

山区铁路地形遮挡削弱基站信号穿透能力

冯子禹

国能甘泉铁路有限责任公司, 内蒙古自治区巴彦淖尔市, 015300;

摘要: 山区铁路复杂地形对基站信号传播形成显著遮挡, 大幅削弱信号穿透能力, 易产生覆盖盲区、多径衰落及通信不稳定等问题, 难以满足铁路运营需求。本文系统分析地形遮挡对信号穿透的影响机理, 剖析典型地形下信号盲区、覆盖受限及高速移动穿透不稳等关键问题, 提出优化基站选址与天线部署、采用增强型穿透技术、构建分段覆盖与切换体系等对策, 并通过典型区段实施与测试验证。结果表明, 相关方案可有效降低信号穿透损耗、提升覆盖连续性, 为山区铁路通信稳定提供技术支持。

关键词: 山区铁路; 地形遮挡; 基站信号; 穿透能力; 信号覆盖

DOI: 10.64216/3080-1508.26.02.096

引言

山区铁路作为我国综合交通运输网络的重要组成部分, 其安全高效运营离不开稳定可靠的无线通信支撑。但山区铁路沿线地形复杂, 连绵山峰、深切峡谷、密集隧道等天然地理屏障, 对基站信号传播形成强烈制约, 导致信号穿透能力衰减、覆盖质量下降, 直接影响列车调度、应急通信及旅客服务。为破解这一技术难题, 明确地形遮挡对基站信号穿透的作用规律, 找准核心影响因素与突出问题, 本文结合山区铁路实际场景, 系统分析影响机理、梳理关键症结并提出优化对策, 为提升山区铁路基站信号覆盖稳定性提供技术参考。

1 山区铁路地形遮挡对基站信号穿透的影响机理

1.1 山区复杂地形对信号传播路径的阻断特征

山区铁路沿线分布着连绵起伏的峰峦、深切峡谷与形态各异的沟壑, 复杂地形构筑天然物理阻隔, 对基站信号传输路径形成多重遮挡。基站辐射的电磁波以直线传输为主要形式, 传输路径遭遇高耸山体时会被直接阻隔, 难以完成视距传输, 信号难以穿透由致密岩层与土体组成的山体结构, 部分信号被山体表层吸收, 残余信号经反射与散射后传输方向产生偏移, 难以对铁路线路形成有效覆盖^[1]。峡谷地带受两侧山体夹持产生空间约束作用, 抑制信号横向延展, 内部气流波动与地势起伏会加快信号损耗速率, 信号传输轨迹持续弯折, 传输损耗随之提升。地形剧烈起伏压缩可视传输距离, 非视距传输比例上升, 信号需经多次绕射与反射方可抵达铁路沿线, 单次折射与反射均会造成能量流失, 基站信号穿透性能随之下降, 难以对铁路沿线区域形成稳定覆盖。

1.2 山体遮挡下无线信号穿透损耗的量化表现

山体遮挡引发的无线信号穿透损耗, 可通过信号强

度衰减、传播距离缩减、传输稳定性降低等形式体现, 损耗大小与山体形态、遮挡厚度及信号频段存在紧密关联。山区铁路环境下, 信号穿透较薄山体斜坡时便会产生明显强度衰减, 接收端难以捕获稳定信号, 易出现卡顿与断续情况。遭遇厚重山体或连续山峦遮挡时, 信号难以完成有效穿透, 山体背侧会形成显著信号阴影区, 铁路途经该区域时易出现覆盖空白或弱覆盖现象。山区通信信号频段自身绕射与穿透性能偏弱, 受山体遮挡影响后传播距离进一步缩减, 覆盖范围随之收缩, 信号相位与幅度产生异常变动, 解调难度相应提升, 即便完成信号接收, 也会因损耗偏高引发误码、掉话等问题, 难以满足山区铁路通信运行的基础要求。

