

基于 Massive MIMO 的 5G 高铁专网规划与优化

5G High-speed Railway Private Network Planning and Optimization Based on Massive MIMO

刘宏嘉¹, 许国平², 林俊钊¹, 石贤富¹ (1. 中国联通浙江分公司, 浙江 杭州 310051; 2. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

Liu Hongjia¹, Xu Guoping², Lin Junfan¹, Shi Xianfu¹ (1. China Unicom Zhejiang Branch, Hangzhou 310051, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

摘要:

针对高铁乘客通信感知提升,从5G高铁专网规划、建设、优化等维度进行了技术方案论证和分析,提出了以Massive MIMO技术的5G专网规划建设思路,并在夯实基础网络结构上,创新波束模型,实现波束集中指向铁轨沿线,大幅提升覆盖能力。实践结果表明,该方案可以显著提高5G高铁通信的性能和用户体

验效果,并可有效控制运营成本,为高速铁路通信的发展提供了有力支持。

关键词:

5G; 高铁; Massive MIMO; 波束赋形; 感知; TCO

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.03.008

文章编号: 1007-3043(2025)03-0042-06

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:

In order to enhance the communication perception of high-speed rail passengers, technical solutions have been demonstrated and analyzed from the dimensions of 5G high-speed rail private network planning, construction, and optimization. A 5G private network planning and construction idea based on Massive MIMO technology has been proposed. On the basis of consolidating the basic network structure, an innovative beam model has been developed to achieve beam concentration along the railway track, greatly improving coverage capacity. The practical results show that this scheme can significantly improve the performance and user experience of 5G high-speed railway communication, and effectively control operating costs, providing strong support for the development of high-speed railway communication.

Keywords:

5G; High-speed rail; Massive MIMO; Beamforming; Perception; TCO

引用格式: 刘宏嘉, 许国平, 林俊钊, 等. 基于 Massive MIMO 的 5G 高铁专网规划与优化[J]. 邮电设计技术, 2025(3): 42-47.

0 引言

高铁乘客以商务和旅游为主,用户价值高,5G终端渗透率是全网的1.25倍,DOU是全网的1.9倍,ARPU是全网的1.4倍,但高铁场景存在车体损耗大导致车内覆盖难,车速快导致信号频偏大和切换频繁,用户密集导致瞬时高负荷等通信保障困难,这些因素均给5G高铁专网的规划和优化带来了挑战。

收稿日期: 2025-01-19

1 5G 高铁覆盖技术方案论证

1.1 高铁主要挑战

1.1.1 覆盖难

为了在提高车速的同时保证乘客乘坐体验,中国高铁型号从和谐号升级到380系列,再升级到复兴号,车体损耗不断增大,与和谐号相比,复兴号高铁车体损耗增加近20 dB。

1.1.2 车速快

高铁车速从200 km/h提升到350 km/h,车速不断

提高,使多普勒频移接近翻倍,单小区驻留时长也从5.5 s缩短至3.1 s,多普勒频移和频繁切换给高铁体验带来更大的挑战。

1.1.3 负荷高

高铁16节车厢承载乘客和工作人员可达1 200人,乘客基本集中在一个小区下,瞬时通信需求大,在行驶过程中会出现几百用户短时间集中接入网络的情况,最终发生小区负荷过高导致用户需求得不到满足的情况。同时,随着移动互联网应用蓬勃发展,高铁流量相较2019年也增长9倍以上。高负荷问题成为高铁网络的规划、优化需要解决的主要问题之一^[1]。

1.2 技术方案论证与选择

中国联通5G网络频段以2.1 GHz和3.5 GHz为主,其中,NR2.1为FDD制式,上下行带宽均为40 MHz,支持4T4R/8T8R;NR3.5为TDD制式,带宽为200 MHz,上下行时隙配比为7:3,支持8T8R/32T32R/64T64R。

