

高铁5G网络品质提升的创新技术

Research and Practice of Innovative Technologies for Enhancing 5G Network Quality in High-Speed Railway

研究与实践

刘 通,陈大明,程晓东(中国电信安徽分公司,安徽 合肥 230031)
Liu Tong,Chen Daming,Cheng Xiaodong(China Telecom Anhui Branch,Hefei 230031,China)

摘 要:

为提升高铁5G网络品质,从覆盖和容量2个方面,深入研究了高铁站间距规划、新型定制天线、波束优化等覆盖提升技术,以及5G-A三载波(3 Component Carrier,3CC)、超级小区增强、公网网协同等容量提升技术。结合理论分析和现网试点,验证了各项技术的可用性、成效和收益,给出了相关技术在工程实践中应用的方案和建议,为高铁5G网络规划、建设和优化提供了技术指引。

关键词:

高铁;定制天线;波束优化;3CC;超级小区增强;
公网网协同

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.08.008

文章编号:1007-3043(2026)08-0043-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

To enhance the quality of high-speed rail 5G networks, in-depth research is conducted on coverage improvement technologies such as high-speed rail station spacing planning, novel customized antennas, and beam optimization, as well as capacity enhancement technologies including 5G-A 3CC, super cell enhancement, and public-private network collaboration. By combining theoretical analysis with live network trials, the usability, effectiveness, and benefits of these technologies are validated. Solutions and recommendations for their practical application in engineering are provided, offering technical guidance for the planning, construction, and optimization of high-speed rail 5G networks.

Keywords:

High-speed railway; Customized antennas; Beam optimization; 3CC; Super cell enhancement; Public-private network collaboration

引用格式:刘通,陈大明,程晓东. 高铁5G网络品质提升的创新技术研究与实践[J]. 邮电设计技术,2026(8):43-49.

1 概述

高铁已经成为人们出行方式的重要选择,提升高铁5G网络品质显得尤为重要。高铁5G网络品质与覆盖、容量2个关键因素紧密相关。高铁5G网络覆盖面临的首要难题是车厢穿透损耗,穿透损耗与车厢材质、密封程度等因素相关,不同车型有一定差异,尤其是复兴号列车的损耗更大,其中3.5 GHz频段的损耗约为36 dB,2.1 GHz频段的损耗约为30 dB,800 MHz

频段的损耗约为24 dB,这增加了5G网络覆盖难度。高铁5G网络容量面临的首要难题是用户高度集中,通常情况下高铁列车8节编组载客量约为600人、16节编组约为1200人,在有限空间内聚集了数百名用户,从现网统计数据来看,列车通过5G基站时的瞬时负荷可高达95%以上。本文针对提升高铁5G网络覆盖和容量的相关技术进行了深入探讨。

2 高铁5G网络覆盖品质提升

高铁5G网络的覆盖方案与所使用的频率高度相关,低频段带宽有限、高频段覆盖能力较差,因此中频

收稿日期:2026-07-16

段是较优选择^[1-4]。中国电信和中国联通(简称“电联”)的5G共建共享,高铁场景可选频率主要是3.5 GHz、2.1 GHz,其中2.1 GHz为4G重耕频率;中国移动、中国广电的5G共建共享,高铁场景可选频率主要是2.6 GHz,为4G重耕频率。重耕频率可以充分借鉴4G网络的成熟经验,参考4G站点规划布局,因此本文重点探讨电联的3.5 GHz网络覆盖方案。

2.1 3.5 GHz频段站间距规划

对某一个具体频段来说,高铁场景的网络覆盖效果除与车厢穿透损耗相关外,还与站间距、站轨距、天线挂高、入射角等涉及网络的因素相关,其中站间距尤为关键^[5-11]。确定站间距首先要明确覆盖率标准,包括RSRP门限和SINR门限,通常情况下RSRP门限室外场景为-105 dBm、室内场景为-110 dBm,SINR门限一般为-3 dB。高铁场景可参照室内场景取RSRP大于-110 dBm,对于客流量大、感知要求高的精品线路也可以考虑-105 dBm。其次是与切换相关的相邻小区重叠覆盖距离,重叠覆盖距离一般取2(电平迟滞对应距离+切换触发时间对应距离+切换执行距离),根据测算,在高铁时速为350 km/h时,须设置170 m的重叠覆盖距离(见图1和表1)。

为进一步研究3.5 GHz频段高铁场景站间距,在某高铁线路采用3.5 GHz 8×50 W 8T8R设备部署20个试验站点,站轨距为100~200 m,天线挂高相对铁轨高度为15~30 m,机械下倾角为5~7°,站点尽量在铁路两

