

高铁沿线5G基站布局对无线网覆盖盲区的补盲技术研究

高宏达

中国移动通信集团吉林有限公司 吉林长春 130103

摘要：高铁沿线复杂的地形以及高速移动的情况造成5G无线网覆盖盲区频频出现，从而导致通信质量受到影响。本文从补盲需求入手，分析高铁沿线覆盖盲区产生的原因，系统研究以基站布局优化为核心的补盲技术体系，包含差异化站址布局、隧道专用覆盖方案、协同组网方案。用长珲高铁、沈白高铁等工程来检验技术是否可行以及有效性。经过研究得知，科学的5G基站布局能明显改善覆盖连续性，给高铁场景无线通信改善赋予技术支撑和操作参照。

关键词：高铁沿线；5G基站；布局优化；覆盖盲区；补盲技术

引言

截至2023年底，全国高铁运营里程达4.5万km，高铁出行已逐步成为人们商务、旅游、探亲等的主流出行方式。高铁5G无线网络建设具有穿透覆盖难度大、高速移动切换多、信号连续稳定难、跨省线路长的特点。但是由于高铁沿线的桥隧比例高、地形复杂、列车高速移动引起多普勒效应以及金属车厢信号屏蔽等问题，造成无线网覆盖盲区普遍存在。长珲高铁全线80余座隧道、沈白高铁50余座隧道等案例都证明盲区通信中断不但会影响旅客的乘车体验，而且会影响高铁智能化运营的发展。目前补盲技术存在适配性差、切换延迟等问题，因此研究基于5G基站布局优化的补盲技术，对于推进高铁通信高质量发展、筑牢数字交通底座有着十分重要的意义。

高铁沿线5G无线网覆盖补盲技术研究

一、高铁沿线5G无线网覆盖盲区成因分析

1. 地形与工程结构制约

高铁线路经常要穿越山区、峡谷、溶洞等复杂地形，长珲高铁延边段地貌峰丛密布，山高谷深造成信号传播严重受阻；全线高铁桥隧比高达95%，86座隧道和155座桥梁构成天然的信号屏蔽屏障。隧道内厚实的山体加上钢筋混凝土衬砌双重阻隔信号，7公里以上的长隧道容易出现“信息孤岛”，拉法山隧道全长10.035千米，是长珲高铁最长隧道，也是中国东北地区最长隧道造成信号中断几分钟。高架桥面金属构件遮挡信号，桥梁跨度大容易造成站间覆盖断层^[1]。

2. 高速移动引发的技术难题

高铁350km/h的运行速度造成终端和基站之间出现

剧烈的相对运动，引起多普勒频率偏移，造成信号频率出现偏差、强度减弱，严重时还会造成连接中断。同时高速移动造成终端驻留一个基站的时间只有3到5秒，需要频繁切换基站，切换延迟超过阈值就会产生瞬时盲区。根据数据可知传统切换算法在高铁环境下切换失败率高，容易造成语音卡顿、视频中断。另外金属车厢和双层隔热玻璃造成信号屏蔽，使得车厢内的信号强度衰减30%以上，加重了覆盖的短板。

3. 网络建设与运营限制

高铁沿线有的地段人烟稀少，基站建设引电困难、材料运输费用高、施工面积小。吉林省东南区域如沈白、敦白高铁建设中，生态敏感区建站要兼顾环保要求，增大了布局难度。运营阶段基站能耗大，运营商每年都要支出来自电费百亿级的成本，不能实现密布部署；沿途公网还需要兼顾当地居民的通讯，分配给高铁的资源有限，在节假日高峰时很容易造成容量不足的功能性盲区。

二、高铁沿线5G基站布局补盲技术体系构建

1. 差异化站址布局优化技术

根据不同的地形环境采取定制化的站址布局方式。在山区峡谷场景中，采用“之”字形站点布局方式，使信号在山谷之间无缝对接，克服直线型布局信号被遮挡的问题，吉林移动在全省高铁线路上使用该技术之后，连续性得到明显改善。平原及城郊路段采用“等间距加密”布置，避开覆盖断层，特殊路段用无人机航拍建模、大数据分析精准选址，长珲、沈白高铁建设时，技术团队用无人机完成高架路桥密集区精准布点。站址参数优化，保证信号入射角合适，减小穿透损耗，天线高出轨面15米，正对车窗方向，提高车厢内信号强度。高大桥梁场景采用“桥基天线”技术，把天线嵌入到桥梁土建