从带宽及通道能力上看,NR3.5更有利于满足高铁的高负荷、大容量需求;同时,32T32R/64T64R的设备通过Massive MIMO技术、波束赋形技术,在一定程度上可以弥补频段穿透损耗大的问题;再结合高铁特性功能解决频偏、频繁切换等问题,可实现体验与投资收敛的双赢目标^[2]。因此,选用Massive MIMO设备覆盖高铁网络具有必要性和可行性。

1.2.1 MIMO

MIMO是通过在收发两端增加天线个数及相应的信号处理功能模块而建立起来的复杂的3维传输结构,通过空间复用,在不增加带宽的情况下,提高通信系统容量、频谱利用率和数据传输速率。通过空间分集,提高链路质量和系统可靠性,还可以通过分集增

益来扩大覆盖或者通过支持更高阶数的调制来提高系统容量。通过空时编码,在分集增益的基础上获得编码增益,从而提高系统性能。通过分集和复用的结合来达到系统容量和链路质量之间的一个折中。通过闭环MIMO模式,进一步提高MIMO系统的性能。

MIMO信道的容量等效于多个并行信道的容量之和。天线数越多,容量越大^[3]。频谱效率随天线数线性增长。空间信道的每个自由度可以形成一个空间的通道,可以用于发送一个数据流。多天线系统,空间信道具有多个互相正交的空间通道,每个空间通道可以传输一个数据流,不同数据流之间互不影响。

1.2.2 波束赋形技术

波束赋形(BeamForming,BF)是一种基于天线阵列的信号预处理技术,波束赋形通过调整天线阵列中每个阵元的加权系数产生具有指向性的波束,从而获得明显的阵列增益^[4]。

通过波束赋形技术,可在特定角度实现相干叠加,在其他角度形成非相干叠加,实现定向信号的传输或接收。如图1所示,弧线表示载波的波峰,波峰与波峰相遇位置叠加增强,波峰与波谷相遇位置叠加减弱。未使用波束赋形时,波束形状、能量强弱位置是固定的,对于叠加减弱点用户,如果处于小区边缘,信号强度低。使用波束赋形后,通过对信号加权,调整各通道信号的发射功率和相位,改变波束形状,使主瓣对准用户,信号强度提高^[5]。