侧呈“之”字分布。基于上述试点路线,选择穿透损耗最大的复兴号列车CR400AF和CR400BF 2种车型进行单小区覆盖距离测试。考虑不同车次、不同座位的覆盖效果会有一定差异,重复进行了8趟测试。以RSRP达到-105 dBm为门限进行统计分析,最差1趟平均覆盖距离为270 m,对应站间距为370 m;次差1趟平均覆盖距离为340 m,对应站间距为510 m;其余6趟站间距均达到550 m。总体来看,550 m的站间距可以满足网络覆盖需求,同时又能有效平衡覆盖效果和投资效益,可以作为3.5 GHz频段的站间距规划参考。

存量高铁线路一般在4G网络基础上叠加部署5G,4G网络使用1.8 GHz、2.1 GHz等频率,平均站间距通常为750 m左右。在5G网络建设时,若直接1:1叠加3.5 GHz 5G基站,则多数站点难以满足550 m的站间距要求;若在其中插入新站点,则插入后的站间距过小,降低工程投资效益,出现“加则密、不加则疏”的尴尬局面。经过对工程造价、运营成本等进行详细测算,在站间距较大时,创新提出“拔二增三”解决方案(见图2),将中间2个旧站拆除、新增3个新站,不仅使站间距均匀分布,而且相比中间直接插入新站,工程建设投资以及后期运营过程中的租费、电费、维护费等年化综合成本反而降低了10%。

2.2 新型高铁定制天线

天线是基站信号的辐射单元,方向图是天线辐射特性的表示,包括水平方向和垂直方向。高铁场景是典型的“线状”覆盖场景,一般情况基站配置2个小区,天线背靠背安装,分别覆盖2个方向。为进一步增强高铁信号覆盖,一种新型高铁定制天线被研发出来(见图3和表2),它应用龙伯透镜技术进行波束赋形,采用双波束分别增强基站近点和远点覆盖^[12]。根据高铁基站2个小区天线背靠背安装的特点,分别定制左右2副天线,垂直于铁轨方向安装,通过旋转内部反

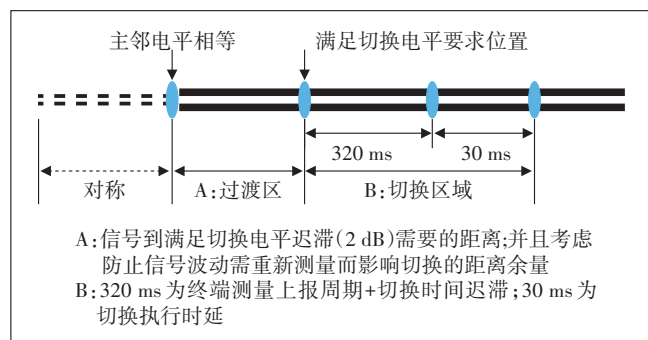


图1 切换区域示意

表1 不同高铁时速的切换重叠需求距离

速度/(km/h)	过渡区 A/m	切换区 B/m	切换重叠需求距离/m
400	50	40	180
350	50	35	170
300	50	30	160
250	50	25	150
200	50	20	140

