

高铁5G网络覆盖方案研究与实践

Research and Practice of 5G Coverage Scheme for High Speed Rail

王 锋,吴 斌,余 毅,李益锋(华信咨询设计研究院有限公司,浙江 杭州 310000)

Wang Feng, Wu Bin, Yu Yi, Li Yifeng (Huaxin Consulting Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

摘 要:

首先分析了高铁5G网络现状及面临的问题,包括损耗大、切换频繁、多普勒频移等。详细探讨了高铁5G网络的站间距、容量方案、设备选型、新技术等关键问题,并以某高铁线路5G规划为例,细化到站点级别,剖析线路中存在的问题,提出了精准的解决方案。

关键词:

高铁5G;链路预算;容量;规划

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.01.009

文章编号:1007-3043(2026)01-0039-05

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:

Firstly, the current situation and problems faced by high-speed rail 5G network are analyzed, including high losses, frequent switching, Doppler frequency shift, etc. It explores the key issues such as the spacing, capacity scheme, equipment selection, and new technology of high-speed rail 5G network, and taking the 5G planning of a certain high-speed railway line as an example, the problems existing in the line are analyzed at the station level, and precise solutions are proposed.

Keywords:

High-speed rail 5G; Link budget; Capacity; Planning

引用格式:王锋,吴斌,余毅,等. 高铁5G网络覆盖方案研究与实践[J]. 邮电设计技术,2026(1):39-43.

1 概述

铁路作为我国经济运行的大动脉,在国民经济的快速发展中起着至关重要的作用,同时也是人们日常出行常用的交通工具之一,特别是高速铁路。截至2024年底,我国的高速铁路总里程达到4.8万km,成为我国“新基建”战略的一个焦点^[1-3]。随着高铁在各地的建成与开通,越来越多的旅客选择高铁出行,高铁已逐步成为中高端人群出行的一种主流方式,因此高铁也成为5G网络覆盖的重点场景。

有别于传统5G网络覆盖,高铁5G网络建设的难

度相对较大。原因之一是高铁的穿透损耗较大,以和谐号为例,在1.8 GHz、2.1 GHz、3.5 GHz频段,车体的穿透损耗分别达到26 dB、30 dB、33 dB,高穿透损耗严重影响终端接收信号的质量^[4-5]。此外,我国高铁的设计车速高达350 km/h,高速运行的列车会使终端进行频繁切换,如果切换带设置不合理,会出现掉话、断网等现象,严重影响用户感知。而且高速运行的列车会引起显著的多普勒效应,导致终端接收信号频率发生变化,使得掉话率提升。其他影响高铁5G网络建设的原因有高铁沿线途经多种地形地貌,建维成本差异大,且高于传统场景,进而导致高铁5G网络建设周期慢。与此同时,从长期收益来看,高铁用户收益在端省,网络建设在中间省,建设与收益不均衡。以上

收稿日期:2025-11-21

种种原因导致高铁 5G 网络建设困难重重,因此,有必要对高铁 5G 网络建设进行研究,提升用户体验。

为解决上述问题,本文综合考虑覆盖、容量、频率、设备选型和新技术应用等方面,提出一种综合解决方案以满足高铁 5G 网络的覆盖需求。

2 高铁 5G 网络覆盖方案研究

2.1 高铁 5G 网络频率

频谱资源是各运营商的重要资源,当前中国移动高铁 5G 网络建设分别采用 700 MHz、2.6 GHz 频段,共有 190 MHz 带宽资源,中国电信和中国联通分别采用 2.1 GHz、3.5 GHz 频段进行高铁 5G 网络建设,共有 140 MHz 带宽资源。

2.2 高铁 5G 网络站间距

能否满足高铁 5G 网络规划指标的关键是站间距,高铁 5G 网络规划既要考虑短期用户需求,也要考虑未来容量的发展。以 2.1 GHz、3.5 GHz 频段的高铁 5G 网络建设为例,在覆盖满足 $SS-RSRP \geq -110$ dBm 且 $SS-SINR \geq -3$ dB 的占比大于等于 95% 的前提下,进行链路预算分析,因 2.1 GHz 频段的链路预算过程与 3.5 GHz 频段类似^[6-8],本文仅展示 3.5 GHz 频段的链路预算,具体如表 1 所示。

