



运营技术广角

5G 高铁无线网建设关键技术与解决方案

焦燕鸿, 王韬, 李富强, 马向辰, 尧文彬

(中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080)

摘要: 高铁已成为日常生活的一部分, 5G 时代为高铁用户提供高质量的移动通信网络非常重要。首先分析了进入 5G 时代后高铁建设面临的诸多技术挑战, 并在此基础上从 5G 高铁组网关键技术、设备选型、传输资源需求分析等角度进行技术分析并提出解决方案, 最后根据 5G 网络建设需求提出多场景网络建设方案。基于以上技术分析, 结合各地实际网络的建设需求、建设场景, 现网条件和投资额度等因素, 可因地制宜、精准高效地制定 5G 高铁无线网络建设方案。

关键词: 5G 网络; 高铁; 无线

中图分类号: TP929.531

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020170

Key technologies and solutions of 5G high-speed railway wireless network

JIAO Yanhong, WANG Tao, LI Fuqiang, MA Xiangchen, YAO Wenbin

China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

Abstract: High-speed railway has become a part of daily life. It is very important to provide high-quality mobile communication network for high-speed railway users in 5G era. The technical challenges faced by high-speed railway construction after entering the 5G era were analyzed, and on this basis, the key technologies of 5G high-speed railway network, equipment selection, transmission resource demand analysis were analyzed and solutions were put forward. Based on the above technical analysis, combined with the actual network construction demand, construction scenarios, current network conditions and investment, 5G high-speed railway wireless network construction scheme could be formulated accurately and efficiently according to local conditions.

Key words: 5G network, high-speed railway, wireless

1 引言

“十一五”以来, 中国高铁建设迅猛发展, 从“四纵四横”到“八纵八横”, 高铁建设已成为国家战略层面推进的重点基础设施建设工程, 中国

步入高铁时代, 高铁成为中国人民生活的一部分。通过对高铁用户的分析发现, 乘客中商务和旅游用户占比高达 80%, 乘客特征和运营商价值客户高度重合, 高铁成为运营商重要的品牌展示窗口和利润来源, 因此为高铁用户提供高质量的移动



通信网络非常重要。

高铁场景下 2G/3G/4G 网络覆盖方案一直是移动通信领域内的一个热点课题,进入 5G 时代后,高铁建设面临更多的技术挑战。

- 高速移动场景对移动通信的影响主要体现在多普勒频移效应、高速环境多径效应、UE 频繁切换导致 KPI 性能下降等方面。随着高铁提速,多普勒频偏带来的挑战增加,站间切换更加频繁。
- 5G 采用 2.6 GHz D 频段进行覆盖,与 4G F 频段相比,D 频段覆盖能力弱,车厢穿损增加,如与 4G 共站建设,覆盖上面临较大的挑战,需研究应对策略。
- 考虑铁路覆盖为带状狭长区域,智能天线无法稳定发挥多流特性。4G 高铁选择双通道设备进行网络覆盖,并配合使用高增益、窄波束的天线提高网络覆盖。5G 时代提供了更多的设备形态选择(2T/4T/8T/16T/32T/64T 等),需结合网络性能、设备能力、工程实施等角度进行选型分析。

基于以上问题,本文从 5G 高铁组网关键技术、设备选型、传输资源需求分析等角度进行技术分析,并在此基础上提出 5G 多场景建设方案。

2 组网关键技术

高速移动场景中,多普勒频移和频繁切换是导致网络性能下降的主要原因。上行最大多普勒频偏见表 1,多普勒频偏与网络部署频率和速度变

化成正比。与 4G 网络部署在 F 频段相比,5G 网络部署在 2.6 GHz,同时在全国高铁提速的大背景下,5G 高铁面临更大的挑战。

表 1 上行最大多普勒频偏(单位:Hz)

速度	频偏			
	1.8 GHz	2.6 GHz	3.5 GHz	4.9 GHz
200 km/h	667	963	1 286	1 816
250 km/h	833	1 204	1 619	2 267
300 km/h	1 000	1 444	1 929	2 722
350 km/h	1 167	1 685	2 269	3 176
450 km/h	1 500	2 167	2 894	4 083

同时,在 UE 发生小区切换时,也会引起网络吞吐量的明显下降。切换时网络指标性能恶化情况如图 1 所示,图 1 中圆圈内由于发生小区切换,网络吞吐量发生突降,降幅达 50%左右。在高速移动的情况下,如果采用传统网络部署方式,将导致 UE 频繁切换,进而大大影响用户体验。同时,频繁切换也会导致网络切换失败率指标的恶化。