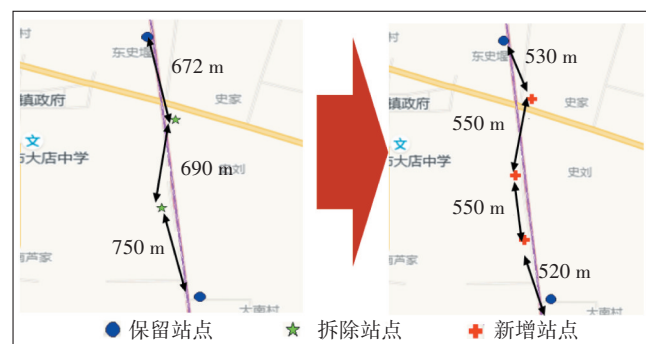


图2 高铁站点规划“拔二增三”示意

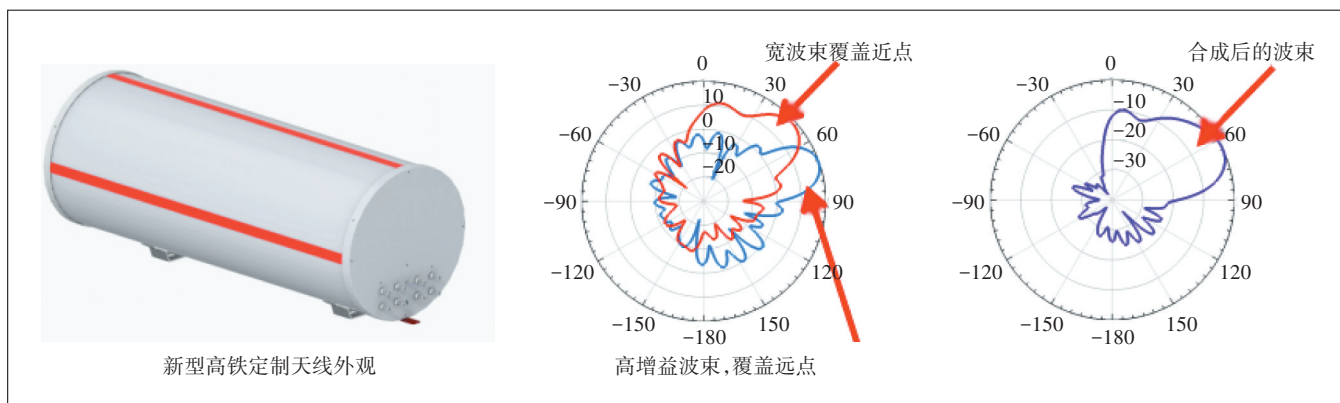


图3 新型高铁定制天线及其水平方向图

表2 新型高铁定制天线主要电气指标

指标	取值	指标	取值
工作频率/MHz	3 300~3 600(远)/ 3 300~3 600(近)	3 dB水平波束宽度/ $^{\circ}$	15 $\pm$ 4(远)/ 19 $\pm$ 5(近)
端口数	4/4	10 dB水平波束宽度/ $^{\circ}$	28 $\pm$ 4(远)/ 64 $\pm$ 6(近)
增益/dBi	18 $\pm$ 1(远)/ 17 $\pm$ 1(近)	3 dB垂直波束宽度/ $^{\circ}$	15 $\pm$ 4(远)/ 15 $\pm$ 4(近)
极化/ $^{\circ}$	$\pm$ 45	10 dB垂直波束宽度/ $^{\circ}$	28 $\pm$ 4(远)/ 28 $\pm$ 4(近)
水平波束指向/ $^{\circ}$	55/30	波束交叠/dB	6 $\pm$ 3
水平偏置角度调整范围/ $^{\circ}$	55~70	旁瓣抑制/dB	-13
前后比/dB	25	电压驻波比	$\leq$ 1.5
极化端口隔离度/dB	$\geq$ 25	输入阻抗/ Ω	50
波束端口隔离度/dB	$\geq$ 22	功率容量/W	8 $\times$ 100

射板调整方向角,水平方向分别向左、向右赋形,以达到针对性增强覆盖的目的。

在京沪高铁某区间采用高铁定制天线替换现有某型号高增益天线(主要电气指标为:3.5 GHz 8端口,3 dB水平波束宽度为 $65\pm 15^{\circ}$,3 dB垂直波束宽度 $\geq$

4.5° ,增益 ≥ 19 dBi)进行测试验证,结果如图4所示,从图4可以看出,在相同站点及配置情况下,信号波动明显减小,平均场强提升5 dB以上,边缘场强平均提升9 dB以上,尤其是基站所在处的“塔下黑”现象改善明显。综合来看,3.5 GHz频段平均站间距可达到650~750 m,为大站间距场景提供了一种新的解决方案。

2.3 高铁场景波束优化

高铁场景的目标用户所在位置是铁轨上行驶的高铁列车上,信号波束的水平面最好与铁轨平行,垂直面最好主要覆盖铁轨至高铁列车顶部区间,即基站辐射出来的信号波束聚焦铁轨及其上方并平行于铁轨,以充分发挥基站效能。高铁一般使用3.5 GHz 8T8R RRU设备,需要外接天线,支持的电磁波辐射模式(Pattern)少,在其支持的波束Pattern中,垂直3 dB波宽通常为 6° ,水平3 dB波宽可选择 90° ,若站轨距较大或站间距较小,为精准覆盖目标区域也可选择 65° 。