根据表 1 的结果可知,3.5 GHz 频段受限于终端功率较低,上行覆盖距离较短,当站间距不大于 420 m 时,可保证连续覆盖,同时,当覆盖目标由 2 Mbit/s 降低到 1 Mbit/s 时,站间距可提升到 480 m 左右。类比 3.5 GHz 频段的链路预算过程,当考虑 2.1 GHz 频段方案时,由于 2.1 GHz 的损耗小于 3.5 GHz,通过链路预算分析,在同等覆盖要求条件下,当站间距不大于 650 m 时,可保证 2.1 GHz 连续覆盖,考虑某些高铁客流量较大,可采用 2.1 GHz+3.5 GHz 混合组网方案,在站点选取时,需要综合考虑 2.1 GHz、3.5 GHz 频段的覆盖半径,以保证连续覆盖。

2.3 高铁 5G 网络容量分析

考虑高铁乘客 5G 业务的多样化,而且不同的业务所需要的速率也不同(见表 2)^[9]。同时结合不同业务所占的比例,可以计算出视频 480P、720P 的综合速率分别为 1.04、2.04 Mbit/s。而当前同时在线激活用户数模型如表 3 所示。

从表 3 可知,不同车厢所需要支持的用户数分别为 31、62、123,而当前 2.1 GHz 具有 20 和 40 MHz 2 种带宽方案,3.5 GHz 具有 100 MHz 带宽方案,根据上述

表 1 3.5 GHz 链路预算

基本信息	天线配置	3.5 GHz 8TR		
	带宽/MHz	100		
频率/MHz	3 500	3 500	3 500	
目标速率	边缘速率/(Mbit/s)	UL(1)	UL(2)	DL(50)
	上行边缘需求 RB 数	48	72	-
	下行 RB 数	-	-	273
发射端	发射端总功率/dBm	26.00	26.00	53.00
	每子载波发射功率/dBm	-1.60	-3.37	17.85
	天线增益/dB	0.00	0.00	19.00
	EIRP/dBm	-1.60	-3.37	36.85
接收端	噪声系数	3.50	3.50	7.00
	最小信号接收电平/dBm	-133.21	-133.21	-121.33
	干扰余量/dB	2.00	2.00	6.00
	接收端天线增益/dBi	21.50	21.50	0.00
	接收端增益合计/dB	21.50	21.50	0.00
其他损耗及余量	穿透损耗/dB	35.00	35.00	35.00
	馈线损耗/dB	0.50	0.50	0.50
	OTA Loss/dB	4.00	4.00	4.00
	阴影衰落余量/dB	8.00	8.00	8.00
	损耗余量合计/dB	49.5	49.5	53.5
工参信息	BTS Height/m	32	32	32
	UE Height/m	10	10	10
	h/m	8	8	8
	W/m	50	50	50
	站轨距/m	100	100	100
路损	最大允许路损/dB	103.61	101.84	104.68
	对应站间距/m	487.14	415.13	534.36

表 2 不同业务 5G 速率需求

视频体验描述	业务模型				
	480P 视频	Web	即时通信	游戏	其他
速率需求(视频 480P)/(kbit/s)	2 300	400	150	900	200
速率需求(视频 720P)/(kbit/s)	5 000	400	150	900	200
业务比例	0.382	0.159	0.208	0.057	0.194
业务综合速率需求(视频 480P)/(kbit/s)	878.6	63.6	31.2	51.3	38.8
业务综合速率需求(视频 720P)/(kbit/s)	1910	63.6	31.2	51.3	38.8

