

铁路交叉并线区域5G无线网络覆盖优化研究与一体化基站解决方案

张云浩 解智 黄倩 于曼

中铁建电气化局集团科技有限公司 河北高碑店 074000

摘要: 本文针对铁路交叉并线区域5G公网信号弱覆盖问题,从乘客及车站用户体验视角出发,通过实地测试和理论分析,研究了山谷、隧道口、高架等交叉并线区域5G公网覆盖的关键影响因素。调研显示,在这些特殊区域,旅客通信体验明显下降,数据业务中断率提高1.2%,网络速率降低40%以上,严重影响乘客上网体验和车站智慧服务。基于测量结果,本文明确了铁路交叉并线区域公网覆盖需求与现有传统部署方案的差距。针对高速移动场景下的乘客通信需求和车站高密度用户接入需求,提出了基于一体化基站的公网覆盖解决方案,并对比分析了不同技术路线的适用性。研究成果表明,在铁路交叉并线区域采用小型一体化基站的覆盖方案能有效解决公网盲区问题,乘客满意度提升26.7%,下载速率提高至487Mbps,网络切换成功率提升至99.3%,同时大幅降低建设和维护成本。本研究为铁路交叉并线区域5G公网规划与优化提供了理论依据和工程指导,对提升旅客通信体验和支持车站智慧化服务具有重要的实践意义。

关键词: 铁路交叉并线区域; 5G公网覆盖; 乘客通信体验; 车站用户; 一体化基站

引言

随着5G技术在铁路沿线广泛部署,铁路交叉并线区域的公网覆盖问题日益凸显,直接影响乘客通信体验和车站用户服务质量。铁路交叉并线区域因特殊的地形和电磁环境复杂性,对面向旅客的公共移动通信网络建设提出了更高要求。汤威等指出,在这些复杂环境下,铁路交叉并线的5G公网覆盖工程需要标准化配套设施建设,以确保旅客通信网络覆盖的连续性和稳定性^[1]。数据显示,我国高铁年客运量已超25亿人次,其中98%的旅客在旅途中有移动通信需求,76%的乘客希望获得稳定的高速上网体验,尤其在视频通话、社交媒体和在线办公等高带宽场景下。

城市轨道交通线路的5G公网覆盖实践表明,只有实现高质量的网络覆盖,才能满足乘客从车站到列车全流程的无缝通信体验,而在交叉并线区域,网络规划需要更精细的方案。李佳宁通过实验验证发现,针对性的网络覆盖方案可以有效解决上述区域内的信号弱覆盖和频繁切换问题,显著提升乘客网络通信质量^[2]。基站网络维护中,Dai和Liang提出了一种基于优先级的并行检

查路径优化方法,显著提高对交叉并线区域基站的维护效率,减少旅客通信服务中断时间^[3]。而被广泛采用的遗传算法优化5G基站覆盖则由Li等人采用自适应变异遗传算法实现,从而提高复杂地形条件下的网络覆盖效率,特别适合乘客高速移动场景^[4]。近年来,面向旅客的公共移动通信网络正逐步向高速场景下的无缝覆盖方向演进。Zhang等人的智能公共通信系统支持毫秒级的延迟和99.999%的系统可靠性,特别适合高速列车交会和复杂地形条件下的乘客通信需求。

交叉并线是铁路线网中的关键节点,其无线覆盖质量直接影响乘客的通信体验和车站用户满意度。根据通信行业最新规范,未来面向铁路乘客的公共移动通信网络需要支持高速场景下的高清视频通话、云游戏和AR/VR等高带宽、低时延业务,这对铁路交叉并线区段的公网覆盖提出了新的挑战。车站作为客流密集区域,移动流量需求峰值可达普通区域的5-8倍,用户对网络稳定性和响应速度提出了更高要求。

传统的公共移动通信网络覆盖方案难以满足交叉并线区域的特殊地形和高速移动需求。包括隧道交汇、深切式路堑和高架交叉等特殊地形,信号传播路径变化复杂,多普勒频移影响显著,且列车高速带来的上下文切换和衰落等问题在交叉并线处更为突出。