在工程实践中,不同厂家的3.5 GHz 8T8R RRU设备的波束赋型能力也有所差异,高铁场景SSB可配置

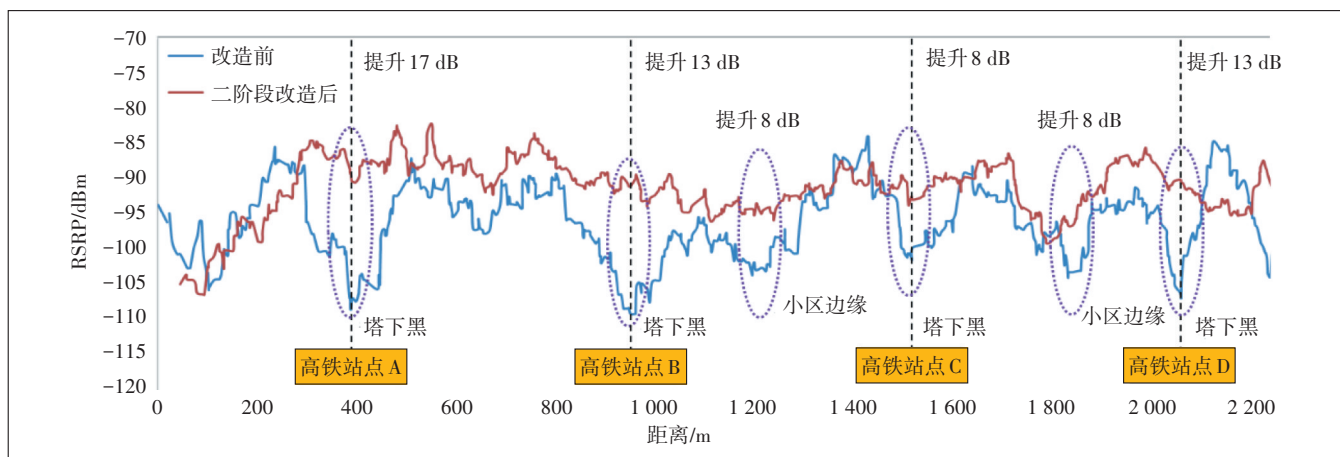


图4 新型高铁定制天线试点覆盖效果

多波束或单波束,但总的来说波束权值的调整空间有限,因此需要根据基站的天线挂高、站轨距、站间距等合理设计波束参数,从而实现波束精准覆盖的目标(见图5)。

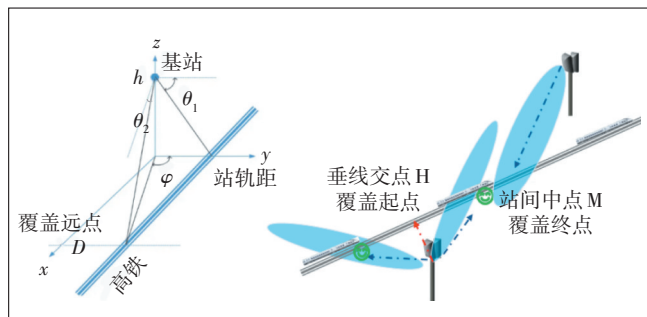


图5 高铁基站波束参数设计示意

在图5中,角度 φ 是波束的方向角,可通过三角函数 $\sin \varphi = \frac{d}{\sqrt{d^2 + D^2}}$ 计算。 θ 是波束的下倾角,当波束覆盖近点时为 θ_1 ,可通过三角函数 $\sin \theta_1 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}}$ 计算;覆盖远点时为 θ_2 ,可通过三角函数 $\sin \theta_2 = \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2 + D^2}}$ 计算,使用单波束推荐 θ_2 ,多波束可以根据波束数量分别计算,各波束介于 θ_1 和 θ_2 之间。其中, h 为基站天线净挂高,即天线相对铁轨的高度; d 为站轨距,即基站与其在铁轨上的垂直投影的距离; D 为基站覆盖距离,即基站覆盖远点与基站在铁轨上的垂直投影的距离,在工程实践中,可取覆盖远点为相邻2个基站的中点位置,以实现信号的连续覆盖。根据计算所得 φ 值,对照支持的Pattern表,选择水平3 dB波宽最接近 φ 值的Pattern,根据 θ 设置波束的数字倾角。高铁场景可以使用Uma传播模型进行最佳波束仿真估算,以进一步提高波束覆盖精准度。

表3所示为某厂家3.5 GHz 8T8R RRU设备支持的波束Pattern。

基于上述方法,选择某高铁某区间连续30个基站进行场景化波束优化试点验证,测试结果显示:覆盖

表3 某厂家3.5 GHz 8T8R RRU设备支持的波束Pattern

场景ID	水平3dB波宽/ $^\circ$	垂直3dB波宽/ $^\circ$	倾角可调范围/ $^\circ$	方位角可调范围/ $^\circ$
默认场景	90	6	0	0
SCENARIO_3	65	6	0	-10~10
SCENARIO_4	45	6	0	-22~22
SCENARIO_5	25	6	0	-32~32

率(RSRP $\geq$ -105 dBm且SINR $\geq$ -3 dB)从优化前的94.3%提高到95.6%,提高了1.4%,下行平均速率从143.16 Mbit/s提高到151.16 Mbit/s,提高了5.6%,上行感知速率从3.1 Mbit/s提高到3.3 Mbit/s,提高了6.5%,下行感知速率从69.11 Mbit/s提高到73.15 Mbit/s,提高了5.8%,高铁5G网络覆盖和用户体验得到优化提升。