以上问题主要通过 5G 标准和设备性能提升、组网方案等方式予以解决。

2.1 5G 标准与设备性能提升

5G 协议和设备厂商算法优化均提高了高铁抗频偏能力。5G NR 协议在支持快速移动方面进行了增强:多 DMRS 自适应联合信道估计能够更好地跟踪高速移动速度,补偿系统性能。5G NR 增强型参考信号的最高可估计和补偿的频偏范围为 $\pm 14\,000$ Hz。5G NR 协议导频增强示意图如图 2 所示。

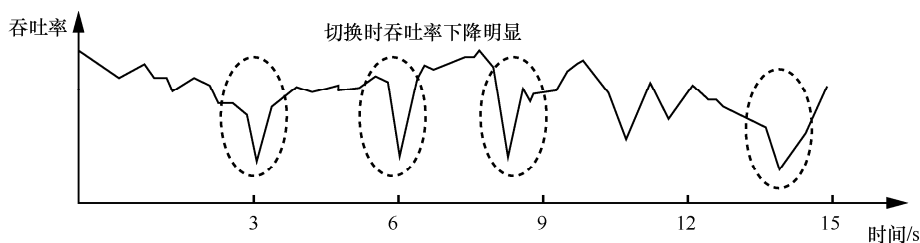


图 1 切换时网络指标性能恶化情况

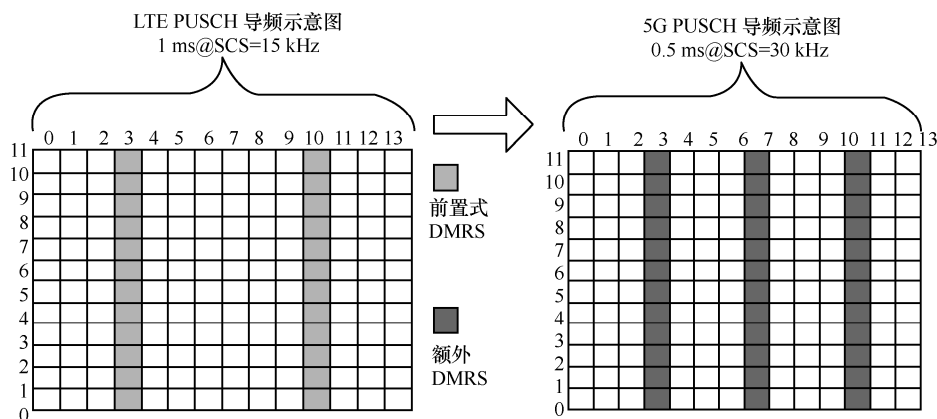


图2 5G NR 协议导频增强示意图

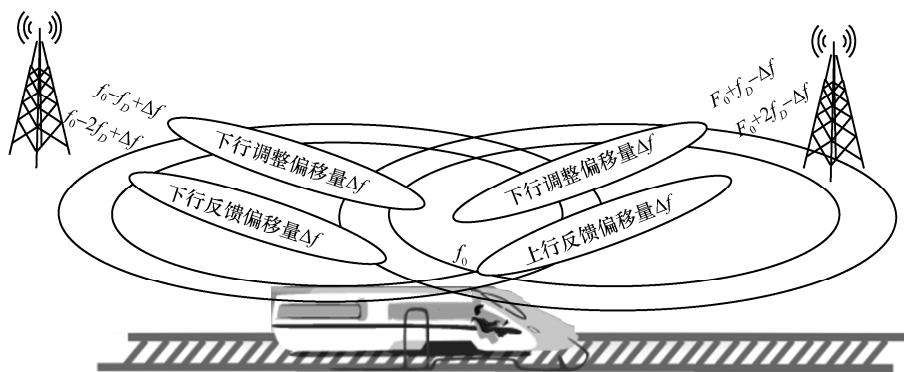


图3 5G 主设备频偏补偿方案示意图

主设备厂商研发了频偏补偿方案,在时域和频域进行补偿,以提高系统增益。5G 主设备频偏补偿方案示意图如图3所示。

2.2 5G 高铁组网方式

高铁组网中,通过多小区合并技术减少切换次数,对抗列车高速移动引起的频繁切换。5G 组网仍需采用小区合并方式降低小区间切换次数。5G 高铁组网方式示意图如图4所示。每个物理站点配置两个 RRU 完成高铁沿线的覆盖,多个物理站点通过小区合并技术,与 BBU 相联合为一个逻辑小区。典型的小区合

