

地铁场景无线通信网络优化及

Optimization and Challenges in Wireless
Communication Networks for Subway Scenarios

难点思考

张梦妍¹,何超¹,王晓峰²(1. 中国移动通信集团设计院有限公司,北京 100080;2. 中国移动通信集团设计院有限公司北京分公司,北京 100038)

Zhang Mengyan¹,He Chao¹,Wang Xiaofeng²(1. China Mobile Group Design Institute Co.,Ltd.,Beijing 100080,China;2. China Mobile Group Design Institute Co.,Ltd. Beijing Branch,Beijing 100038,China)

摘要:

地铁作为城市中重要的公共交通工具,其无线通信网络覆盖是保障乘客通信需求和智能化管理的关键。深挖地铁场景下的无线通信网络现状和问题,基于客户感知及客户需求,通过精细化场景评估体系,同时利用实际路测数据和网管数据,深入探讨了地铁无线通信网络的优化方法,并基于现网优化方案提出相应策略。

关键词:

地铁场景;无线通信;网络覆盖;优化

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.07.009

文章编号:1007-3043(2025)07-0053-06

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:

As an important public transportation tool in cities, it is crucial that the subway has wireless communication network coverage for ensuring passengers' communication needs and intelligent management. It delves into the current state and issues of wireless communication networks in subway scenarios. Based on customer perception and the implementation of customer needs, and through a refined scenario assessment system, it utilizes actual drive-test data and network management data to thoroughly explore methods for optimizing wireless communication networks in subways. Furthermore, it proposes corresponding strategies based on actual network optimization plans.

Keywords:

Subway scenario; Wireless communication; Network coverage; Optimization

引用格式:张梦妍,何超,王晓峰. 地铁场景无线通信网络优化及难点思考[J]. 邮电设计技术,2025(7):53-58.

1 概述

随着城市化进程的加速和科技的发展,基于运营商优先保障2B业务、实现核心城市核心区域重点口碑场景5G网络质量拉平4G的战略化部署,作为现代城市交通的重要组成部分的地铁场景因为其整体场景的复杂性和特殊性,逐步进入优化人员的视野。然而,地铁网络与大网覆盖具有显著差异,是典型的特殊场景,需要同时保证线性覆盖与室内深度覆盖以及

高峰均比下的用户感知,同时还需解决好出入口的互操作问题,这对网络规划、优化、维护提出了更高的要求。本文深入研究了地铁无线通信网络日常优化问题,为提高地铁通信的服务质量和用户体验提供借鉴和参考。

2 地铁无线通信网络现状及存在问题分析

2.1 场景性质特殊,质量提升难

地铁作为现代城市的主要公共交通方式之一,为大量市民提供快速、便捷的出行方式。然而,由于地铁通常处于地下环境中,作为典型的封闭一半封闭复

收稿日期:2025-05-14

杂场景,优化人员相当于同时面对类似高铁(封闭组网+隧道+高切换频次+多普勒频移)、普通建筑物(单纯室分)、半开放建筑物(室分+边缘宏站)、临街商铺(室分+底层小微站)等场景的组合。

2.2 地形复杂高穿透损耗,导致整体问题复杂化

首先,地铁车厢内部由于金属体的遮挡、增厚的车体及站台各种承重墙体的穿透损耗极大,尤其是地下承重的复合墙体,穿透损耗高达45 dB,严重影响信号的传播,降低了大批用户的体验(数据加载方面相对严重),在地下封闭复杂且多墙环境下,多径衰落和阴影效应严重的多。其次,地铁站和地下通道等地方存在各种狭窄建筑结构复杂难以覆盖的问题区域,导致实际抵达接收电平较弱以至于网络无法连接。且相较单层站承重结构(见图1),换乘站因为涉及更多交错线路、双站台和更深的地层带来的高强度承重结构,实际覆盖优化策略更为复杂(见图2)。综上所述,地铁场景下主要存在穿透损耗大、存在覆盖盲区和用户密度大等网络问题。