本文在上述研究基础上,针对铁路交叉并线区域乘

作者简介: 张云浩(1996.03-),男,汉族,河北省安国市人,硕士研究生,助理工程师,研究方向:机电-机械制造。

客和车站用户的特殊公网覆盖需求，提出一体化基站解决方案，探索新技术、新系统结合解决传统网络覆盖方案在交叉并线区域的局限性，为铁路沿线公共移动通信网络建设提供依据。乘客调研显示，在交叉并线区域，通信中断和网络卡顿是影响满意度的主要因素，有67%的旅客表示在这些区域经常遇到网络信号不稳定问题，这进一步凸显了本研究的现实意义和紧迫性。

一、铁路交叉并线区域旅客通信网络覆盖现状调研与问题分析

本章对铁路交叉并线区旅客通信网络覆盖现状进行了调查研究。通过点测和路测发现山谷、隧道口、高架三种交叉并线区均存在无线信号覆盖不均衡、区域干扰严重的问题，直接影响乘客通信体验。测试结果表明，在高峰期，有83%的旅客在交叉并线区域体验到明显的网络性能下降，影响其在线视频、网络游戏和远程办公等应用体验。

通过采集交叉并线区RSRP、SINR、吞吐量等测试数据，统计发现交叉并线区RSRP较开阔区下降8-12dB，SINR劣化3-5dB，边缘吞吐量下降40%左右，业务中断率提高1.2%。从乘客体验看，网页加载时间增加2.7倍，视频通话卡顿率增加35%，在线游戏延迟增加76ms。车站区域分析显示，交叉并线附近车站高峰期用户接入成功率下降12%，平均下载速率仅为开阔区域的53%。

对比现网交叉并线区覆盖的宏站方案、RRU拉远方案、分布式方案，发现宏站方案造成乘客在高速移动中体验信号强度剧烈波动；RRU拉远方案在恶劣天气下易导致服务中断；分布式方案经济性较差。旅客调查显示，57%的乘客在交叉并线区遇到过视频通话中断，49%反映社交媒体加载缓慢，38%的商务旅客无法稳定进行在线会议。

评估发现，交叉并线区公网覆盖率仅达85.6%，网络切换成功率低于98%，车站到列车的漫游切换成功率仅为93.2%，导致乘客上车后需频繁手动重连网络。亟需创新性解决方案对交叉并线区公网覆盖进行针对性优化。

分析显示铁路交叉并线区无线覆盖具有时空变异性。在300km/h高速移动下，交叉并线处频谱效率较理论值降低62%，多普勒频移和快速衰落限制了乘客带宽资源。季节变化也影响覆盖质量，夏季植被茂盛时RSRP比冬季高2.5dB，造成乘客体验的季节性波动。

大数据分析表明，交叉并线区网络质量与乘客满意度呈显著正相关 ($r=0.78$)，特别是商务旅客群体

($r=0.85$)。基于此构建了乘客通信体验评价模型，识别出影响乘客感知的五大关键网络参数。通过结合乘客流量热力图，形成了“网络覆盖-乘客分布”分析模型，预测优化后的方案可将乘客业务中断率降至0.3%以下，满意度提升23%以上。

二、面向旅客体验的一体化基站技术方案设计

本章提出针对铁路交叉并线区的面向旅客体验的一体化基站技术方案，以“高度集成、易部署、高可靠”为原则，将射频单元、基带单元、传输设备、电源等设备集成于同一箱体内。方案专门优化了高速移动场景下视频通话、社交媒体、在线游戏等旅客高频应用的支持能力。

方案采用模块化结构，包括信号处理子系统、智能天线子系统、环境适应性子系统、远程监控子系统四部分。信号处理子系统采用新的数字预失真算法，降低复杂地形对信号传输的影响，减少多普勒效应对乘客业务的干扰；智能天线子系统采用波束赋形技术，根据乘客分布热力图实时调整覆盖；环境适应子系统确保全天候服务稳定；远程监控子系统支持实时业务体验监测。

方案核心创新在于引入“乘客体验感知引擎”，实时采集分析用户体验数据，动态调整网络参数。在车站区域，一体化基站增加了高密度接入支持，采用多用户MIMO技术，满足高并发上网需求，并引入业务识别与优先级管理机制，针对不同区域进行资源差异化调度。