并能力为每逻辑小区配置 3~6 个物理站点(6~12 个 RRU)。5G 高铁基站采用小区合并后,网络切换示意图如图5所示,切换点的间距较单站组网大幅提升。

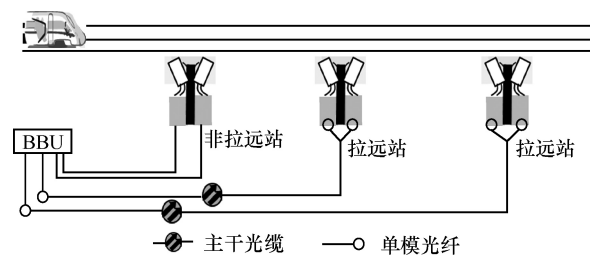


图4 5G 高铁组网方式示意图

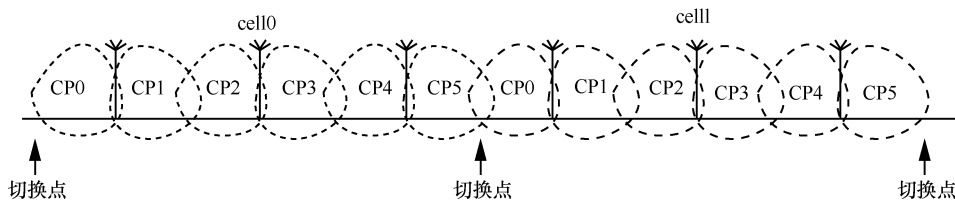


图5 5G 高铁网络切换示意图



2.3 切换和重叠覆盖区规划

高铁网络需通过设置切换重叠带以提高切换成功率。合理的重叠覆盖区域规划是实现业务连续的基础，重叠覆盖区域过小会导致切换失败，过大会导致干扰增加，影响用户业务感知。高铁切换重叠带的设置取决于两个因素，一为过渡区域；二为切换执行。5G 高铁网络切换重叠带示意图如图 6 所示。

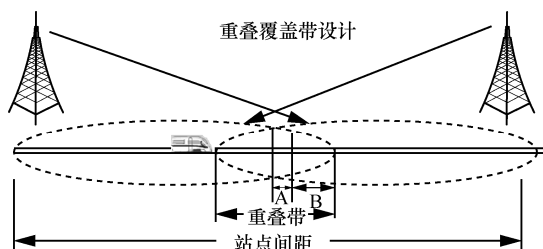


图 6 5G 高铁网络切换重叠带示意图

过渡区域是指邻区强度达到切换门限所需距离，该指标与网络制式无关，5G 网络设计中，可沿用 4G 估算距离。切换执行是指主设备执行切换时间所产生的运动距离，该标准取决于主设备能力，经与主设备厂商的沟通，5G 设备切换执行时延与 4G 相似，并无大的差异。因此，综合两方面的因素，5G 高铁重叠带设置可参照 4G 标准。

3 设备选型

5G 时代提供了更多的设备形态选择，包括 2T/4T/8T/16T/32T/64T 等。高铁场景由于其特殊性，无法与室外宏蜂窝采用相同站型，需结合网络性能、工程实施、投资等因素进行设备选型分析。

3.1 2T~64T 等设备形态在高铁场景的可用性分析

多天线技术是 5G 的关键技术之一，给网络性能带来极大的提升，但这些设备是否适用于高铁场景，仍有待分析。首先对设备可用性进行分析，并在此分析的基础上，再进行具体的技术对比分析。

室外宏蜂窝根据覆盖场景多选用 16T/32T/64T

等站型。然而，16T/32T/64T 等多通道设备无法作为高铁基站备选设备，主要原因如下。

- 受限多天线合并数据量超大，模块间交互时延和带宽均无法满足性能要求，主设备无法实现小区合并功能，会造成高铁用户高速运动中频繁切换，严重影响网络质量和用户感知。
- 因通道多、馈线多，从工程实施角度考虑无法采用 RRU 形态，只能采用 AAU 设备形态，设备体积和重量受限，不适合在高铁场景中部署。
- 高速场景无法充分发挥多天线的空分优势，导致无法获得多通道设备高增益特性，而设备投资较高，因此设备部署性价比低。