结构当中，从而达成隐蔽部署并精准补盲的目的，既保证覆盖效果又考虑经济性。

2. 隧道场景专项补盲技术

短隧道（<1公里）采用漏缆贯通覆盖模式，用泄漏电缆连续贯通隧道并于相邻宏站RRU重构，实现隧道内外无缝切换，吉林移动在省内高铁线路使用该模式后达到出隧道即满格的效果。中长隧道使用RRU、POI和漏缆的方案，将基站设备安装在隧道壁洞室内部，敷设与车窗齐平的双漏缆，使得信号均匀辐射到车厢内；POI完成多运营商信号合路，提高频谱利用率。1公里以上的超长隧道采用洞内精准勘测、洞外协同补点的方式，洞内按距离分段布置漏缆和中继设备，洞外设置高位站点进行信号接力，长珲、沈白共计136座隧道采用该方案实现了全程连续覆盖。同时使用模块化设备、轻型机械，在列车停运的天窗期内进行夜间施工，把多日工程量压缩到夜间完成，平衡建设进度和运营安全^[2]。

3. 协同组网与信号优化技术

创建宏站、微站、漏缆三级协同组网架构，宏站做广域覆盖，微站（pRRU）补盲站间盲区，漏缆解决隧道内部覆盖。采用“超级小区”合并技术，把多个基站小区合并成一个“大小区”，减少切换次数，吉林移动长珲、沈白、敦白高铁采用该技术之后，进出隧道信号切换控制在0.16秒以内。优化高速移动场景下多普勒频偏补偿算法，掉话率减少80%以上，用大规模天线阵列提高信号增益和覆盖面。频段协同上使用的是2.6G和1.8G两层4/5G网络，全线使用优质频段进行网络的良好感知和后续为5G-A载波聚合技术带来平滑的演进基础。吉林移动在哈大高铁采用5G-A网络之后，系统峰值速率可以达到1.2Gbps，用户体验速率提高到原来的3倍。对不支持载波聚合的终端使用动态多载频互操作策略，实现频段智能切换，保证全域体验一致^[3]。

4. 智能化建设与运维技术

采用AI建网模型，根据大数据分析得出的用户分布及业务需求情况来规划基站的位置以及参数，使用无人机航拍加地形建模的方式来提高复杂地形的选址精度。在建设过程中使用模块化的设备和预制化的施工方法，提高安装效率。2025年实现的四条高铁5G网络覆盖中，每条线路部署周期均压缩至3周以内。运维阶段装上智能警报系统，缆线损耗、电力缺乏等状况会自动报警，故障处理时间缩减60%，创建起专门的优化团队，通过拉网测试加用户反应这两种途径搜集问题，优化方案的回应速率加快至小时级。

三、工程案例验证与效果分析

1. 长珲高铁隧道内网络升级工程

长珲高铁全线共有86座隧道，隧道总里程156公里，全线更换设备进行5G网络部署，需在列车停运的“天窗期”（夜间0点至3点）进入隧道内施工，涉及洞室266个，受限施工时长每个“天窗期”仅能施工3~5个，线路上面临着覆盖断续，且施工周期不可控，将给旅客的通信体验造成了极大的影响。为突破铁路隧道5G部署窗口期瓶颈，吉林移动摒弃传统硬件施工模式，改用分阶段计划部署，阶段一采用创新性软方案：通过节点替换与软件升级，实现“化硬为软”，在隧道内零施工情况下，实现5G网络的贯通覆盖，并基于铁路“天窗期”的排窗计划，启动阶段二：施工队有序进入隧道井然有序的完成新型设备和优质频段的无感部署，验收之后隧道内5G信号覆盖率100%，全程信号强度不低于-75dBm，语音接通率100%，列车上旅客通话没有杂音、视频播放流畅无卡顿，解决了隧道内信号盲区问题。

2. 高铁隧道口补盲工程

吉林省东南区域高铁沿线途径整个长白山山脉，峰丛密布，山高谷深，桥隧比高达95%，两个隧道之间不具备宏站部署条件，信号传播受阻严重，测试表明该区域处于无网络覆盖状态，给高铁乘客带来极差的感知体验，吉林移动结合现网实际痛点，通过超级小区合并技术，将隧道内每12个RRU合并为一个逻辑小区，并将原隧道口切换位置通过RRU链路重构方案精准控制切换带位置，规避切换失败带来的脱网风险。该方案在长珲、沈白两条高铁线路上广泛应用涉及136座隧道272个隧道口，使信号在山谷间无缝接力，覆盖率显著提升，切换成功率提高，实现了隧道场景下5G网络的高质量贯通覆盖。该工程形成的高铁5G覆盖技术方案，已经纳入吉林省高铁通信建设标准，为类似复杂地形高铁覆盖项目提供可以复制的借鉴经验。

3. 沈白高铁无人区补盲工程

沈白高铁经过长白山原始森林无人区，沿线大多是生态敏感区和山区，存在建站引电难、环保要求高、施工空间有限等诸多难题。为实现全域5G信号覆盖，吉林省三大运营商，采用集约化建设模式，创建技术创新、资源整合的补盲体系。隧道采用RRU+POI+漏缆方案，隧道口高点部署场坪微基站在最小动工基础上实现信号接续，生态敏感区基于铁路先进的声音屏障装置，个性化适配小型化、低功耗基站，严格控制施工范围，减少对生态环境的影响。在工程建设过程中统筹共享站址、