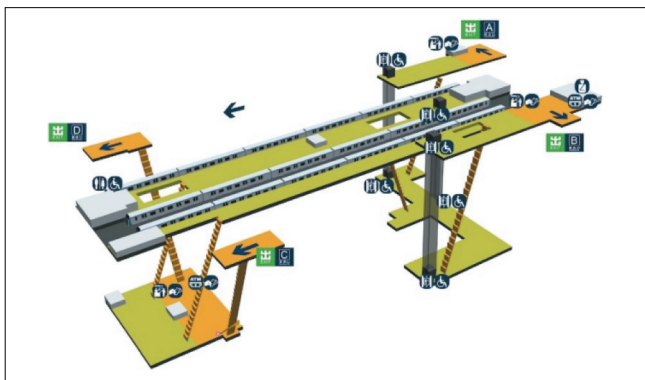


图1 单层站示意

2.3 瞬时客户量大,场景特殊性导致用户对网络质量的需求相对较高

从业务需求角度来分析,首先,用户需要在地铁中能够稳定地进行通话、信息甚至是视频等业务,“保持顺畅联系”是主要目标;其次,随着互联网技术的普及,用户在地铁中也希望能够畅快地冲浪,即进行信



图2 换乘站示意

息/新闻浏览、社交媒体、网络游戏等大流量高并发业务;此外,随着直播兴起,地铁用户对实时视频和音频的需求也在不断增加,如在线观看直播、视频会议等。乘客以上班族居多,在上下班高峰期形成客流高峰,根据某省全天PRB利用率业务模型(见图3)来看,峰值时段较其他时段上涨2倍以上,在话务量设计上必须考虑。

3 分场景无线网络优化策略

3.1 覆盖场景类型梳理

地铁覆盖系统类型从覆盖场景上主要分为站厅站台和隧道2类,其中夹杂着类似出入口、桥梁等衔接场景,属于宏站室分小微站漏缆协同服务的场景,这些场景是极其复杂的待拆解场景。下面针对整体场景进行逐一梳理并分别提出相应优化方案建议。

3.1.1 隧道场景

隧道可以简单理解为位于地下的全封闭、管道型的专网场景,在隧道、车厢内往往接收不到室外的信号,无异常信号侵入,环境比大网纯净,系统间干扰基本可控。此外由于隧道空间相对狭窄,当车厢通过时,填充效应较为明显,所以常规地铁隧道覆盖都是采用泄漏电缆来实现,由于地铁列车车体基本由复合材料、金属材料及玻璃(老型号地铁车皮由相对较厚的金属组成)组成,相对于车体金属和车门复合材料,车窗玻璃材质的穿透损耗相对较小,故一般将泄漏电

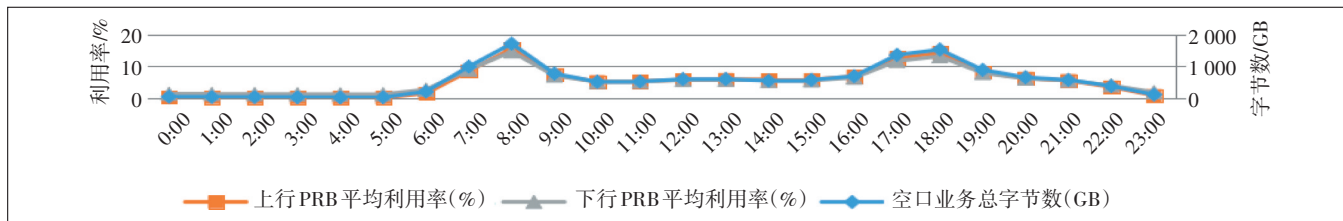


图3 某省全天上下行PRB利用率

缆部署在车厢车窗上沿高度的位置,漏缆开孔方向朝向车体,有利于电磁波穿透车窗对车内用户进行精准覆盖。但由于漏缆本身损耗大,为保证隧道内信号连续覆盖,根据链路计算,每隔一定距离(封闭环境约500 m地铁避车洞)需断开漏缆(即断点),增加RRU等有源设备或中继来增强信号。