因此,波束赋形技术在扩大覆盖范围、改善边缘吞吐量以及干扰抑制等方面都有很大的优势。

a) 相较传统宽波束,方向性传输覆盖范围窄,但覆盖距离更远。

b) 信号只在特定方向传输,对其他用户影响更

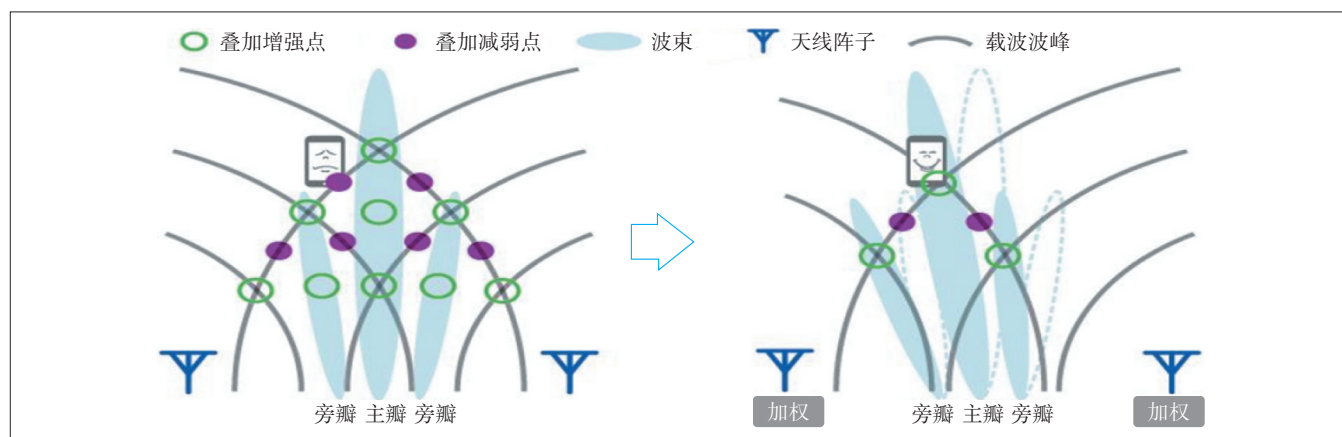


图1 波束赋形原理

小。

5G Massive MIMO 设备除支持默认的 17 类波束场景外,还支持自定义波束,能更好地适配高铁线性覆盖场景。

1.2.3 高铁功能特性

5G Massive MIMO 设备具备上下行纠偏能力,从而减少移动过程中的频偏影响;针对频繁切换问题,它支持小区合并特性(高铁专网增强),既减少了切换,又保证了空口资源不损失。

2 5G Massive MIMO 高铁规划优化实践

5G 高铁 Massive MIMO 专网部署需要从基础网络结构规划和波束赋形优化 2 个维度开展,其中,网络结构规划是重中之重,是高铁网络覆盖质量的基石,波束赋形优化是在其基础上进一步发挥 Massive MIMO 技术优势,进一步提升网络覆盖能力。

2.1 网络结构规划

2.1.1 链路预算

高铁用户体验最关键的因素就是网络覆盖,不同频段、不同形态设备的高铁站间距要求不同^[6]。表 1 给出了高铁链路预算表。

根据表 1 的链路预算,给出 NR 3.5 GHz 高铁组网的站间距建议如下。

a) 基于 1 Mbit/s 的上行边缘速率规划,建议 3.5 GHz 8T8R 的站间距为 503 m 左右,3.5 GHz 32T32R 的站间距为 691 m 左右,3.5 GHz 64T64R 的站间距为 736 m 左右,3.5 GHz 广角两扇的站间距为 835 m 左右。

b) 基于 0.5 Mbit/s 的上行边缘速率规划,建议 3.5 GHz 8T8R 的站间距为 615 m 左右,3.5 GHz 32T32R 的站间距为 835 m 左右,3.5 GHz 64T64R 的站间距为 889 m 左右,3.5 GHz 广角两扇的站间距为 1 006 m 左右。

2.1.2 网络结构

高铁专网基站间距、基站高度的合理规划是确保车厢内覆盖有效性的基础,在移动通信网络覆盖中,

表 1 高铁链路预算

基本信息	天线配置	8T8R		3.5 GHz 广角两扇		32T32R		64T64R	
	带宽/MHz	100		100		100		100	
	频率/MHz	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500
目标速率	边缘速率/(Mbit/s)	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL
		0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1
	上行边缘需求 RB 数	30	60	30	60	30	60	30	60
发射端	发射端总功率/dBm	26	26	26	26	26	26	26	26
	每子载波发射功率/dBm	0.44	-2.57	0.44	-2.57	0.44	-2.57	0.44	-2.57
	天线增益/dB	0	0	0	0	0	0	0	0
	EIRP/dBm	0.44	-2.57	0.44	-2.57	0.44	-2.57	0.44	-2.57
接收端	噪声系数	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	最小信号接收电平/dBm	-133.21	-133.21	-133.21	-133.21	-133.21	-133.21	-133.21	-133.21
	干扰余量/dB	2	2	1	1	1	1	1	1
	接收端天线增益/dBi	21.5	21.5	27.8	27.8	23.8	23.8	25	25
其他损耗及余量	穿透损耗/dB	33	33	33	33	33	33	33	33
	Body Loss/dB	3	3	3	3	3	3	3	3
	馈线损耗/dB	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0
	OTA Loss/dB	4	4	4	4	4	4	4	4
	阴影衰落余量	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82
工参信息	BTS Height/m	25	25	25	25	25	25	25	25
	UE Height/m	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	h/m	2	2	2	2	2	2	2	2
	W/m	100	100	100	100	100	100	100	100
	站轨距/m	100	100	100	100	100	100	100	100
路损	最大允许路损/dB	106.83	103.82	114.63	111.62	111.61	108.6	112.81	109.8
站间距	对应站间距(考虑站轨距)/m	615	503	1006	835	835	691	889	736