3 高铁5G网络容量提升

网络容量主要与资源(如基站数量、单基站的配置以及资源的调度机制等)相关,高铁5G专网的基站数量主要由网络覆盖决定,因此本文重点从单基站配置、资源调度等方面研究提升高铁5G专网容量的方法^[13-20]。

3.1 部署5G-A 3CC能力

5G-A作为5G的下一步演进方向,万兆下行、千兆上行是其提供的重要能力,该能力主要通过部署三载波聚合(3CC)实现。不同运营商有不同的频率组合,比如中国移动可以对2.6 GHz+4.9 GHz频段、2.6 GHz+700 MHz频段、4.9 GHz+2.6 GHz+700 MHz等进行三载波聚合,中国电信、中国联通可以对3.4 GHz+3.5 GHz+2.1 GHz频段进行三载波聚合,不同频率组合的总带宽不同,所支持的峰值速率也略有差异,但总的来说可以获得至少2~3倍的速率提升。3CC的开通并不是简单的硬件和频率叠加,需要结合实际情况进行配置优化,才能发挥最佳效能,下面以电联3.4 GHz+3.5 GHz+2.1 GHz为例进行分析。

3CC开通对覆盖的影响分析如下。3.4 GHz、3.5 GHz为相邻频段,现网设备基本都支持同一个AAU设备同时开通3.4 GHz、3.5 GHz 2个100 MHz载波。在单3.5 GHz组网时,为提升网络覆盖,AAU设备一般配置满功率发射,在增开3.4 GHz时,需要将功率分出一半给3.4 GHz载波使用,因此3.5 GHz功率将下降3 dB,导致覆盖收缩。从实际测试验证来看,功率减半带来RSRP下降约2.4 dB,覆盖率下降约2.5%。

为应对此问题,可对SSB最大功率偏置进行优化,由默认0 dB提高到3 dB,以抵消功率减半带来的3 dB损失,保持与二载波开通前相当水平,有利于终端的移动性管理。因为AAU设备的总功率固定,增加SSB功率,将降低SSB发送时刻的数据传输可用功率,在小区下行待发送数据量充足的情况下导致小区吞吐量降低。同时,5G网络不支持下行功率控制,SSB功率是下行功率的基准,PDSCH功率基于NZP CSI-RS功

率加上偏置生成,NZP CSI-RS功率基于SSB功率加上偏置生成,SSB的最大功率偏置并不改变其他下行信道功率的参考基准,因此SSB功率下降3 dB将导致PDSCH等下行信道功率同步下降3 dB,将导致小区边缘覆盖变差,虽然可以通过降低调制阶数等方式改善丢包、误码等问题的发生概率,但会导致数据传输速率下降。参数优化后,选择前述同车次同方向进行验证对比,5G RSRP提高2.67 dB、下载速率降低7.5 Mbit/s,与上述分析结果一致,但3.4 GHz+3.5 GHz双载波的总容量仍较单3.5 GHz显著提升,是较优的优化方案。

其次,现网存量终端对3CC的支持能力差异较大,需基于终端能力进行选网策略优化,以充分发挥3.5 GHz的容量优势和2.1 GHz的覆盖优势。对于语音业务,可全面开通VoNR,并实施语数分层策略,5G语音业务由EPS Fallback切换至VoNR,无论终端是否支持CA,语音业务均优先占用2.1 GHz频段,若用户空闲态驻留在3.5 GHz频段,当其发起VoNR语音业务时将被迁移至2.1 GHz频段,以保证语音业务的良好感知。如图6所示,建议采用A2+A5策略实现语音业务和数据业务分层(简称“语数分层”)。从现网实测效果统计来看,2.1 GHz上行丢包率比3.5 GHz低0.31个百分点,下行丢包率比3.5 GHz低0.22个百分点。

对于数据业务,若终端支持3.5 GHz(3.4 GHz)+2.1 GHz频带间的TDD+FDD CA,则将2.1 GHz作为主载波,发挥其覆盖优势;将3.5 GHz(3.4 GHz)作为辅载波,发挥其容量优势。若终端仅支持3.4 GHz+3.5 GHz频带内TDD+TDD CA,则选择与公网异频的高铁专网频段作为主载波,如3.5 GHz作为主载波、3.4 GHz作为辅载波。若终端不支持CA,则优先选择3.5 GHz或3.4 GHz频段,发挥容量优势,通过载波间负荷均衡策略平衡3.4 GHz、3.5 GHz频段负荷,在3.5 GHz或3.4 GHz频段弱覆盖路段,通过基于覆盖的异频切换策略

切换至2.1 GHz,通过基于频率优先级切换和基于覆盖的异频切换实现2.1 GHz回到3.5 GHz,从而实现3.5 GHz(3.4 GHz)与2.1 GHz的有效协同。