3.1.2 站厅/站台场景

站厅/站台实际可以看做2个场景,站厅大多为纯室分覆盖,站台多为室分+漏缆覆盖(会有一节隧道),覆盖的场景主要分为地上站台和地下站台2种场景。

a) 地上站厅/站台。该场景特点是整个车站主体全部位于地面以上,一般大部分是高架站(或齐平地地面例如轻轨站),为室分宏站交接场景,存在明显的边界,一般优先对站台/站厅采用微站或分布式天馈线系统进行覆盖。微站设置以站台及站台前后100 m区域的轨道为覆盖目标,轨道侧不再设置漏缆,在条件允许且不增加工程实施难度的情况下对站厅进行整体覆盖。

b) 地下站厅/站台。地下站台基本为狭长型、空旷场景,位于地下封闭空间,远离大网,收不到室外宏站的信号,环境网络相对纯净,无干扰;潮汐效应明显,在上下班高峰期(或节假日)人流相对密集,业务整体需求量较大,其余时间业务量较小。对于地下站厅/站台,多采用分布式天馈线系统、分布式皮站或微站进行区域覆盖。站厅/站台分布系统建设方式参照传统建筑室分,因涉及过渡场景,可在站厅/站台的公共区域及出入通道口使用吸顶或壁挂天线进行覆盖,天线覆盖半径为10~16 m。

3.1.3 出入口场景

出入口作为连接站厅与站外的通道,是一种典型的覆盖转换场景,一般根据车站类型可分为地面站的出入口和地下站的出入口。

a) 地面站出入口。地面站一般默认为高架站(多数高于周边建筑),出入口多与室外道路直接衔接,网络环境相对复杂,出入口处能收到周边宏蜂窝的信号,也存在周边临近建筑外泄室分污染。

b) 地下站出入口。地下站的出入口是连接地下站厅与地面的连接通道,地下部分采用室分覆盖,地上部分多为周边宏站/微站覆盖,一般情况下,一个车站会有多个出入口,其特点可以归纳为半封闭高切换空间,同时又有与地面公网的衔接,地下部分一般采用全向吸顶天线覆盖,一般在站厅靠近出入口处也会

放置一对天线,在快到地面的时候一定要布放天线,保证与室外公网能够平滑的切换。

3.1.4 高架场景

部分室外地铁运行段会存在高架场景,一般考虑到成本问题,地铁高架场景不会使用专网覆盖,而是利用临近公网站点进行覆盖,因此这部分站点既承载了地铁用户,也吸收了地铁附近的公网用户,高峰期容量问题相对严重;且因地铁高速移动,小区切换频繁,因为非专网覆盖,不能像高铁覆盖一样做小区合并,整体高架段受多普勒频移的影响相对严重,对用户感知的影响较大。由于地铁一般建设在城市中,周边会有一些建筑物,建站时除考虑距离因素外,要尽量避免建筑物遮挡,尽可能保持地铁在视距以内,同时建议地铁覆盖小区和周边地面覆盖小区采用异频组网,降低干扰。

3.1.5 地沟场景

地铁从地面进入隧道前,往往会有一段低于地面的场景,即所谓的地沟场景,该场景一般采用大网直接覆盖,在站址选择时需要尽量靠近铁路,减小站轨距,以降低路面遮挡导致的信号阴影衰落;同时站间距也需要适当缩小,避免站轨距过小而导致远点频偏过大及入射角过小的问题。

3.2 分类优化策略

3.2.1 覆盖优化

3.2.1.1 优化流程

基于大网和室分的关系将优化流程简单分为室外路段和室内路段2种(见图4和图5),室外路段优化策略需考虑大网的影响,重点考虑周边站点弱覆盖、过覆盖、异常事件等因素,多借助DT发现问题;室内路段因环境封闭相对干净,主要靠室分和漏缆覆盖,策略更接近传统室分和高铁专网,因此隧道内的优化主要还是依靠工程维护、整改及建设来解决。

3.2.1.2 覆盖优化方法

覆盖优化主要包括射频优化、参数优化和工程整改3个方面。

a) 射频优化。主要针对地铁地面部分,在遮挡不严重的前提下,通过调整天线的机械或电子下倾角及天线的方位角,使得天线的主瓣方向正对覆盖较差的区域,从而解决覆盖差问题。在现场实际调整过程中,建议优先调整天线的电子下倾角,如果调整效果不佳,再考虑调整天线的机械下倾角,但需控制幅度以免波瓣压缩严重变形,从而对周边宏站造成干扰;