4T 设备形态也是备选形态之一，但是由于 4T 形态在 TDD 制式系统中的应用较少，预计在未来 5G 大网室外及室内也无其他应用场景，需要开发新的硬件，这将造成量产规模小，与 8T 设备相比，成本优势不明显；另外在性能方面，4T 设备增益低于 8T，且比 2T 设备的增益也有限，无法弥补高频段部署带来的损耗，因此不建议作为备选设备形态。各种天线形态可用性对比分析见表 2。

根据分析结果可得，5G 高铁设备选型主要考虑 2T 和 8T。后文将针对这两种天线形态展开具体的技术对比分析。

3.2 2T/8T 设备选型对比

(1) 覆盖能力对比

5G 覆盖为上行受限，以 TD-LTE F 频段为基准，2T 和 8T 设备上行增益差异见表 3。5G 2T 上行覆盖比 TD-LTE F 频段低 2 dB，因此，如采用 2T 方式部署，网络覆盖电平将低于 4G F 频段网络。5G 8T 上行覆盖较 TD-LTE F 频段增强约 3 dB 左右，网络性能较好。

(2) 边缘速率对比

由于高铁车体穿损极大，5G 上行能力较弱。根据链路预算分析，同等站间距条件下，各系统

表 2 各种天线形态可用性对比分析

项目	2T LTE F	2T	4T	8T	16T	32T	64T
设备形态	RRU		RRU		AAU		
小区合并	12		6~12		不支持		
4G 及 5G 大网 其他应用场景	室外补盲 TD-LTE 高铁	TD-LTE/5G 室分 TD-LTE 高铁	FDD 1 800 MHz	TD-LTE 宏基站	5G 宏基站		
增益（上行共 点位）	2 dB（频段 优势）	0 dB（基准）	2 dB（多通 道合并增 益）	5 dB（多通 道合并增 益）	接收性能与 8TR 相比，有 3~9 dB 的多通道合并增益，但天线增益比 8TR+H30 的高增益窄波束天线低 9 dB，因此与 8TR 相比，不具有明显覆盖优势		

表 3 覆盖能力对比分析

系统	子载波带宽/kHz	终端功率差异/dB	传播损耗差异/dB	上行增益/dB	穿损差异/dB	共点接收信号/dB
LTE 1.9 GHz	15 kHz	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
LTE 2.6 GHz	15 kHz	0 dB	-4 dB	0 dB	-2 dB	-6 dB
NR 2.6 GHz 2TR	30 kHz	3 dB	-4 dB	1 dB	-2 dB	-2 dB
NR 2.6 GHz 8TR	30 kHz	3 dB	-4 dB	6 dB	-2 dB	3 dB

的上行边缘速率的高低关系为：FDD 1 800 MHz>5G 2.6 GHz 8T>LTE F>5G 2.6 GHz 2T>5G 3.5 GHz 8T>LTE D。

同等站间距条件下，5G 8T 较 5G 2T 设备上
行边缘速率提升 100%以上。

(3) 组网能力

根据前文分析，高铁组网中需通过多小区合
并技术减少切换次数，以对抗列车高速移动引起
的频繁切换。根据对主设备厂商的调研，2T、8T
设备均可支持 6 小区以上的小区合并。然而，受
BBU-RRU 传输带宽及光模块速率的限制，采用标
准 25GE 光口时，2T 设备可支持多级级联，而 8T
无法支持级联。

表 4 组网能力对比分析

对比项	2T	8T
小区合并	支持	支持
级联	具备 4 级级联能力	标准 25GE 光口不支持级联

(4) 设备成熟度及网络演进

2T 主设备方面，2×100 W 主设备 2019 年可
商用；受功放产业能力限制，2×160 W 设备商用
进程慢，目前无明确路标。如果采用 2×100 W 设
备进行 160 MHz 带宽组网，反向开启 4G 时需牺
牲下行覆盖能力，发射功率下降 2 dB，较 4G 现
网覆盖半径收缩 13%左右；天线方面，业界已有
支持 2T 160 MHz、可实现 900/1 800/FA/2 600 共