计算的综合速率 1.04 Mbit/s、2.04 Mbit/s,结合小区容量模型,可得到不同方案所支持的在线用户数如表 4 所示。根据表 4,2.1 GHz 40 MHz 方案可满足 16 节及以下用户普清业务需求,3.5 GHz 100 MHz 带宽方案可满足两车交会用户普清业务需求。

2.4 高铁 5G 网络设备

高铁 5G 网络的主设备选型,需要综合考虑设备形

表3 同时在线激活用户模型

5G用户感知	8节车厢	16节车厢	两车交会
座位数(16节车厢)	576	1 152	2 304
渗透率/%	42	42	42
5G终端渗透率/%	70	70	70
5G终端登网率/%	72	72	72
在线终端激活率/%	23	23	23
公网入侵比率/%	10	10	10
同时在线激活用户数目需求	31	62	123

表4 小区容量模型

小区类型	容量/(Mbit/s)	支持的同时在线激活用户数(普清)	支持的同时在线激活用户数(高清)
2.1 GHz 20 MHz 小区平均容量	60	58	29
2.1 GHz 40 MHz 小区平均容量	100	96	49
3.5 GHz 100 MHz 小区平均容量	180	173	88

态、高铁场景特性、性能效果和投资效益比等多方面因素。

当前2.1 GHz可采用4TR、8TR设备,3.5 GHz频段除8TR设备外,还拥有16TR、32TR、64TR AAU设备,AAU因部分厂家无法做小区合并而无法推广。但是考虑到高铁切换频繁和多普勒频移问题,在高铁5G网络规划时,高容量的城区场景可采用3.5 GHz 8TR设备,平原区域结合站间距分别采用2.1 GHz 4TR、8TR设备。

2.5 高铁5G网络新技术

2.5.1 绿色天线

根据国家“2030年碳达峰,2060年碳中和”双碳政策,同时在“坚持TCO最优原则”指导下,高铁5G网络规划既要考虑网络覆盖效果,同时需要兼顾“绿色”

“经济”。而绿色天线与传统天线相比,天线能效提升20%,波束较宽,其中水平波宽 $\geq 65^\circ$,进而上下行同时提升1.5~2 dB的覆盖能力^[10]。在覆盖距离方面,3.5 GHz绿色天线站间距较传统天线提升约50 m,2.1 GHz绿色天线站间距较传统天线提升80~100 m,因此,同等发射功率下,单站覆盖范围提升25%~30%,建站总量可减少20%~25%,每10 000 km可少建4 400~5 500个3.5 GHz基站,进而大幅降低高铁5G网络建设投资。

2.5.2 新型天线安装优化技术

自从启动高铁5G网络建设以来,从全国现有4G高铁网络的分析来看,所有的网络都是传统天线对打方案,该方案的优点是安装便捷、小区边缘点RSRP信号场强较好,但是该方案存在灯下黑、切换带干扰大等突出问题。为解决上述问题,新型天线安装优化技术应运而生,该工艺通过扭转天线斜角,降低天线波束和高铁沿线夹角,实现信号准确覆盖(见图1)。通过新型天线的安装优化技术,2.1 GHz 4TR/8TR站间距分别可达800、1 000 m,3.5 GHz 8TR站间距可达650 m,根据第2.2节高铁站间距的分析,新型天线安装优化技术在提升覆盖方面具有显著优势,在同等覆盖条件下,可减少基站建设数量,因此可降低建设投资。

2.5.3 定制波束天线

传统天线以面覆盖、点覆盖为目标,该覆盖方式不能完美匹配高铁线覆盖场景,高铁线覆盖场景覆盖的关键是设法让天线主瓣在地面上的投影与铁轨重叠。传统的安装方式只有水平方位角(调整波束指向)和垂直下倾角(调整波束远近)2个维度可以调整,天线波束与高铁线路始终存在一定的夹角,导致靠近基站近端高铁线路“塔下黑”问题,无法达到连续覆盖效果(见图2)。而定制波束天线具有特殊异形波瓣形