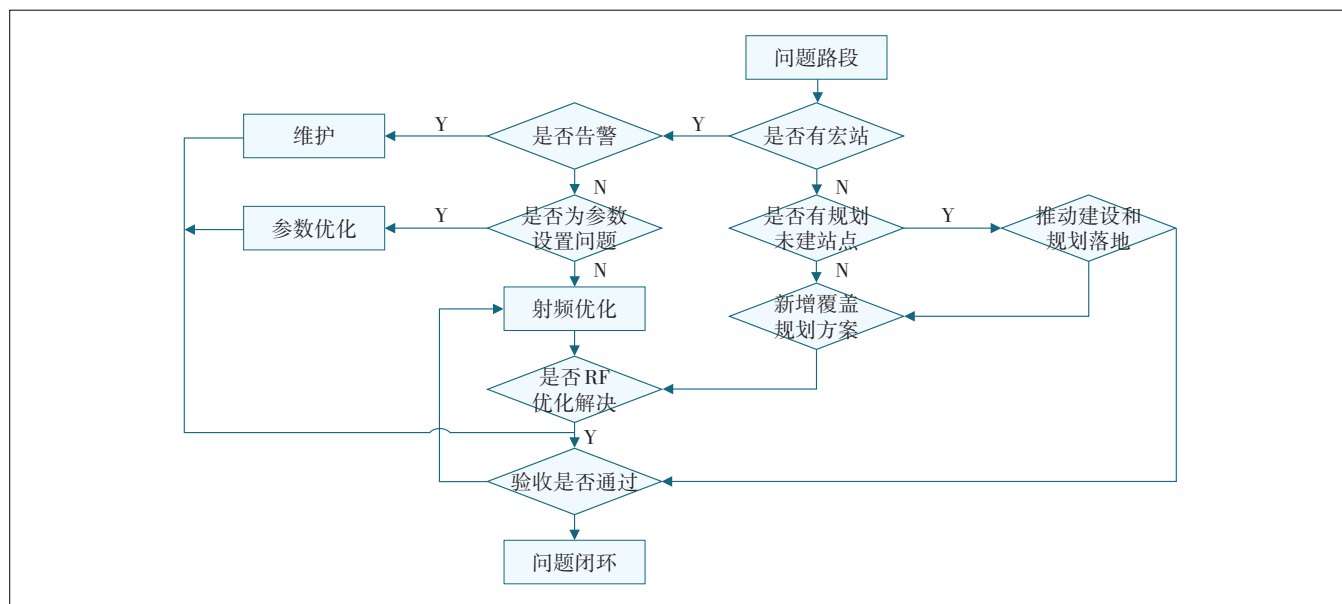


图4 室外段优化流程

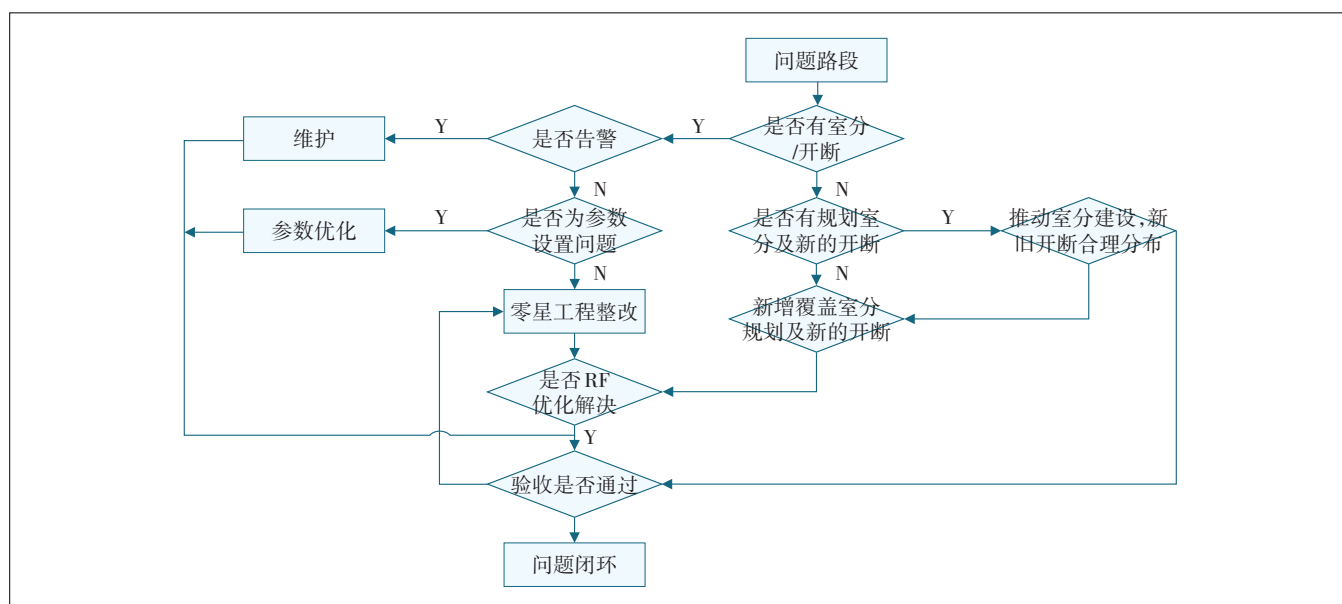


图5 室内段优化流程

在调整天线方位角时,不同频段根据覆盖距离需控制好波瓣覆盖范围,从而避免对周边大网造成越区覆盖或重叠覆盖。

b) 参数优化。对于地面部分,多采用周边大网的覆盖策略以避免对大网造成影响。以传统4G为例,若周边公网D频段已实现连续覆盖,D-F切换使用基于覆盖的A2+A5策略,F-D使用基于覆盖的A2+A4策略,用户尽量驻留在D频段,D1与D2之间开启双向负载均衡算法,高负荷区域采用同心圆双层D,D1+D2之

间功率差为3 dB,地铁行进间配置采用D1-D2-D1的切换方式。当周边公网未部署D频段连续覆盖,或D频段已退网改为5G时,D-F的基于覆盖的A2起测门限配置高于市区门限,避免占用D频段被拖死。对于地下部分,考虑到大量D频段已撤出,部署5G、4G时,考虑距离因素,尽量优先使用FDD。对于FDD连续的地下部分,由FDD主承载,优先级配置为最高,E频段配置为相同优先级,低于FDD,F频段配置为优先级最低;对于FDD不连续的地下部分:由E频段主要承载,

配置高优先级,FDD和F频段配置为低优先级。