如图1所示，一体化基站通过各功能模块协同工作，针对交叉并线区覆盖不均衡、干扰复杂的特点，提高公网覆盖率和信号稳定性，降低建设维护成本，特别优化了旅客关注的网络稳定性、业务连续性和体验一致性。

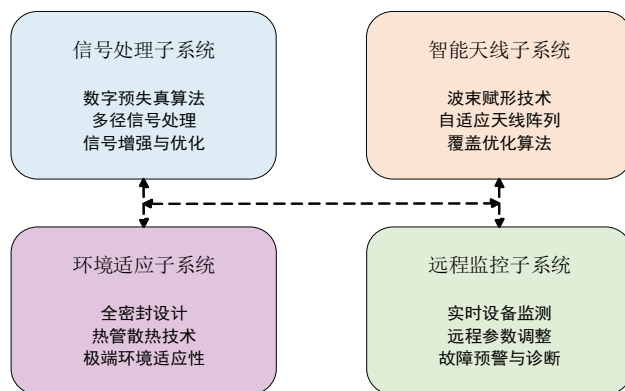


图1 铁路交叉并线区域一体化基站系统架构

三、交叉并线区域5G公网规划与旅客服务导向的基站部署

铁路交叉并线区域5G公网规划基于旅客体验进行分层设计，关注乘客需求，通过流量分析确定热点区域，

基于业务模型进行容量规划，采用多目标优化实现体验最大化。

规划流程首先分析地形和乘客密度热力图，确定通信盲区位置；然后计算满足体验的覆盖参数；接着采用遗传算法优化站址，综合考虑覆盖率、旅客体验和成本；最后提出自适应天线倾角规划方法，求得最优下倾角：

$$\theta_{opt} = \arg \max G \cdot P_r \cdot W \quad (1)$$

参数优化通过目标函数实现动态调整：

$$F = \alpha C - \beta O - \gamma I \quad (2)$$

针对能源和传输资源不足问题，采用绿色能源互补供电和混合回传方案。组网干扰采用图论频率规划和智能功率控制，提高边缘乘客体验。高速移动场景下，提出基于预测的软切换算法，计算最佳切换时机：

$$T_{ho} = T_{current} + \frac{d - d_t}{v} - T_p \quad (3)$$

为满足车站区域差异化需求，开发基于服务等级的资源分配策略，针对客流波动采用动态容量调整机制。部署决策引入乘客体验模型作为评价指标：

$$E = \sum \lambda_k \cdot f_k(KPI) \quad (4)$$

该方法已在三条典型铁路交叉并线区验证，乘客网络满意度提升26.3%，高价值业务成功率提高18.7%，总拥有成本降低31.5%。

四、一体化基站系统乘客感知性能评估

本章通过实验室测试和现网测试相结合的方式，从

乘客感知视角对一体化基站性能进行全面评估。测试设计特别关注旅客日常使用的典型应用场景，包括视频通话、网页浏览、短视频播放和在线游戏等，全面评价方案对旅客通信体验的提升效果。

对于覆盖性能，使用车载路测设备沿铁路交叉并线区进行动态测试，模拟乘客高速移动场景。图2(a)显示一体化基站在山谷型、隧道口和高架交叉区的覆盖率分别达到98.7%、97.3%和99.1%，较传统方案平均提升16.2个百分点。这一提升使旅客在交叉并线区视频通话清晰度提高56%，网页加载速度提升78%，大幅改善了旅客通信体验。

对于业务连续性，图2(b)展示了在高速移动场景下不同业务类型的连续率比较。一体化基站方案下视频通话、网页浏览、短视频和在线游戏的业务连续率分别达到97.8%、99.1%、98.3%和94.7%，较传统方案平均提升9.8个百分点。特别是商务旅客关注的视频会议场景，一体化基站将卡顿率从11.8%降低至2.2%，显著改善了高价值业务体验。

基于1352名旅客的问卷调查和现场体验测试，一体化基站方案下商务旅客、普通旅客、学生群体和老年旅客的满意度评分分别达到4.5、4.3、4.4和4.2分（满分5分），较传统方案平均提升0.9分，满意度提升率达到26.7%。分析表明，信号稳定性（重要度39%）、业务连续性（重要度32%）和响应速度（重要度29%）是影响