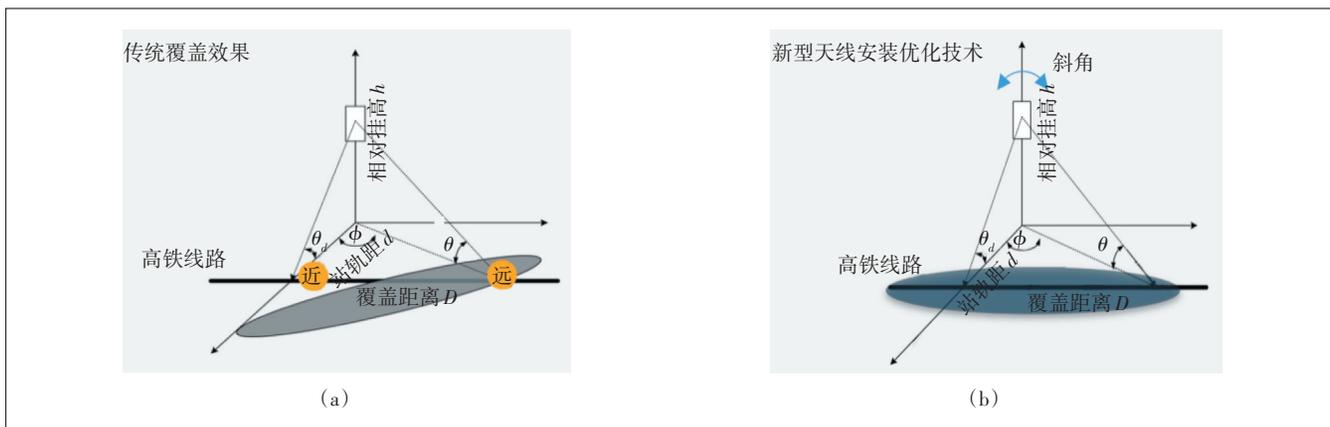


图1 传统覆盖与新型天线安装优化技术覆盖效果对比

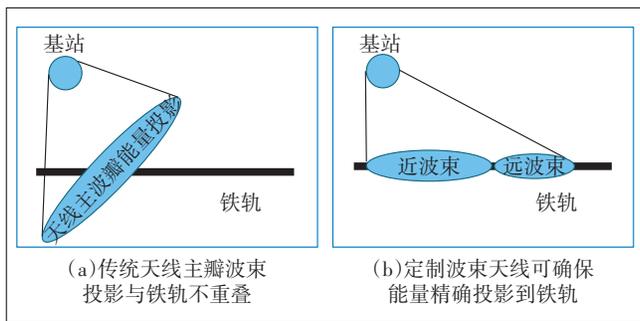


图2 传统天线与定制波束天线效果对比

状, 远处增益高, 近处增益低, 能够在铁轨上形成相对均匀的信号覆盖。此外, 定制波束天线还可通过可旋转反射板实现位置角度可调, 以此匹配不同站间距、站轨距要求, 进而提升远处信号覆盖的强度^[11]。

3 高铁5G网络覆盖方案应用

3.1 某线路现状及问题分析

前面章节从理论上分析了高铁5G网络建设, 为进一步验证上述分析, 针对某高铁线路进行5G规划。该高铁线路途径A、B、C、D 4省, 沿线地形复杂, 5G建设难度较大。同时前期各省5G建设节奏不同, 其中在运营商2承建区, A省、B省境内未部署5G, C省、D省城区部署的是3.5 GHz网络, 郊区、农村部署的是2.1 GHz网络, 整体线路覆盖标准不一, 用户感知不佳, 具体见表5和表6。根据表5和表6, 在5G覆盖率方面, 运营商2、运营商3与运营商1差距明显。

表5 各运营商5G采样覆盖率(单位:%)

	A省	B省	C省	D省	综合
运营商1	1.28	40.19	86.43	72.96	73.44
运营商2	8.84	47.47	12.43	61.03	26.80
运营商3	11.83	78.96	4.88	66.74	24.28