c) 工程整改。工程整改真正的难点在于地铁空窗期较少。地铁地面路段主要针对宏站天线进行整改,其中包括基站天线安装过低、天线受(抱杆、RRU及平台等)阻挡无法调整等情况;相对而言,物业点多位于周边建筑附近,受空窗期影响有限。对于地铁地下部分,主要对已有室分进行整改,如车站新增天线、更换不符合需求的器件、对已有室分但未覆盖区域进行天线延伸等,受空窗期影响极高。

3.2.2 容量优化

对于地铁场景的容量,最大的特点就是潮汐效应明显,早晚两忙时的用户数占到全天的50%以上,瞬时接入量巨大,集中的大量用户给网络承载带来极大挑战。同时,地铁的维护与改造,以及频段使用受到地铁公司的严格限制,也给容量优化工作带来了巨大挑战。

常规优化手段除新建站外,则集中在小区分裂、参数调整、分层负载均衡、多载波扩容、适时关闭载波聚合等方向。下面以常规的小区分裂为例说明对应的分析解决思路。

地铁隧道内采用泄露电缆覆盖,对于较长隧道,中间会设置1~2个断点,断点处增加RRU,接力覆盖。因此2个站台之间的覆盖方式为:站台RRU馈入漏缆的信号→断点1RRU馈入漏缆的信号→断点2RRU馈入漏缆的信号→站台RRU馈入漏缆的信号。设计之初,为了防止车速过快产生切换不及时的情况,将多个RRU组网组成一个超级小区。但随着业务量的迅猛增加,在扩容的情况下,仍然无法满足容量需求,尤其在换乘站,因此小区分裂是首选方式,它将多个RRU从一个小区分为多个小区。

3.2.3 移动性优化

地铁的一个特点就是人一直在动,车也一直在动。小区切换频繁,多普勒频移严重。放大来看,人在出入口动,涉及大网向室分切换,车在地下向地上动,涉及漏缆向大网切换,人在地下动,又涉及室分向漏缆切换。以4G为例,4G优化策略如图6所示。