1.3 多径衰落与阴影效应对信号覆盖的叠加影响

山区铁路沿线山体、沟壑、植被等地形障碍可同步诱发多径衰落与阴影效应, 两类影响相互叠加, 持续降低基站信号穿透性能, 降低信号覆盖稳定性。阴影效应由山体等大型障碍阻隔形成, 信号传播路径受阻, 仅可依靠绕射方式抵达接收区域, 传输过程中信号能量被大量损耗, 形成大范围信号阴影区, 区域内信号接收强度持续降低。多径衰落为信号传播期间经山体、植被、轨道设施多次反射与散射, 生成多条路径信号分量, 各分量在抵达时间、相位与幅度上存在差异, 相互干涉后引发信号强度剧烈波动。山区铁路环境内, 阴影效应造就的信号薄弱区域为多径衰落提供叠加条件, 信号在弱覆盖基础上受多径干涉作用, 加剧衰减程度并引发失真与时延扩展, 恶化信号穿透效果, 即便可突破部分障碍, 也难以保障稳定的覆盖质量。

2 地形遮挡削弱基站信号穿透能力的关键问题分析

2.1 隧道、峡谷等典型地形下信号盲区形成机制

隧道作为山区铁路关键通行构造,封闭狭长形态自带电磁屏蔽特性,基站电磁波受隧道混凝土墙体与金属衬砌强烈阻隔,能量大幅损耗,难以完成有效穿透。长距离隧道的蜿蜒走向进一步限制信号直射通道,电磁波在洞壁间多次反射散射,既加剧能量耗散,又易引发信号干涉,造成信号强度持续衰减直至消失[2]。峡谷区域两侧山体高耸陡峭,构成天然遮挡屏障,基站信号传播路径受山体阻隔,难以形成视距传输,仅可依靠绕射与折射扩散,过程中伴随大量能量损耗,造成谷底与坡体区域覆盖能力不足。隧道内部电力设施、作业机械形成的电磁干扰,峡谷内气流扰动与植被遮挡等条件,共同影响信号传输稳定性,促使信号盲区产生,盲区范围随隧道长度、峡谷深度及地形复杂程度提升而不断扩展。

2.2 不同地貌对基站覆盖范围与穿透深度的制约

山区铁路沿线峰峦、峡谷、隧道、陡坡等复杂地貌持续改变无线信号传播轨迹,大幅压缩基站有效覆盖范围与信号穿透深度。连绵山体构成连续物理屏障,阻断信号直射传播,于铁路沿线形成大范围信号阴影区域,仅依靠绕射与散射维持微弱场强,难以支撑稳定通信作业。深切峡谷受两侧陡峭崖壁约束,信号横向扩散空间受限,传播方向沿狭长通道延伸,覆盖形态与传输距离偏离预设效果。隧道内部封闭空间与厚重衬砌形成强电磁屏蔽,外部信号难以穿透,洞内场强快速衰减,常规宏覆盖方案难以适用。陡峭坡面与起伏地形改变信号反射角度与传播损耗,诱发多径干扰与深度衰落,覆盖均匀性降低。茂密植被加剧信号衰减,枝叶对电磁波形成吸收与散射,基站信号穿透岩层与植被抵达线路的强度持续下降,有效覆盖半径进一步收缩。

2.3 列车高速移动中信号穿透稳定性不足问题

列车高速移动状态下,无线信号穿过程会伴随持续的信道时变与接收状态波动,山区地形遮挡进一步放大信号穿透的不稳定性。列车快速穿行于山体、路堑、隧道衔接区段时,外部基站信号的直射路径频繁被阻断,绕射与散射信号的传播路径持续改变,接收端信号强度呈现无规律快速起伏。金属密闭车体形成的电磁屏蔽效应与高速运动带来的多普勒频移相互叠加,信号穿透车厢后的解调与同步过程难以保持稳定。山区弯道与起伏地形会持续改变信号入射角度,穿透损耗随位置快速变化,车内接收信号难以维持稳定的功率与信噪比,链路连接质量随列车行进不断波动,信号穿透的连续性与可靠性受到显著制约。

3 针对地形遮挡的铁路基站信号穿透强化对策

3.1 优化基站选址与天线部署降低地形遮挡影响

结合山区铁路地形遮挡特征,基站选址借助数字高程模型与射线追踪算法开展全域勘测,避开山体、深谷、密林等强遮挡区域,优先布置于铁路沿线山腰、山梁等高位点位,缩短信号直射路径并扩大视距覆盖范围[3]。连续弯道与峡谷区段采用交错式站址布局,缩小基站间距并形成接力覆盖,消除地形带来的覆盖盲区与弱场区域。天线部署采用高增益窄波瓣定向天线与双极化赋形天线,适配铁路线性覆盖需求,精准调节方位角与俯仰角,使主瓣信号沿线路延伸并绕开山体遮挡。合理设置天线挂高与垂直波束角度,降低坡面反射与多径衰落,隧道口等过渡区段配合场坪天线与分布式射频单元,强化信号穿透与衔接效果,利用分集接收与零点填充技术提升接收稳定性,减小穿透损耗,保障列车高速运行时信号连续可靠。