绕射是信号覆盖的主要形式,因此,由站轨距、站间距、站高度共同决定的入射角也是覆盖的关键。特别注意的是,在高铁建设中,一般采用高架桥的方案,因此在实际规划中,基站高度是天线挂高到铁轨的垂直距离^[7]。为做好网络结构规划,网络部署前需要针对站点基础信息的合理性进行分析,保障网络部署后的效果。表2所示为网络结构设置要点^[8]。

以某高铁A、B、C为例,对高铁站址规划合理性进

表2 网络结构设置要点

类型	站间距	站轨距	天线挂高	入射角	方位角	下倾角
标准	根据频段链路预算、覆盖目标确定的站间距	建议50~150 m,不小于50 m	建议天线相对于铁轨的高度为20~30 m	建议天线与铁轨的夹角不小于10°	建议天线法线方向指向小区中间区域	天线垂直波束上3 dB点指向小区边缘

表3 站点结构统计

跨省高铁	经过地(市)	基本信息						站点合理性信息					
		通车里程/km	其中:隧道内里程/km	红线外里程/km	5G 站点数	待建设站点数	红线外平均站间距/km	站址不合理站点数	站址不合理比例/%	站间距不合理数量	站轨距不合理数量	天线挂高不合理数量	入射角不合理数量
高铁A	A市	66.9	9.9	56.9	155	155	0.37	3	1.94	—	3	—	3
高铁A	B市	40.7	3.2	37.5	87	79	0.43	13	14.94	4	7	4	7
高铁B	C市	4.4	0	4.4	14	14	0.32	2	14.29	—	2	—	—
高铁C	D市	12.9	0	12.9	31	6	0.42	4	12.90	2	1	1	—
高铁C	E市	29.5	8.5	21	46	46	0.46	14	30.43	11	6	—	5
合计		154.4	21.6	132.7	333	300	0.39	36	10.81	18	20	5	16

表4 自定义波束能力参数

界面取值	中文名称	水平波宽	垂直波宽/°	数字倾角/°	数字方位角/°	64T64 R	32T32 R
CUSTOMIZED_BEAM_SCENARIO	自定义波束角度场景	单个波束波宽为15°或30°	6	-2~13	-47~47	支持	支持

线方位角等。

如图2所示, $A(x_1, y_1)$ 为高铁站点位置, $B(x_2, y_2)$ 为站轨距中心位, $E(x_3, y_3)$ 为站轨交叉点:

$$x_3 = x_1 - (x_1 - x_2) \times 2, y_3 = y_1 - (y_1 - y_2) \times 2$$

站轨连线方位角 = MOD (450-DEGREES (IMARGUMENT (COMPLEX ($x_2 - x_1, y_2 - y_1$))), 360)

面向铁轨方向,左右侧方位角计算如下:

左方位角=站轨连线方位角-左相对方位角

右方位角=站轨连线方位角+右相对方位角

然后,进行天线波束覆盖的计算,包含小区覆盖范围、波束个数、各波束方位角、各波束下倾角等(见图3)。自定义波束水平波宽支持15°与30°,考虑覆盖

行评估,初审发现不合理站址高达85个,经重新规划之后的站址不合理站点压降至36个,结构不合理站点比例从25.52%压降至10.81%^[9](见表3)。

2.2 创新波束赋形

32T32R/64T64R Massive MIMO 设备缺省的波束场景无法满足高铁线性覆盖需求,需要发挥产品的自定义波束能力,最终实现波束覆盖与铁轨的贴合^[10]。