电源、管线等基础设施，避免重复建设，降低建设成本30%以上。验收结果表明沈白高铁全线5G信号覆盖率为100%，衰减量控制在毫米级，语音通话清楚，数据传输稳定，完全能够满足350km/h高速运行环境下通信的要求。该工程所构建的高铁5G覆盖“吉林模式”，将技术创新、资源整合、生态保护三者结合起来，成功地运用到沈白、长珲、敦白等多条高铁项目当中，实现了技术效益、经济效益、生态效益三者共赢。

四、补盲技术应用的关键问题与应对策略

1. 成本与效益平衡问题

高铁沿线5G基站建设的初投资大、回报周期长的问题比较突出，单公里的5G基站建设成本为正常区域基站的2到3倍，运行阶段的能耗及维护费也较高，影响5G基站的推广使用。为了达到成本与效益的平衡，就要从建设、运营全流程推进降本增效。建设阶段全面实行中国铁塔统筹共建的方式，整合三大运营商资源，共享站址、电源、管线等基础设施，节约重复建设资金30%以上。运营阶段采用4G、5G协同的“哨兵”节能技术、基站浅深层休眠技术，根据客流潮汐变化及时对基站运行状况进行调节，从而达到节能减排25%以上的目的，大大降低电费支出。实行精准化投资，用大数据分析客流量大的地方、通信需求集中的区域，在客流量大的地方优先建设基站加密、技改，提高投资回报率，对于客流量小的偏远地区使用低功耗基站、按需覆盖技术，保证基本的通信质量，同时降低成本^[4]。

2. 技术适配性优化问题

高铁场景中不同车型车厢结构、车窗玻璃材质不同，造成信号屏蔽效果差异大，常规覆盖方案不能适应所有车型；长隧道内信号传输衰减严重，极端天气（暴雨、暴雪、雾霾）会加重信号衰减，这些问题都会影响补盲技术的适配性。根据车型的不同开展全车型信号屏蔽测试，建立车型屏蔽参数数据库，对不同车型定制覆盖方案，对屏蔽严重的车型调整漏缆敷设高度到车窗平齐处、优化天线角度提高信号入射效率，保证车厢内信号强度达到要求。为了解决长隧道信号衰减问题，研制出低损耗泄漏电缆、高效中继放大设备等，用低损耗漏缆可以将信号传输衰减量降低15~20%左右，配合高效中继设备可大幅度提高信号传输距离。针对极端天气影响，改善信号加强及抗干扰算法，增添信号冗余度，变动发射功率等方法，提升网络抗干扰性能，保证恶劣天气下信号稳定，创建极端天气预警体系，提前发动网络保障预案。

3. 多场景协同保障问题

高铁通信要完成枢纽、沿线路、公网、专网的联动工作，目前的信号分布不均，公网和专网资源配置失衡，造成全域的通信体验不好。对于高铁枢纽，用宏站、微站、分布式天线联合覆盖的方法来部署pRRU等微站，在候车厅、站台这些人员密集的区域部署高密度的微站，同时在换乘通道上部署分布式天线，上海南站两百多台pRRU以及分布式天线的布置使5G-A网络全域覆盖，信号驻留比和良好覆盖率均为100%，有效解决了枢纽区域信号拥堵的问题。公网和专网的协同用智能资源调度技术进行处理，节假日人流量大的时候利用高铁线路的智慧大脑对流量的变化进行实时感知，将公网冗余的资源调给高铁通信专网，保证高铁用户通信体验；非高峰期再把资源还给公网来满足本地居民的通信需求。建立高铁通信专网同沿线公网之间的协同优化机制，定时做联合检测并调整参数，使得二者可以无缝对接，全域通讯体验一致。

结语

高铁沿线5G基站布局补盲技术的创新应用，很好地解决了复杂地形、高速移动场景下5G基站布局的难题，给旅客通信、智能高铁发展提供保障。未来要不断推进技术更新换代，加深5G-A通感融合、AI智能建维等技术的应用，提高覆盖的准确性以及网络的智能化程度。同时还要健全跨部门协同机制，推进集约化建设模式，处理好建设成本和服务质量的关系。随着技术的不断发展，有望实现高铁全域无缝覆盖，促使高铁通信由“可用”向“优质”提升，给数字交通和区域发展注入新的动力。

参考文献

- [1] 张柠, 耿鲁静, 张晓彤, 等. 无线网灾害应急智能覆盖补偿体系研究与实践[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(11): 21-26.
- [2] 卞国东, 魏志刚, 郝隽, 等. 高铁无线网络协同组网策略研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2023, 36(04): 25-29.
- [3] 孙明海, 宋学龙, 沈鸿飞, 等. 高铁无线网奋战拉其间——牡佳高铁4G/5G覆盖工程纪实[J]. 通信管理与技术, 2022, (01): 16-24.
- [4] 杨勇. 地铁5G无线网覆盖方案探讨[J]. 数字通信世界, 2020, (10) 84-85+108.