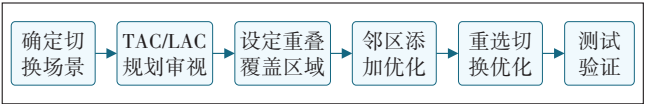


图6 移动性优化策略

3.2.3.1 切换发生点分析

地铁场景小区信号切换主要发生在以下几个位置。

a) 乘客出入地铁站的切换。乘客出入地铁站会产生室外宏基站信号和地铁站厅信号之间的切换,可以在扶梯中间位置的顶部加装全向吸顶天线保证足够的重叠覆盖。

b) 站厅与站台2个小区之间的切换。此切换同乘客出入地铁站的切换场景一样,一般在扶梯上下口位置布放全向天线保证切换顺利进行。

c) 隧道内2个小区之间的切换。隧道内使用漏缆覆盖,根据链路预算及现网中的实际应用,每400 m设置1个信源,可以达到连续覆盖,且可以顺利切换。需要注意的是,切换带要尽量布置在隧道区间内(见图7)。

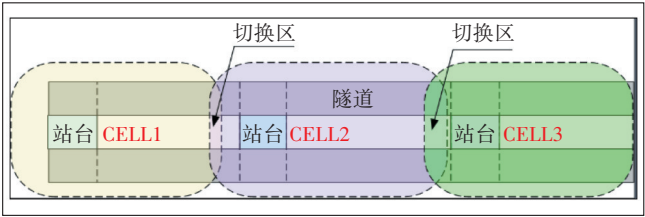


图7 隧道间切换

d) 列车出入隧道时与室外小区的切换。列车出隧道的过程中,隧道内信号迅速减弱,隧道外信号迅速增强,两侧信号无足够的重叠覆盖区,需在隧道口漏泄电缆末端增加对数周期天线对隧道出口方向进行覆盖,与外部宏网基站形成足够的重叠区,达到顺利切换的目的。

3.2.3.2 切换带

作为管道场景,切换带的设置非常重要。整个地铁系统的切换点在3.2.3.1中已经分析,受移动速度的影响,如果一个区间需要设置2个小区的切换带,则站台站厅场景需要将站台和站厅之间的上下行扶梯之间设置为切换区域,而对于隧道则需要设置在2个相邻站点之间的隧道中(见表3)。

表3 场景间空间移动速度差异

序号	切换场景	移动速度
1	乘客出入地铁站的切换	步行
2	站厅与站台两小区之间的切换	步行
3	隧道区间两小区之间的切换	<80 km/h
4	地下与高架的切换	<80 km/h

3.2.4 基于案例的优化措施及效果验证

以某地铁线路为例,早晚高峰的用户数陡增,单

小区最大用户数超过 200 个,符合大话务场景模型。为提升大话务场景下的用户感知,对PDCCH、PUCCH、SRS 和 CSI-RS 等信道相关参数及一些节能特性进行大话务场景下的针对性调整。

a) PDCCH 资源优化。增加 PDCCH 占用符号数目,增加小区可用的 PDCCH CCE 资源,使小区支持的用户数增多,减少调度时间,但这同时会导致下行 PDSCH 可用符号减少,降低下行用户吞吐率。

b) CCE 聚合级别优化。配置用户专用 PDCCH 最大聚合级别为 8 或 8/16 自适应,提高 CCE 分配成功率,限制高聚集级别 CCE,优化 CCE 分配方式,使尽可能多的用户得到调度。

c) PDSCH 调度优化。开启 RB 预估优化功能,RB 资源分配时精确考虑 RB 上实际可用 RE 数,避免用户 RB 分配不足产生数据分片。

d) 节能。大话务场景下,BWP2 节能开关打开之后,会导致支持 BWP2 的终端的吞吐率下降和业务时延的增加。因此,大话务场景下推荐关闭 BWP 节能开关。

后期对部分 TOP 小区进行大话务场景针对性参数优化,并对比了优化前后的关键指标,结果如图 8 和表 4 所示。从图 8 和表 4 可以看出,优化后关键指标提升明显。遂对地铁 TOP 小区全部实施该策略,低速率质差小区问题的解决率从 32% 提升至 82%。