3.2 采用增强型信号穿透技术提升覆盖能力

增强型信号穿透技术可提升山区铁路基站在复杂地形下的穿透与覆盖水平,通过多频段协同组网增强绕射与穿透能力,优先利用低频段提升信号跨越山体、弯道等遮挡区域的性能。结合高增益定向天线与多波束赋形技术,将信号能量集中投射至铁路沿线受遮挡区域,减缓地形阻隔带来的快速衰减。隧道、深切峡谷等屏蔽严重区段部署光纤拉远单元、分布式天线系统与低损耗泄漏电缆,实现信号均匀辐射,配合多RRU合并的超级小区技术降低链路波动,提升穿透稳定性。引入智能射频优化与动态功率调节,自适应调整功率与波束角度,对弱覆盖区域实现定向增强,利用光纤直放站补盲、载波聚合拓宽传输带宽,确保信号穿透多层遮挡后仍保持稳定强度与质量,满足山区铁路连续覆盖要求。

3.3 构建分段覆盖与切换保障体系改善通信质量

构建分段覆盖与切换保障体系改善通信质量,可结合山区铁路沿线地形起伏、山体遮挡密集的特点,按照弯道、坡道、隧道口、峡谷等不同地形特征划分通信覆盖区段,依据信号衰减规律合理设定各段覆盖边界与重叠区域,减少因地形突变造成的信号中断。在区段衔接位置增设辅助覆盖节点,提升相邻基站间的信号衔接强度与连续性,避免因山体遮挡导致切换区域信号强度不足。优化切换触发阈值与切换算法,适配山区快速移动的列车运行场景,缩短切换时延并降低切换失败概率,通过动态调整切换参数适配不同遮挡程度下的信道状态。依托分段覆盖结构形成连续稳定的通信链路,削弱地形遮挡对穿透传输的负面影响,保障列车在复杂山区线路运行过程中语音通信、数据传输及业务调度的连续性与稳定性,维持全程通信质量见图1。