某厂家的 Massive MIMO 产品能力如表4所示,在此基础上,开展自定义波束优化。

自定义波束调整模型设计思路:基于工参和覆盖半径计算覆盖范围,再计算需要的SSB波束个数,以及每个波束的方位角和下倾角。

首先结合高铁线路轨迹及站点相关信息计算出站间距、站轨距、站轨距中心点、站轨交叉点、站轨连

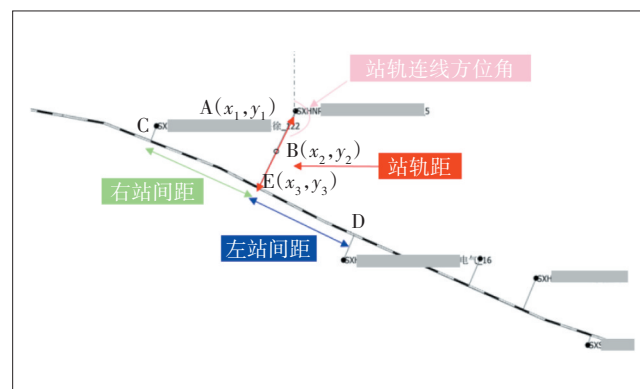


图2 高铁基础信息示意

增益情况下推荐自定义波束选择15°波宽,基于高铁基础小区数据计算出AAU覆盖高铁的波束覆盖范围,以及覆盖区域内各方向上需要配置的波束数量^[11]。

$$\text{AAU水平覆盖范围} (^{\circ}) = \tan^{-1} \frac{\text{覆盖半径 (对应左右站间距)} / 2}{\sqrt{\text{站轨高}^2 + \text{站轨距}^2}}$$

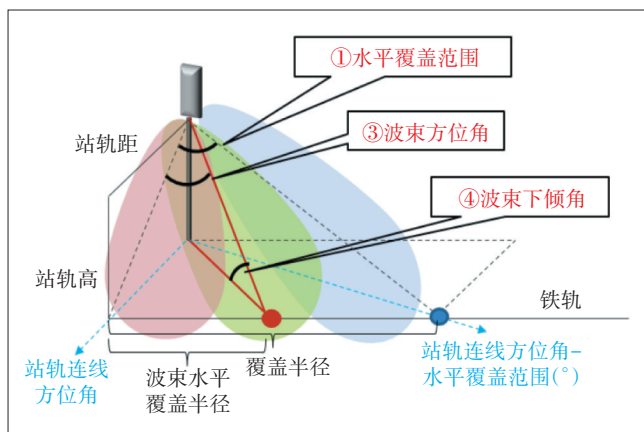


图3 高铁波束覆盖示意

水平覆盖波束个数=水平覆盖范围/15°(向上取整)

考虑铁轨与水平面存在一定角度,配置每一个波束方位角时会存在偏置,加入站轨连线方位角作为参数进行波束水平方位角、下倾角的计算。

波束覆盖中间波束水平方位角=站轨连线方位角±水平覆盖范围(°)/2(根据覆盖扇区判定,面向铁轨方向左-,右+)

若波束个数 N 为奇数,其余波束水平方位角=中心方位角±15°×(N-1)/2,增加中心方位角波束;若波束个数 N 为偶数,其余波束方位角=中心方位角±[7.5+15°×(N/2-1)],中心方位角无波束。

每个波束下倾角计算:

$$\text{下倾角} = \tan^{-1} \frac{\text{站轨高}}{\sqrt{(\text{站轨距}^2 + [\tan \theta \times \sqrt{\text{站轨高}^2 + \text{站轨距}^2}]^2)}$$

(取整)

其中, θ 表示波束方位角。

根据计算得出的波束水平方位角和波束下倾角,计算需要自定义波束的偏置配置值。

配置方位角=波束方位角-物理方位角

配置下倾角=波束下倾角-物理下倾角

最后,根据计算所得的配置对基础数据库进行修改与管理,完成高铁 5G 天线波束的波束赋形调整,使得波束集中指向高铁铁轨方向(见图4)。

3 5G Massive MIMO 高铁规划优化成效

3.1 性能评估

某高铁 5G Massive MIMO 专网部署优化后,测试统计 5G 良好覆盖率(RSRP≥-105 dBm 的比例)达到 90%,下行平均速率达到 210 Mbit/s,上行平均速率达到 28 Mbit/s(见表6)。