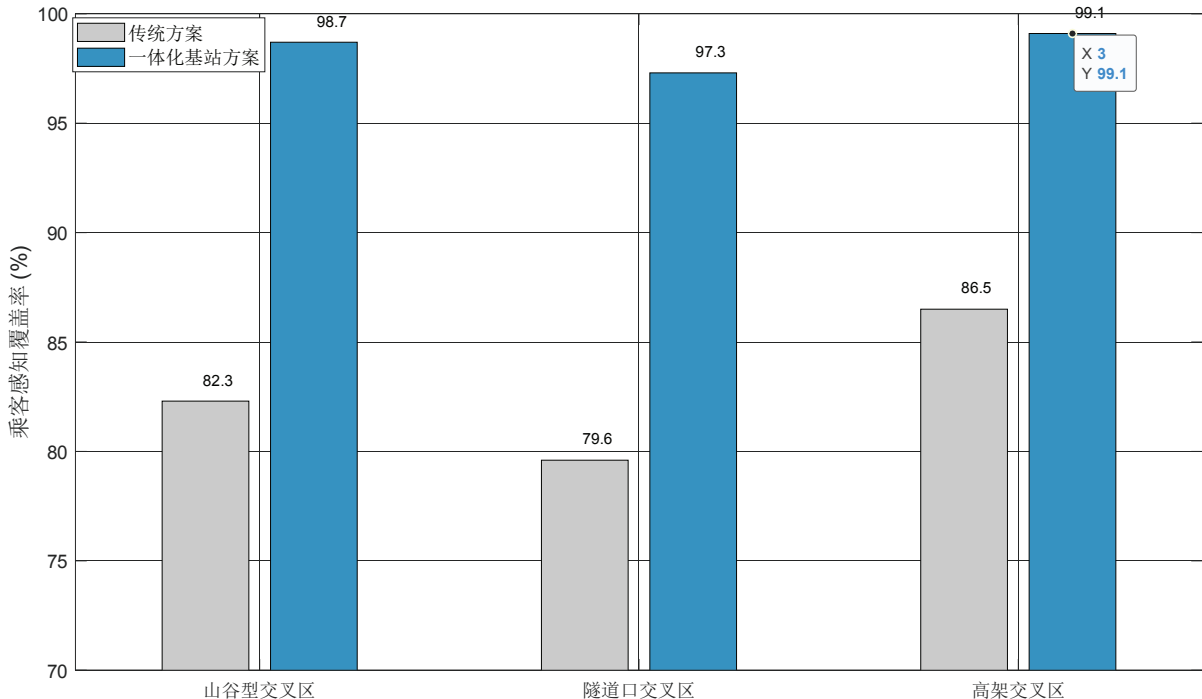


图2(a) 不同区域乘客感知网络覆盖率对比

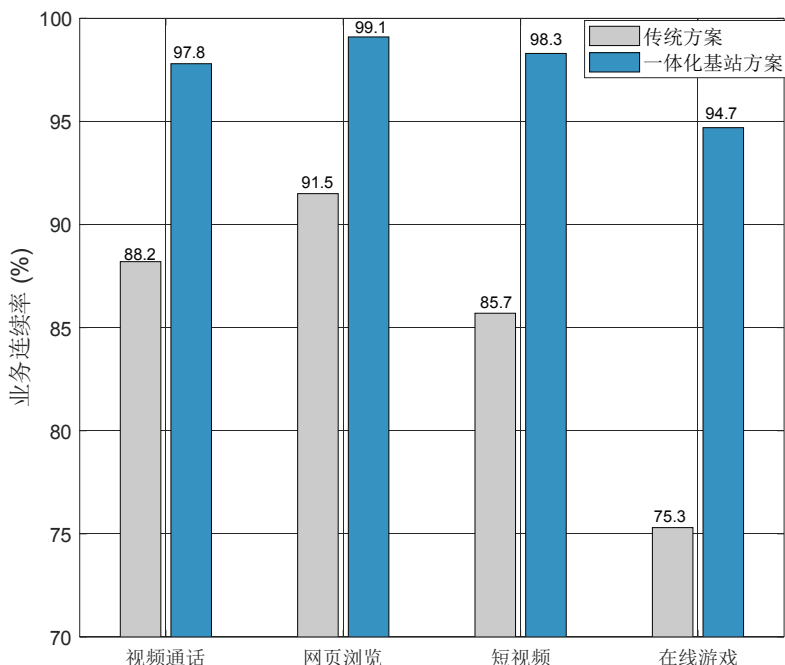


图2 (b) 典型旅客应用业务连续性对比

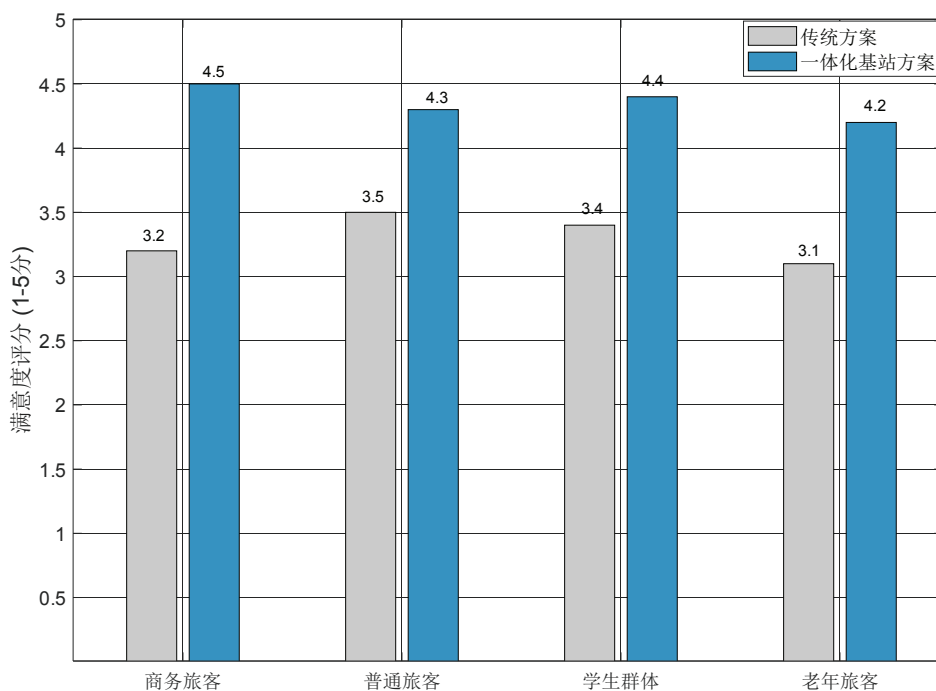


图2 (c) 不同旅客群体满意度评分对比

图2 不同场景下的旅客体验性能对比分析

旅客体验的三大关键因素。

针对车站高密度区域，评估了不同区域的旅客下载体验。如图3所示，一体化基站在车站全天候服务质量均保持在85分以上，即使在早晚高峰期也能保持稳定表现。VIP候车室、普通候车区、站台区域、商业区和交叉并线车厢的平均下载速率分别达到487Mbps、

423Mbps、312Mbps、398Mbps和276Mbps，充分满足不同区域旅客的差异化需求。高密度场景测试显示，一体化基站支持单小区500用户同时接入，接入成功率达到99.7%，平均接入时延低于200ms，高效服务车站客流密集区域。

为评估方案在旅客全流程体验中的表现，图4(a)