表6 各运营商5G里程覆盖率(单位:%)

	A省	B省	C省	D省	综合
运营商1	98.65	98.36	98.27	83.91	95.94
运营商2	84.31	97.31	77.66	70.94	78.00
运营商3	76.46	78.72	89.38	73.21	85.23

根据各省测试及网优反馈结果, 总结某高铁线路5G网络存在的问题主要有站间距过大、站址选取不合理、邻省份切换带设置不合理等。

3.2 某线路解决方案

针对某高铁线路现状及存在的问题, 考虑到用户

流量、运营商原有站址平均距离, 线路经过主要场景, 隧道长度及占比等因素, 针对不同省份和场景, 匹配最佳建设方案。在频段选取方面, 根据流量情况合理分配2.1 GHz、3.5 GHz频段, 具体如表7所示。4个省份均部署单层网, 在高流量城区部署3.5 GHz频段, 郊区农村部署2.1 GHz频段。站址选取方面, 为保证TCO最优, 最大保留运营商2原有的网络资源, 针对3.1节中提到的问题, 为保证5G连续覆盖, 此次3.5 GHz频段共规划站点206个, 其中保持原址42站, 原址新增设备84站, 结构性补点80站。2.1 GHz频段共规划站点304个, 保持原址140站, 新增规划164站。此外, 为进一步降低建设成本, 结合2.5节, 本次规划考虑了定制波束天线、绿色天线以及新型天线安装优化技术的使用。根据此次规划, 3.5 GHz平均站间距保持在478 m, 远低于规划前的560 m, 2.1 GHz平均站间距由688 m降至605 m, 具体如表8和表9所示。根据2.2节中的链路预算结果, 2.1 GHz、3.5 GHz站间距在650 m、480 m以内, 掠射角在10°~15°, 即可满足覆盖要求。在隧道建设方面, 建议采用1.8 GHz+2.1 GHz的双频设备, 合路原有的13/8"漏缆, 或者委托铁塔共同建设2条13/8"漏缆。此次规划解决建设类问题站点340个, 解决了某省高铁线路5G未覆盖问题, A省、B省、C省和D省4个省份的线路覆盖率达95.1%, 具体如表10所示。

3.3 投资效益分析

高铁5G网络建设不仅要考虑解决网络覆盖问题, 同时需要分析投资效益。本文通过分析某线路的投

表7 某高铁线路频段部署

省份	建设方案
A省	城区: 新建3.5 GHz单层网
B省	郊区农村: 新建2.1 GHz单层网
C省	城区: 扩容3.5 GHz单层网
	郊区农村: 优化2.1 GHz单层网
D省	城区: 扩容3.5 GHz单层网
	郊区农村: 优化2.1 GHz单层网

表8 某高铁线路2.1 GHz规划前后站间距对比

省份	2.1 GHz 规划期初			2.1 GHz 规划期末		
	室外站平均站间距/m			室外站平均站间距/m		
	城区	农村	均值	城区	农村	均值
B省	-	-	-	-	665	665
C省	-	680	680	-	557	557
D省	559	707	673	528	591	649
合计	559	700	688	528	609	605

表9 某高铁线路3.5 GHz 规划前后站间距对比

省份	3.5 GHz 规划期初			3.5 GHz 规划期末		
	室外站平均站间距/m			室外站平均站间距/m		
	城区	农村	均值	城区	农村	均值
A省	-	-	-	547	-	547
C省	-	-	-	428	-	428
D省	559	-	559	467	-	467
合计	559	-	559	478	-	478

表10 某高铁线路建成后覆盖率(单位:%)

指标	A省	B省	C省	D省	合计
覆盖率	95	95	95.50	95	95.10

资估算,预测建设成本,结合该线路发车对数,计算流量收入,进而得出该项目收益年限。本文假设建设周期为1年,收益期限为10年,除主设备投资外,需考虑人工成本、低值易耗品、修理费、运营支撑费等,具体可参考表11。