5G Massive MIMO 专网部署优化后,5G 网页浏览更顺畅,4G 网页浏览卡顿占比改善 38.9%。视频观看更丝滑,4G 视频观看延迟大占比改善 45.9%,5G 视频观看时延大占比仅 1.51%。微信聊天卡顿少,4G 微信收发信息时延大占比改善 43.3%,5G 微信卡顿更少(见图5)。

3.2 TCO 评估

以某高铁为例:32T32R 方案站点规模为 226 站,其中,存量站点为 110 个;8T8R 方案站点规模为 286 站,均为新建。纯新建 32T32R 方案 5 年的总 TCO 低于纯新建 8T8R 方案 5 年的总 TCO。TCO 对比计算如下。

CAPEX:按照高铁站点 2 扇区 2 载波配置,专网 6TRP 合并,2 载波不做高铁专网增强,纯新建 32T32R 方案费用为 2 939 万元,纯新建 8T8R 方案费用为 2 093 万元,两者相差 846 万元。

OPEX:按照新增共享站址塔租 2 万元/年/站,

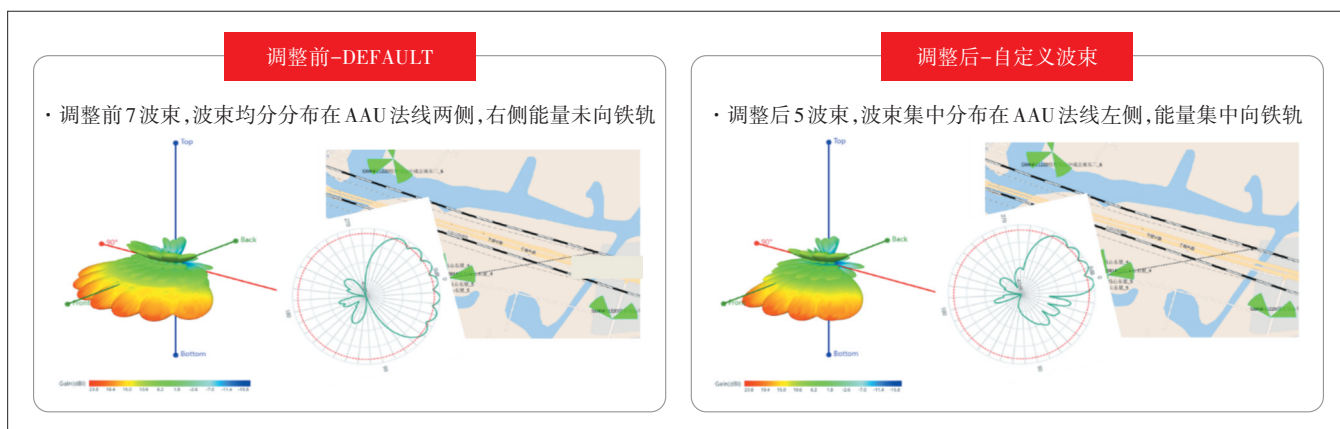


图4 高铁自定义波束效果示意

表6 Massive MIMO 高铁测试指标对比

时段	平均电平/dBm	良好覆盖率/%	SINR/dB	下行平均速率/(Mbit/s)	下行速率<10 Mbit/s 占比/%	上行平均速率/(Mbit/s)	上行速率<2 Mbit/s 占比/%	时长驻留比/%
MM开通前	-105.3	42.35	6.06	59.77	45.78	4.24	53.33	51.89
MM开通后	-94.68	90.29	16.30	210.36	6.63	27.97	8.54	98.31
增益	10.63	45.94	9.96	150.60	-39.15	23.73	-44.79	46.42