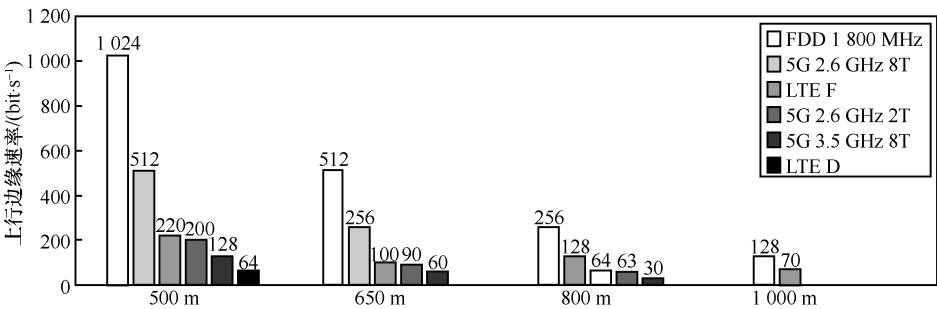


图 7 边缘速率对比分析



天面部署的宽频天线，技术较为成熟。后续需驱动该天线增益从 17 dB 提高到 20 dB，才能与 4G 高增益天线性能相当。

8T 设备主设备和天线均需根据新的技术要求重新研发产品，产品开发周期为 6~12 月，目前主要的高铁主设备厂商和天线场景均已开发相关产品。

综上所述，5G 高铁设备选型主要在 2T 和 8T 之间进行选择，从目前网络部署来看，由于现网天线设备绝大多数都不满足 5G 网络的部署要求，因此无论采用 2T 还是 8T 方案，现网全部 RRU 和绝大多数天线均需更换。2T 方案节约主设备投资，但发射功率仅支持 2×100 W，影响网络性能。8T 方案性能较好，但天线和主设备均为新型定制化产品，性能有待验证，且网络部署投资较高。考虑到推动 2T 主设备发射功率提升难度更大，且 8T 工程总投资增幅随着规模建设有进一步降低的可能，因此建议优先选择 8T 设备进行网络建设。在现网天线已支持宽频（D 频段 160 MHz）、天面部署八通道存在困难、网络利用率低、经济欠发达等线路，可考虑采用 2T 设备进行建设。

4 传输纤芯资源需求

根据高铁网络组网要求，高铁设备应具备支持 6 小区以上的小区合并和级联的能力，而级联能力受 BBU-RRU 传输带宽及光模块速率的限制，8T 设备采用标准 25GE 光口配置时，无法支持级联，在新建和现网光纤芯数充足的场景中，BBU 和 RRU 间可采用星形连接方式建设。组网结构示意图如图 8 所示。

当采用 8T 设备组网，采用标准“25GE 光口+星型”连接方式建设时，每个物理站需要光纤芯数为 4 芯。当 5G 网络在现网基础上建设时，将大比例存在光纤资源不足的情况，因此需研究相关解决方案以降低单物理站纤芯需求。目前可采用的解决方案有 3 种，分别为：方案一是标准“25GE 单芯双向+星形”组网方式；方案二是“10GE 彩光+星形”组网方式；方案三是“50GE/100GE+级联”方式。对各种方案的技术点、5G 单物理站纤芯需求、成本及其优劣势进行了分析见表 5。

根据上面的分析，考虑技术成熟度和性价比，优先推荐采用方案一，使用“25GE 单芯双向+星形”部署方式。

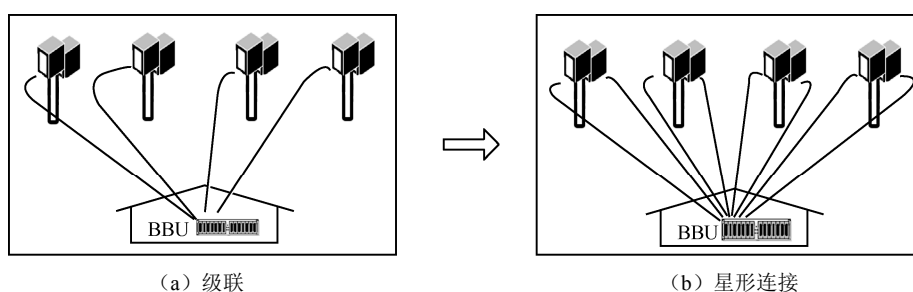


图 8 组网结构示意图

表 5 传输方案对比分析

方案	单站纤芯需求/芯	成本比例	优劣势
方案一（推荐）	25GE 单芯双向+星形	2	不需要外加设备，工程部署简单，光纤数量减半，规模商用后成本还存在降低的空间
方案二	10GE 彩光+星形	4.5	额外增加合分波设备，工程部署需要光波对齐
方案三	50GE/100GE+级联	6	器件有待成熟，成本较高