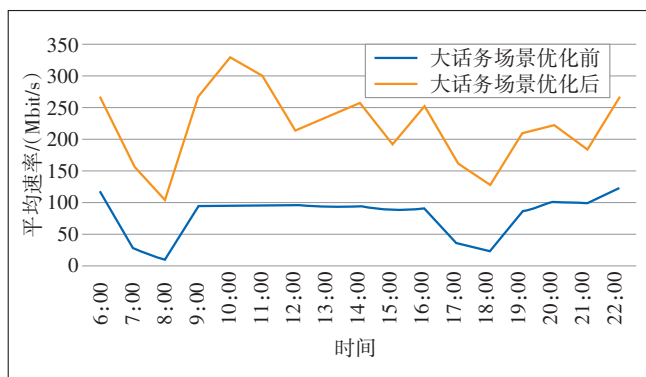


图 8 优化前后平均速率对比

表 4 优化前后关键指标对比(采样 15 个 TOP 小区)

优化措施	调度时长降幅/%	平均速率提升/%	CCE 分配失败率/百分点
PDCCH 符号数增加	31	+42	-8.2
CCE 聚合级别自适应	24	+37	-6.5
关闭 BWP 节能开关	18	+29	-3.1
综合优化后	平均下降 24	平均提升 36	平均下降 6

4 总结

地铁无线网络优化作为特殊场景优化中必不可少的课题,一向以复杂、难度大而著称,通过深入剖析地铁网络的特性,将复杂场景细分,同时结合已有的分析经验,深入探讨了地铁覆盖质量的分析思路,给出优化建议,并通过实际案例对所提优化方法进行了验证,结果表明该方法具有明显的优化效果。

参考文献:

- [1] 华爽. 存量地铁场景 5G 覆盖方案应用及优化[J]. 现代信息科技, 2023, 7(1): 64-67.
- [2] 唐岱,孙正辉. 地铁场景 5G 无线链路预算与优化方案研究[J]. 江苏通信, 2022, 38(4): 10-14, 22.
- [3] 查晏,查昊. 存量地铁场景 5G 快速覆盖应用及优化[J]. 电信快报, 2022(5): 20-23.
- [4] 苏翰,张阳,张柠. 地铁场景多形态 5G 覆盖优化解决方案[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(5): 55-58.
- [5] 陈若蒙. 郑州地铁语音质量的优化[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [6] 李瑛. 地铁通信的无线系统覆盖和网络优化分析[J]. 中国新通信, 2020, 22(7): 26.
- [7] 辛正明,孙剑峰,杨焱,等. 5G 700M 信号覆盖增强模型探索及应用[J]. 通信与信息技术, 2023(增刊 1): 65-68.
- [8] 潘琪君. 低空立体覆盖场景下无蜂窝大规模 MIMO 系统性能分析与优化[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [9] 仇豪. 基于射线跟踪的轨道交通场景 5G-R 无线网络覆盖规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [10] 黄亮,吴强,杨振华,等. 高铁网络的优化研究[J]. 电子技术, 2021, 50(11): 55-57.
- [11] 方屹涛. 5G 新场景下的室内外传播模型优化与覆盖规划[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [12] 祁星,董婧,刘永平,等. 封闭场景下高铁站台商用信号覆盖的优化提升[J]. 河北建筑工程学院学报, 2020, 38(4): 135-140.
- [13] 李容荣,朱震海,江庆,等. 浙江高速场景 5G-NSA 连续覆盖优化研究[C]//5G 网络创新研讨会(2019)论文集. 北京: TD 产业联盟, 2019: 147-153.
- [14] 王苑. 室内 LTE 网络覆盖设计及优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [15] 傅树雄. 基于 LTE-TA 数据挖掘的覆盖场景分类研究及其优化[J]. 信息通信, 2017(12): 195-196.

作者简介:

张梦妍, 高级研究专员, 学士, 主要研究方向为移动通信网络设计及优化; 何超, 高级研究专员, 硕士, 主要研究方向为移动通信网络设计及优化; 王晓峰, 高级研究专员, 学士, 主要研究方向为移动通信网络设计及优化。