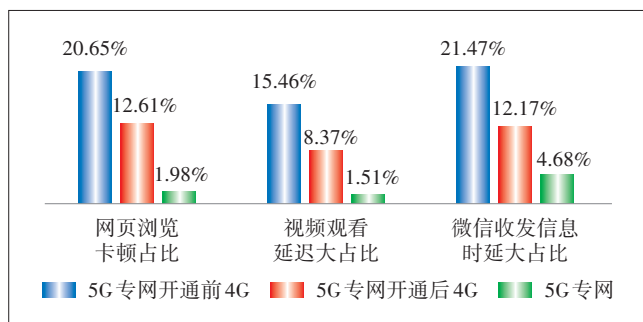


图5 5G Massive MIMO 专网开通后4G/5G感知改善

8T8R和32T32R功率均为320 W。纯新建8T8R方案的一年OPEX比纯新建32T32R方案的一年OPEX高184万元(见表7)。

表7 32T32R和8T8R OPEX费用对比

OPEX	1年		5年		10年	
	32T32R	8T8R	32T32R	8T8R	32T32R	8T8R
8T8R新增站址所需租金/万元	452	572	2 260	2 860	4 520	5 720
电费/万元	243	307	1 215	1 535	2 430	3 070
合计/万元	695	879	3 475	4 395	6 950	8 790

纯新建32T32R方案5年的总TCO低于纯新建8T8R方案5年的总TCO。采用8T8R方案,新增站址60个,新增站址协调难度大,独享站址租金高(3万元/年/站),且无法短期建设,存在覆盖黑点风险,导致低感知投诉。图6所示为高铁Massive MIMO和8T8R的TCO对比。

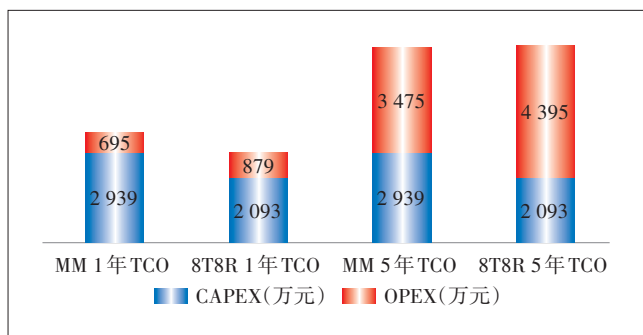


图6 高铁Massive MIMO和8T8R的TCO对比

4 结束语

某省联通借助5G Massive MIMO技术和创新性波束赋形技术,一方面可以实现高铁网络覆盖、容量、峰值速率的提升,另一方面相对于部署8T8R设备也实现了TCO的降低。本次应用实践为后续全国存量高铁的改造、新建高铁的网络部署提供了参考经验,也为后续高铁的优化打下了坚实的基础,同时也掀开了高铁智能优化的新篇章。

参考文献:

- [1] 王继宇. 5G移动通信技术在高铁通信网络中的应用[J]. 中国新通信, 2020, 22(6): 1-2.
- [2] 张荣涛. 浅析5G无线网络在高铁场景中的规划与优化[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(1): 17, 19.
- [3] 张长青. 面向5G的大规模MIMO天线阵列研究[J]. 邮电设计技术, 2016(3): 34-39.
- [4] 刘毅, 牛海涛, 张振刚, 等. 3D-MIMO天线技术应用研究[J]. 移动通信, 2017, 41(1): 52-57.
- [5] 梁松柏, 李新卫, 徐军平. 5G波束覆盖优化研究[J]. 邮电设计技术, 2020(8): 27-33.
- [6] 陈雍珏, 陆晓磊, 李少华, 等. 铁路5G专网MIMO技术研究[J]. 中国铁路, 2022(9): 88-93.
- [7] 刘寅生, 孙宵芳, 胡光祥, 等. MIMO技术演进及其在铁路5G专网应用展望[J]. 中国铁路, 2021(10): 93-99.
- [8] 张文俊, 林延. 5G高铁通信网络覆盖能力提升策略研究[J]. 电信快报, 2023(11): 23-26.
- [9] 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.
- [10] 吴雅颖. 大规模MIMO容量优化算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [11] 董帝娘, 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.

作者简介:

刘宏嘉, 高级工程师, 学士, 主要从事无线网络优化与大数据分析研究工作; 许国平, 高级工程师, 博士, 主要从事无线网络优化与数字化技术研究工作; 林俊钊, 高级工程师, 学士, 主要从事IT技术在通信行业的创新应用研究工作; 石贤富, 工程师, 学士, 主要从事移动无线网络的规划和优化工作。