波备份的双链路设计，核心网与接入网之间通过光纤传输保障大带宽、低时延传输，同时部署微波设备作为备份链路，当光纤中断时自动切换，确保网络连续性，整体架构需兼顾扩展性，预留5G-A与6G技术升级接口。

### 3.2 频谱资源优化

频谱资源优化需结合业务特性与场景需求实现精准配置。首先进行频段划分，将2.6GHz频段规划为专用频段，保障列车控制、调度等核心业务的稳定传输；将700MHz低频段设为共享覆盖频段，利用其传播距离远、穿透性强的优势，解决隧道、桥梁等场景的覆盖问题；

将3.5GHz频段作为公网容量补充频段,满足旅客高峰时的大带宽需求。其次实施动态调整策略,搭建智能频谱管理平台,实时监测专网业务量、公网用户密度及信号质量,当列车运行至枢纽站点,公网用户激增时,自动将3.5GHz频段的部分资源分配给公网;当列车进入隧道,专网业务需求提升时,回收公网冗余资源分配给专网。同时建立干扰抑制机制,采用自适应跳频技术,当检测到频段干扰时,自动切换至无干扰频段,保障通信质量。

### 3.3 覆盖增强方案

覆盖增强方案需针对不同场景制定差异化策略。隧道场景采用“漏泄电缆+中继放大”组合方案,在隧道内铺设漏泄电缆实现信号均匀覆盖,每隔500米部署一台中继放大器,补偿信号衰减,同时在隧道入口处部署过渡基站,减少隧道内外信号切换的衰减。桥梁场景采用高增益定向天线,安装于桥梁两端的铁塔上,调整天线倾角与波束方向,实现桥梁全域覆盖,针对大跨度桥梁,在桥中设置小型基站作为补充,消除覆盖盲区。路基地段采用“宏基站+微基站”协同覆盖,宏基站按2-3公里间隔部署,实现广覆盖,在地形起伏导致的阴影区及沿线村镇附近部署微基站,增强局部覆盖强度。枢纽站点采用“Massive MIMO+立体覆盖”方案,部署多天线宏基站实现大范围覆盖,在站台、候车厅等人员密集区域部署室内分布系统,通过吸顶天线、壁挂天线实现室内精准覆盖,同时优化基站参数,减少同频干扰。

### 3.4 移动性管理

移动性管理需保障高速移动场景下的通信连续性。切换策略采用“预测性切换+快速重配置”机制,通过列车定位系统、速度传感器获取实时运行数据,结合沿线基站覆盖地图,提前预测切换触发点,当列车到达触发点前100米时,目标基站提前建立通信链路,完成资源预留与参数配置,切换过程在50毫秒内完成,避免业务中断。针对多基站重叠覆盖区域,采用“软切换”技术,列车在切换过程中同时与源基站和目标基站保持通信,待与目标基站通信稳定后,再断开与源基站的连接<sup>[4]</sup>。实施小区合并与分裂动态调整,当列车高速通过时,将相邻的多个小小区合并为一个大小区,减少切换次数;当

列车停靠站点时,将大小区分裂为多个小小区,提升局部容量。

### 3.5 安全与可靠性设计

安全与可靠性设计是公专网融合的核心保障。安全设计采用“分层防护”策略,网络层通过网络切片实现专网与公网逻辑隔离,切片间设置访问控制策略,禁止未经授权的跨切片数据传输;数据层对传输数据进行端到端加密,采用国密算法SM4对业务数据加密,SM2算法进行身份认证,确保数据传输过程不被窃取或篡改。接入层实施严格的终端认证机制,专网终端采用硬件加密狗进行身份验证,公网终端通过SIM卡与密码双重认证,防止非法终端接入。可靠性设计采用“冗余备份+故障自愈”机制,核心网设备采用双机热备模式,一台设备故障时,另一台设备在10毫秒内自动接管业务;传输链路采用光纤与微波双链路备份,当光纤故障时,自动切换至微波链路。同时部署智能运维平台,实时监测网络设备状态与业务运行参数,通过故障预测算法提前识别潜在故障,生成修复方案,实现故障的快速定位与自愈,提升网络可靠性。

### 结束语

高速铁路无线通信公专网融合是提升通信效能的关键路径。通过合理设计网络架构、优化频谱资源、增强覆盖、完善移动性管理以及强化安全与可靠性,能满足高铁复杂场景下运营管理与旅客服务的多样化需求。未来,随着5G-A、6G等技术发展,需持续探索创新融合方案,进一步提升融合深度与广度,为高铁安全、高效运行提供更坚实的通信保障。

### 参考文献

- [1]赵留俊.高速铁路无线通信公专网融合设计要点[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(11):54-60.
- [2]高扬,罗扬帆.高速铁路无线通信协议安全需求探讨[J].中国铁路,2022(11):123-128,134.
- [3]姜淼.高速铁路无线通信网络的高效切换研究[J].中国新通信,2021,23(5):13-14.
- [4]李建钊.高速铁路宽带无线通信系统控制方法研究[J].通信电源技术,2025,42(6):160-162.