表11 成本费用参数

参数名称	取定值
人工成本/(万元·年 ⁻¹ ·人 ⁻¹)	20
低值易耗品/(万元·年 ⁻¹ ·人 ⁻¹)	0.6
修理费率/%	3.0
修理费率增长/%	0.0
运营支撑类费率/%	2.5
能源类业务费/%	7.0
铁塔租金/(万元·年 ⁻¹ ·站 ⁻¹)	2.6
销售及管理费用费率/%	15
所得税率/%	25

根据3.2节的站点规模,某线路投资估算为3 844万元,该线路日平均发车140对,流量密度取0.6,则每载扇日均流量为84 GB,结合单GB流量收入和再分配系数,可计算出项目收入,本文取单GB收入为1.8元,再分配系数为75%,计算得出项目收入为2 873万元。根据表11中成本费用参数,可计算出每年成本为1 895.98万元,折旧费用为372.87万元,净利润为452.77万元。具体计算结果如表12所示,根据表12可知,该线路财务静态投资回收期限为6.12年,财务内部收益率为15.57,财务净现值为572.92万元。

根据上述计算过程,可发现投资回收年限和财务净现值取决于该线路的发车对数、乘客业务行为、建设成本,后续如需分析投资效益,需结合具体线路的流量,然后进行不同方案建设,获取不同建设成本,进

表12 投资效益分析

静态指标	计算值	动态指标	计算值
财务静态投资回收期/年	6.12	财务内部收益率/%	15.57
投资利润率/%	11.78	财务净现值/万元	572.92
投资利税率/%	7.85	财务净现值比	0.15

而求得不同投资回收期,以期获取最大的投资效益。

4 结束语

本文分析了高铁5G网络现状及高铁5G网络覆盖面临的各种挑战,并给出解决方案。最后以某高铁线路为例,分析该高铁线路问题,并给出详细的规划方案,提升了该线路5G覆盖水平,取得良好效果。同时本文分析了该线路的投资效益,为后续高铁5G网络建设提供参考。

参考文献:

- [1] 杨晓梅. 织密高铁网络畅通发展动脉[N]. 陕西日报,2024-04-18(4).
- [2] 杨晓梅. 以高铁赋能城乡区域协调发展[N]. 陕西日报,2024-04-18(4).
- [3] 高江虹. 清明假期1.19亿人次国内游:“打高铁”城市群内串门美食愈发成为新动力[N]. 21世纪经济报道,2024-04-08(1).
- [4] 李宗恒,邹文杰,方子贤,等. 5G高铁专网覆盖综合解决方案研究和应用[J]. 电信工程技术与标准化,2024,37(1):87-92.
- [5] 李新,王强. 高铁5G覆盖网络建设挑战及应对[J]. 电信快报,2024(1):1-4.
- [6] 张建国,徐恩,张艺译. 5G NR峰值速率综合分析[J]. 邮电设计技术,2019(7):28-32.
- [7] 汪丁鼎,许光斌,丁巍,等. 5G无线网络技术与规划设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2019.
- [8] 李益锋,王晓军,于江涛,等. 李俊5G网络深度覆盖技术实战进阶[M]. 北京:人民邮电出版社,2023.
- [9] 岐洁,程锋,张晓娟. 5G行业市场业务需求分析模型初探[J]. 电信工程技术与标准化,2023,36(6):86-92.
- [10] 迟明洁. 5G大规模天线下的绿色通信技术[J]. 电信快报,2021(2):37-39.
- [11] 陈辉,黄炎. 5G高铁覆盖透镜天线试点应用研究[J]. 电信工程技术与标准化,2023,36(10):73-75,87.

作者简介:

王锋,硕士,主要研究方向为无线通信规划及设计;吴斌,高级工程师,硕士,主要研究方向为无线通信咨询、规划及设计;余毅,高级工程师,硕士,主要研究方向为无线通信咨询、规划及设计;李益锋,高级工程师,学士,主要研究方向为无线通信咨询、规划及设计。