3.2 超级小区增强

根据前述探讨,3.5 GHz频段的站间距建议值为550 m,每个基站2小区背靠背覆盖2个方向,不考虑切换重叠覆盖带,则每个小区覆盖距离为275 m。按照高铁平均时速300 km/h计算,高铁列车通过1个小区的时长为3.3 s,即每3.3 s需要进行一次切换。为了降低切换次数,业界通常的做法是进行超级小区合并,一般采用6~12个小区合并为1个超级小区(Super Cell)的方案,超级小区使用同一个小区CI以及参数配置,原先的 n 个小区变成 n 个TRP(Transmission and Receiving Point),发射相同的射频信号,对终端来说就是1个小区,所以也无须切换。

超级小区虽然可以有效减少切换次数,降低切换失败风险以及改善切换过程中速率下降的感知问题,但同时降低了无线网络容量,该路段由原 n 个小区容量降低为1个小区容量。小区信道分为控制信道、业务信道两大类,业务信道的调度信息通过控制信道传递。传统的超级小区在合并时,对控制信道和业务信道同时进行合并,容量降为合并前的 $1/n$ 。为此,提出一种创新解决方案,即超级小区在合并时仅对控制信道进行合并,即上行和下行公共信道PUCCH/PRACH/PDCCH统一调度,各TRP分配相同的时频资源,进行联合调度实现免切换;每个TRP业务信道的时频资源进行独立调度,即上行和下行数据信道PUSCH、PDSCH及其专用PDCCH由服务TRP独立调度,实现各TRP空分最大资源利用率。超级小区增强特性既减少了切换,又保持了 n 个小区的业务容量(见图7)。

以3.5 GHz频段站间距550 m,高铁8节编组车长约为200 m,6个TRP合并为一个超级小区为例,测算应用超级小区增强特性的增益。列车在超级小区两端时,车头、车尾分别处于相邻的2个超级小区,2个超级小区独立调度,天然地获取了容量增益,高铁列车运行时有87.9%路段处于同一超级小区内部,这部分路段即是超级小区增强特性的作用区间。进一步剖析到超级小区内部的1个TRP,覆盖范围按站间距一半计算约为275 m,高铁列车运行时有27.3%路段处于同一个TRP内部,有72.7%路段的车头、车尾分别处于相邻的2个TRP,即超级小区增强特性实际发挥作用

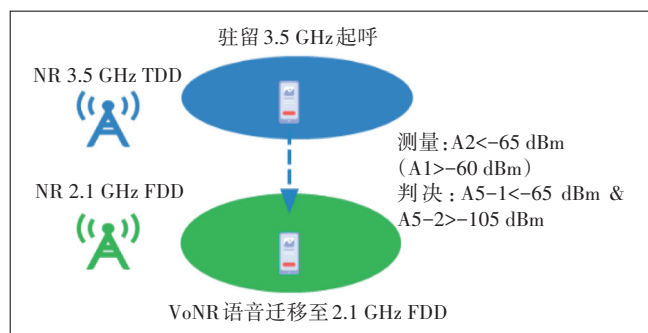


图6 VoNR语数分层策略示意

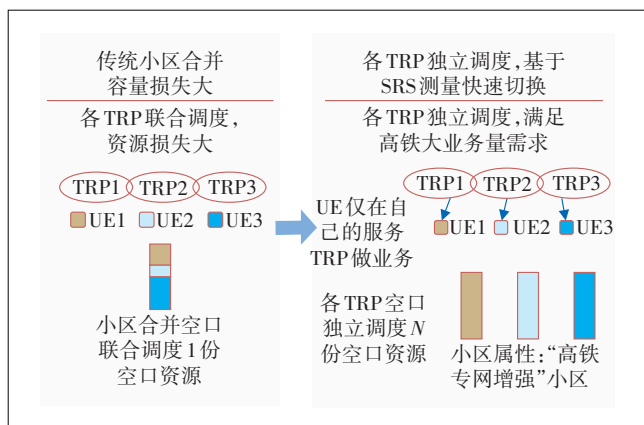


图7 超级小区增强特性示意

的路段。因此对于高铁8节编组列车将有87.9%×72.7%=63.9%的路段获得超级小区增强特性的收益。同理,对于高铁16节编组列车将有75.8%的路段获得超级小区增强特性的收益。

$$\begin{aligned} \text{列车运行在同一个超级小区内的比例} &= \frac{\text{TRP个数} \times \text{每TRP覆盖距离} - \text{高铁列车长度}}{\text{TRP个数} \times \text{每TRP覆盖距离}} \\ \text{列车运行在同一个TRP内的比例} &= \frac{\text{每TRP覆盖距离} - \text{高铁列车长度}}{\text{每TRP覆盖距离}} \end{aligned}$$