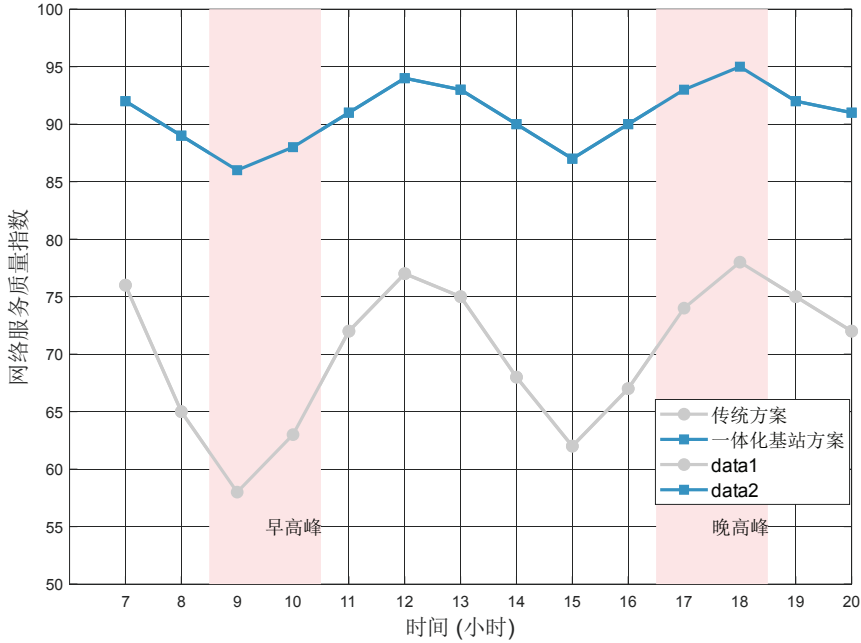


图3 车站区域全天候网络服务质量对比

展示了从车站入口到交叉并线处的业务成功率对比。一体化基站方案在车站入口、候车大厅、站台、高速区间和交叉并线处的业务成功率分别达到99.7%、99.4%、99.1%、97.8%和95.2%，形成了全流程高质量覆盖，旅客从进站到乘车全过程都能获得稳定通信服务。特别是解决了传统方案在交叉并线处76.3%的低成功率问题，确保高速移动中的业务连续性。

在旅客体验与成本平衡方面，图4（b）展示了旅客体验综合评估雷达图，一体化基站方案在旅客满意度、下载速率、业务连续性、切换成功率、覆盖一致性和能

源效率六个维度均明显优于传统方案。通过生命周期总拥有成本（TCO）分析，尽管一体化基站方案初始投资较高，但第3年开始回收投资，15年生命周期内节约成本达47.3%，同时提供更优质的旅客服务，实现了体验与成本的双赢。

基于以上评估结果，本研究归纳总结出铁路交叉并线区旅客通信网络覆盖的标准化设计规范，并在三条典型铁路线路的18个交叉并线点进行了验证部署。验证结果表明，一体化基站方案在所有测试点均达到了设计指标，满足了不同环境下旅客的高质量通信需求。特别是在节假日