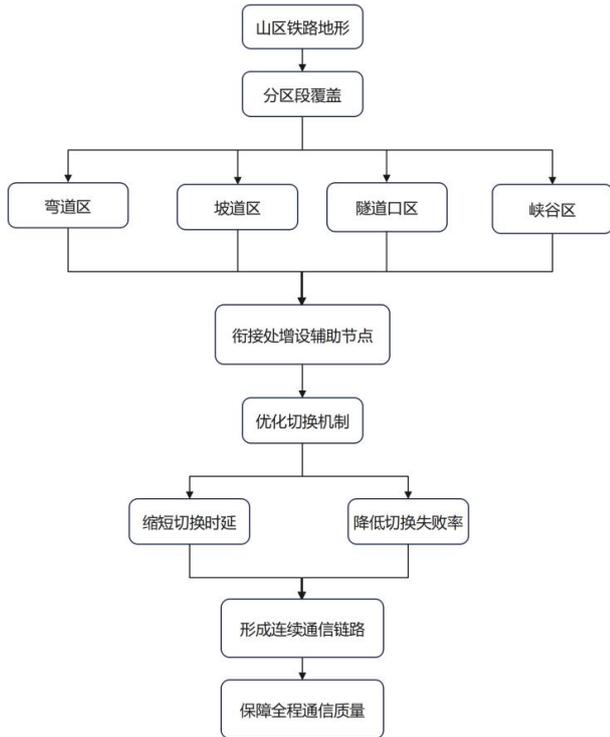


图1: 山区铁路分段覆盖与切换保障体系流程图

4 山区铁路信号覆盖优化方案实施与效果验证

4.1 典型地形区段信号强化方案落地措施

结合山区铁路山体遮挡密集、弯道与路堑占比高、信号穿透损耗大的地形特征,按路堑、连续弯道、隧道群三类典型区段推进信号强化落地。路堑区段优先选用高位山梁建站模式,将宏站天线架设于线路两侧高于轨面20米以上位置,搭配18dBi高增益定向天线,避开山体与植被遮挡,单站有效覆盖距离提升至2公里,信号穿透损耗降低约30%。连续弯道区段采用之字形交错布站,配合AI动态波束赋形技术实时调整天线倾角,消除弯道阴影盲区。隧道群区段推行漏缆贯通与光纤直放站组合方案,洞内每500米部署RRU信源,敷设5/4英寸低损耗泄漏电缆,洞口增设场坪定向天线延伸覆盖,扩大隧道内外重叠覆盖带,小区切换时延控制在0.16秒以内,保障高速移动状态下信号连续稳定。

4.2 信号穿透性能提升效果测试与评估方法

结合山区铁路地形遮挡引发信号穿透衰减的实际场景,构建室内仿真与现场实测相结合的穿透性能验证体系,借助专业射频测试仪器及铁路专用通信测试终端,在山体遮挡、植被密集、弯道交错等典型弱覆盖区段开展连续数据采集。测试过程中记录信号入射角度、遮挡物材质与厚度、传播路径损耗等环境参数,依据铁路通信场强测试规范设定采样间隔,获取方案实施前后接收电平、穿透损耗、信噪比等关键指标变化^[4]。采取定点测试与动态车载扫描相结合的方式,在沿线不同高程及遮

挡等级点位布设测试断面,量化分析高增益天线、功率补偿、波束赋形等措施对穿透性能的提升效果,利用GIS系统实现测试数据与地形信息的融合分析,形成可量化、可复现的评估结论,为铁路通信优化方案的完善提供可靠数据依据。

4.3 常态化运维保障信号稳定穿透与可靠传输

依托山区铁路沿线地形特征与信号遮挡衰减规律,构建全周期、多维度的常态化运维体系,强化基站信号穿透性能与传输稳定性。依据分级巡检标准对沿线基站天线、馈线及射频单元开展定期检查,清理山体植被遮挡,调整天线方位角与下倾角,缓解地形遮挡引发的信号穿透损耗^[5]。借助智能监测平台实时采集场强、信噪比、驻波比等关键指标,对弯道、陡崖、隧道口等遮挡严重区段建立预警机制,排查并处理设备老化、接头松动、馈线损耗增大等隐患。结合山区气象与地质变化,优化基站发射功率、小区切换参数及波束赋形策略,增强信号绕射与穿透效果,针对强降雨、滑坡等灾害完善应急抢修流程,快速恢复弱覆盖区域通信质量,保障列车运行中信号稳定穿透与连续传输,维护复杂地形下无线通信链路可靠通畅。

5 结语

山区铁路连绵山体、峡谷、隧道等复杂地形,通过阻断传播路径、加剧信号损耗、叠加多径衰落与阴影效应,严重削弱基站信号穿透能力,引发信号盲区、覆盖不稳等问题,制约铁路通信质量。本文分析了地形遮挡的影响机理与关键问题,提出基站选址优化、增强型技术应用、分段覆盖保障等针对性对策,并通过典型区段落地与效果验证,有效降低了信号穿透损耗。后续需依托常态化运维与技术迭代,持续适配山区地形与列车高速移动需求,化解地形遮挡制约,保障山区铁路通信持续稳定,为铁路安全运营提供可靠通信支撑。

参考文献

- [1]徐刘,朱峻枫,罗迅.山区单线普速铁路隧道内铁路信号接口工程分析[J].现代隧道技术,2023,60(S1):203-208.
- [2]张宾.山区峡谷5G信号盲区的应急通信临时组网方案[J].电信快报,2025,(12):19-21+32.
- [3]戴智鸿.提升山区无线信号强度测量准确性的应用研究[J].电工技术,2022,(21):182-184.
- [4]郭聪.北斗三号卫星信号增强技术在山区复杂地形测绘中的实践[J].北斗与空间信息应用技术,2025,(05):122-124.
- [5]曹文琛,张涛,郑宇恒,等.不同地形管道光缆信号综合分析研究[J].光通信研究,2022,(02):35-39+68.