超级小区增强特性在5G网络研发实现后,选择某高铁某段(连续6个TRP,即3个物理站点,合并为1个超级小区)进行验证测试,测试路段总长度为55 km,平均站间距为540 m,最大站间距为663 m,测试车型为复兴号,最高车速为300 km/h。开启超级小区增强特性后,秒级跟踪分析TRP间RB复用生效,在高铁列车经过时,连接用户数相当,下行平均使用RB数增加70%,下行感知速率增加20.4%。实测结果表明,超级小区增强特性可有效增加TRP间RB资源的复用调度,可有效提升高铁场景的网络容量和用户感知(见图8)。

3.3 公专网协同

高铁5G专网虽然聚焦覆盖铁轨区域,但难免会覆盖到高铁线路周边的村庄等人口聚集区域,导致周边用户占用高铁专网信号。在无高铁列车经过时,兼顾周边用户有利于提高网络资产效益,但在列车经过时会造成资源争抢,影响高铁用户感知。须通过公专网协同进行用户调度,主要包括低速用户迁出和高速用户迁回,高铁用户定向切换和优先调度等技术。

如图9所示,5G高铁小区打开高速移动特性开

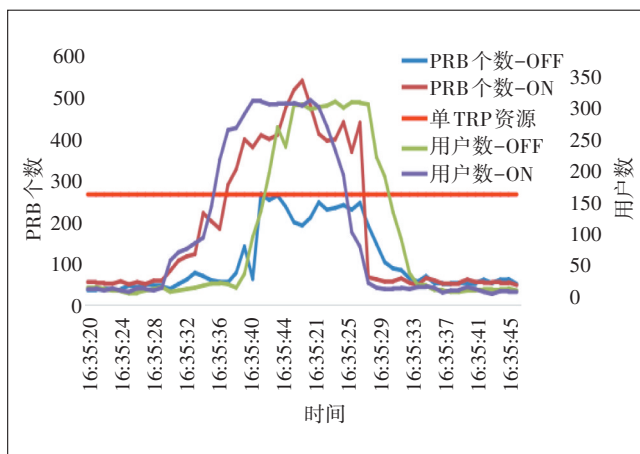


图8 超级小区增强特性开与关的下行PRB使用个数对比

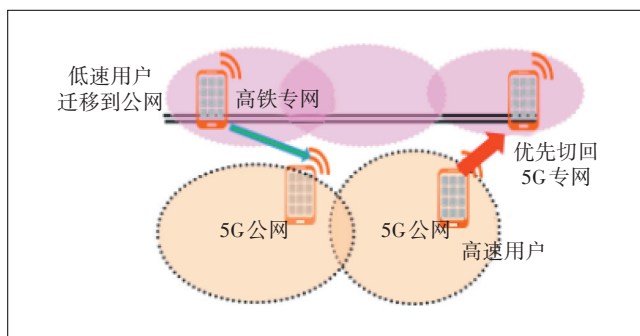


图9 低速迁出和高速迁回示意

关,配置低速迁出特性参数,沿线公网小区配置高速迁回特性参数。专网小区周期性启动检测用户识别,专网识别出低速用户后,利用切换或重定向将低速用户迁移到异频公网。高速用户由于掉话等原因脱离高铁专网接入公网,通过高速迁回功能让高速用户返回高铁专网。由于迁入迁出基于频点设置,低速和高速必须是异频的,可以通过采用不同频点、SSB异频等方法实现。低速迁出功能采用基于测量的迁出功能,需要启动邻区测量,为了避免频繁的测量上报导致系统开销增加,一般每15 s最多可迁出15个用户;若采用基于盲重定向的迁出功能,基站识别出低速用户,低速用户无须测量低速频点的信号质量,直接将低速用户迁移至配置的低速频点,一般每秒最多可迁出10个用户。对于某些特殊场景,需要根据具体情况判断是否开启,比如经停车站的停靠区域,前后3 km内的小区不建议开启低速用户迁出功能,否则可能将高铁用户误当低速用户迁出;高铁线路在与高架桥、高速公路等区域并行时,公网用户的车速仍较快,建议这些场景占用小区不开启高速用户迁回策略,防止公网

用户迁回高铁小区。

当高铁专网存在2个及以上高速邻区时,本小区的高速用户只允许向高速邻区进行切换,防止高速用户切入低速小区,提升高速用户的切换成功率。如图10所示,当高铁专网和邻区满足参数配置时,高速用户定向切换功能开启后,本小区的高速用户只允许向高速邻区(Cell 1和Cell 2)切换。但当高速小区内高速用户上报的测量报告一直不含高速邻区(比如本小区的邻区属性配置不合理时)时,为了防止高速用户掉话,基站仍会允许高速用户切换到低速小区。