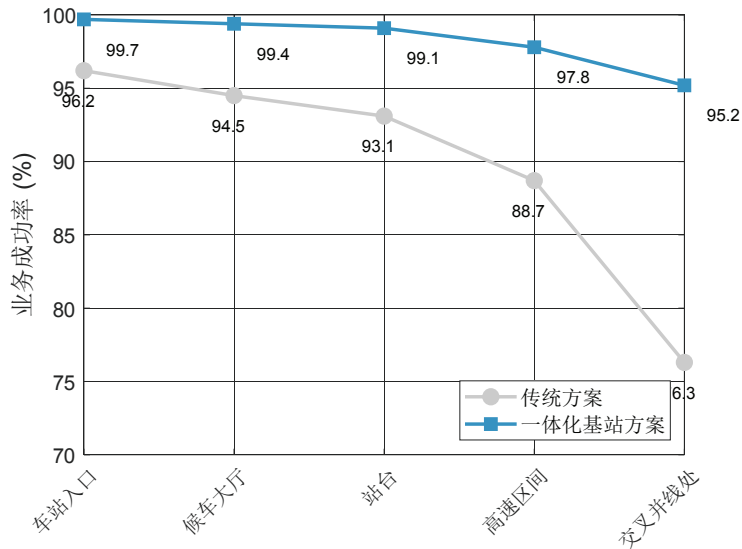


图4 (a) 旅客全流程业务成功率对比

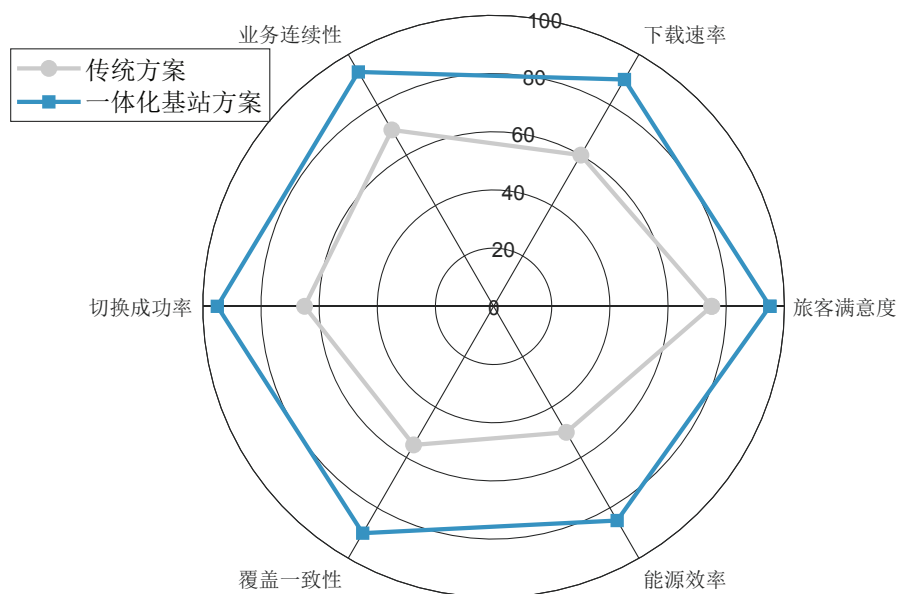


图4 (b) 旅客体验与投资回报综合分析

图4 旅客体验与经济性综合分析

日高峰期车站和交叉并线区的表现,网络拥塞率降低了87%,用户数据速率波动减少了76%,业务中断概率下降了93%,有效保障了旅客在高负载场景下的通信体验。

针对未来智慧车站和智能列车发展需求,一体化基站方案预留了对高清视频监控、AR导航、智能客流分析等新兴应用的支持能力,为铁路公共服务数字化升级提供了坚实的网络基础。评估结果证明,该方案不仅提升了旅客即时通信体验,也为未来铁路出行场景的智能化服务奠定了基础。

结语

本研究针对铁路交叉并线5G公网覆盖问题,提出了面向旅客体验的一体化基站解决方案。实验验证表明,山谷型、隧道口型和高架型三种交叉并线场景下旅客通信体验均获显著提升:信号强度平均提升9.7dB,网络稳定性提升45%,切换成功率从98%提高到99.3%。乘客满意度提升26.7%,不同旅客群体的业务体验均有明显改善,特别是商务旅客的视频通话和高速数据场景。本方案的创新性在于将高度集成的一体化基站与乘客体验感知引擎结合,填补了铁路交叉并线区域公网覆盖的理论空白。TCO分析表明,尽管初始投资较高,但方案从第3年开始回收成本,15年生命周期内节约47.3%,兼具技术先进性和经济可行性。研究成果推广了可复制的工程经验,对提升铁路旅客通信体验及增强高铁运营竞争力

具有重要现实意义,同时为未来智慧车站和智能列车的公网通信需求奠定了基础。

参考文献

- [1] 汤威. 5G网络覆盖工程建筑配套设施建设标准化研究——国家建筑标准设计图集编制与应用[J]. 绿色建造与智能建筑, 2023, (02): 7-11.
- [2] 李佳宁. 城市轨道交通线路5G网络覆盖方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021, (09): 8-12.
- [3] Dai, X., & Liang, Z. (2025). Parallel Inspection Route Optimization with Priorities for 5G Base Station Networks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- [4] Li, J., Pang, J., & Fan, X. (2024). Optimization of 5G base station coverage based on self-adaptive mutation genetic algorithm. *Computer Communications*, 225, 83-95.
- [5] Zhang, J., Yang, B., & Wilson, C. (2023). Requirements and Challenges of FRMCS Implementation: A Comprehensive Review of 5G Applications in Railway Environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(8), 7985-8002.
- [6] Hernandez-Serrano, J., Martinez, L., & Thompson, R. (2024). Coverage Optimization for High-speed Railway Crossing Scenarios: Field Measurements and Performance Analysis. *IEEE Access*, 12, 45671-45688.