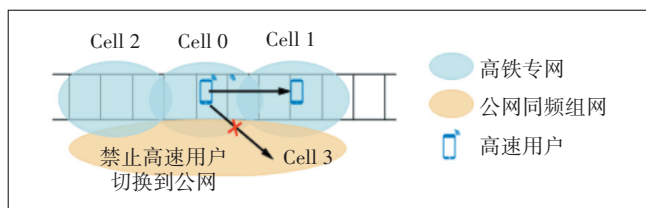


图10 高速定向切换示意

针对高铁专网基站,可以开启高速优先调度特性,提高高速小区内高速用户的调度优先级,保证高速用户相对于低速用户优先调度,从而提升高速用户的体验速率。在特性生效时,低速用户的感知会有所下降,但如前所述,高铁列车通过一个基站的时间仅数秒,在大多数时间对低速用户影响并不大,因此仍具有应用价值。

4 结束语

高铁作为5G网络覆盖的重要场景,在5G网络的建设、优化中具有举足轻重的地位,但由于高铁车厢密闭带来的信号穿透损耗,以及高速运行带来的瞬时高负荷,对高铁的网络覆盖和容量提出了极为特殊的要求,因此业界一直在针对高铁场景进行形式多样的技术创新和探索。本文重点探讨了站点规划、定制天线、波束优化等覆盖提升方案,5G-A 3CC、超级小区增强、公网协同等容量提升方案,并在现网进行了试点验证,取得较好的效果。后续将进一步探究智算单板等AI技术在高铁场景的创新应用,进一步提升高铁用户感知。

参考文献:

- [1] 林铁力. 5G时代高铁覆盖解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2020(10):57-62.
- [2] 李新,王强. 高铁5G覆盖网络建设挑战及应对[J]. 电信快报,

2024(1):1-4.

- [3] 李喜星. 高铁5G覆盖方案的应用及探讨[J]. 移动信息, 2024, 46(1):44-46.
- [4] 倪竹青. 高速铁路5G网络覆盖方案的对比研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(1):209-211.
- [5] 成剑波. 高铁环境下5G网络切换方案研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2023.
- [6] 张书豪,邓安达,林菁,等. 5G高铁覆盖天线方案研究及应用建议[C]//5G网络创新研讨会(2022)论文集. 北京:TD产业联盟, 2022:41-46.
- [7] 董帝焱,杜丕加,许绍松. 高铁场景的5G无线网络规划及优化[J]. 移动通信, 2019, 43(6):36-41.
- [8] 宋雅. 5G高铁覆盖提升方案研究及应用[J]. 江苏通信, 2024, 40(5):33-37.
- [9] 庄冬梅. 高铁运营场景中的5G网络建设探讨[J]. 中国科技投资, 2023(26):22-24.
- [10] 吴勇军,姚家甫. 高速铁路场景5G网络规划和建设方案研究[J]. 通信电源技术, 2023, 40(6):153-155.
- [11] 张立杰. 5G高铁通信网络覆盖能力提升策略研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(11):170-172.
- [12] 陈辉,黄炎. 5G高铁覆盖透镜天线试点应用研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2023, 36(10):73-75, 87.
- [13] 刁兆坤,杨丽,王振章. 5G-A 3CC网络部署及载波聚合能力分析[J]. 通信世界, 2024(6):45-47.
- [14] 高海东,罗宏. 5G-A关键技术及部署策略研究[J]. 广东通信技术, 2024, 44(12):13-15.
- [15] 孙鹏. 铁路宽带移动通信系统超级小区组网性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [16] 陈永朝,沈楚钦. 5G波束配置在无线网络优化中的应用研究[J]. 湖南邮电职业技术学院学报, 2024, 23(1):5-8, 12.
- [17] 徐建林,蒋敬,王开贵,等. 高铁专网网络问题优化举措及应用研究[J]. 电脑与电信, 2024(6):84-94.
- [18] 李宗恒,邹文杰,方子贤,等. 5G高铁专网覆盖综合解决方案研究和应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(1):87-92.
- [19] 李容荣,黄震山,朱震海. 5G基站开通关键参数智能规划新方法研究——基于UMa-3D传播影响与象限切片算法[C]//2022年5G网络创新研讨会. 北京:TD产业联盟, 2022:146-154.
- [20] 曹海波,胡小兵. 运营商5G专网建设中的无线网络优化方案研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(17):168-170.

作者简介:

刘通,毕业于西安电子科技大学,正高级工程师,学士,主要从事无线网络优化、无线大数据分析、无线IT支撑系统建设等工作;陈大明,毕业于安徽大学,工程师,硕士,主要从事无线5G网络优化工作;程晓东,毕业于南京邮电大学,工程师,硕士,主要从事无线5G网络优化工作。