实际网络建设中,可根据现网纤芯资源的情况,采用不同的解决方案。本文将解决方案梳理为工作流程,如图9所示。

5 建设方案

基于上述技术分析,根据网络建设需求,对分场景的建设方案进行分析。下面从方案配置系统、适用场景以及2T/8T设备工程量等角度对各种方案进行详细的分析。

5.1 新建场景

新建场景根据建设需求的不同,可提出高、中、低网络部署方案。表6对每种方案的配置系统及其适用场景进行了详细的描述。

新建场景中采用不同的设备形态,在工程量上也存在不同。表7对新建场景中2T/8T设备建设涉及的天面资源、光纤配置、光模块配置、BBU配置、小区合并规划、单站功耗等情况进行了对比。总体来说,8T设备较2T设备天线价格高、设备功耗大。

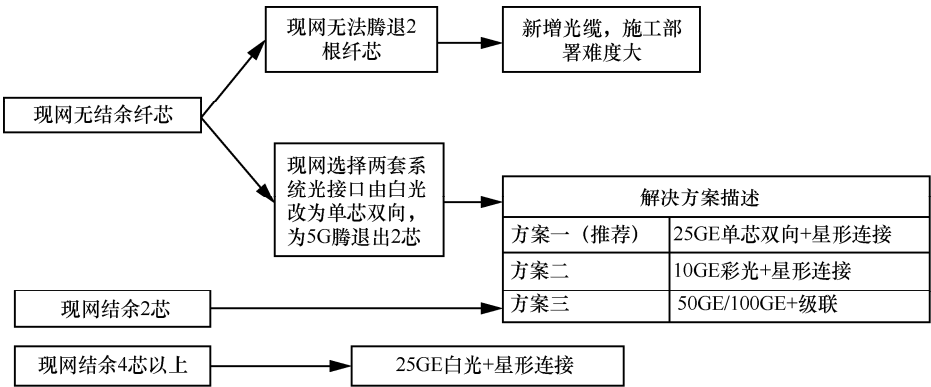


图9 分场景解决方案示意图

表6 新建场景建设方案对比分析

方案	配置系统	适用场景
方案一(高)	900 MHz+1.8 2T + FA 2T +NR/D 8T	极高价值路段全系统部署, NR/D 采用 8T 共模部署
方案二(中) (推荐方案)	1.8 2T + FA 2T + NR/D 8T	业务量较高场景, 部署 FDD 1 800 MHz/FA/NR/D 系统, NR/D 采用 8T 共模部署
方案三(低)	1.8 2T + NR/D 8T	大站间距低成本建网场景, 仅部署 FDD 1 800 MHz/NR/D (8T) 系统
方案四(低)	1.8 2T +NR 2T	业务需求低, 投资受限场景, 采用 5G 2T 方案

表7 新建场景 2/8 通道设备工作量对比

对比项	2T	8T
天面	2222 天线成熟产品, 成本低	2228 天线, 新产品
光纤	8T 方案较 2T 方案光纤芯数要求高, 但是在新建施工的部署影响小	
光模块	2 对 25 GE 光模块	
BBU 框	4G/5G 共用 BBU 框	
小区合并规划	支持 6 RRU 以上合并, 能力同 4G	
单站功耗	低	高



虽然 8T 设备需要的纤芯资源为 2T 设备的两倍，但在新建场景中，此影响较小。

5.2 改造场景

对于现网改造场景，根据现网部署和业务需求分析，可采用高、低两种部署方案。表 8 对每种方案的配置系统及其适用场景进行了详细的描述见表 8。

改造场景中，同样从天面资源、光纤配置、光模块配置、BBU 配置、小区合并规划、单站功耗等方面对 2T/8T 设备工作量进行了对比。总体来说，8T 设备较 2T 设备光纤部署要求更高，需要对供电能力进行评估，天线替换比例较高，因此会造成投资和工程实施难度的增加。

以上方案综合考虑了业务需求、线路价值、部署系统、部署工作量和投资等因素。在实际建设中，应结合省内建设需求、建设场景、现网条件和投资额度等因素，因地制宜地选择适合的方案进行网络建设。

6 结束语

为应对 5G 高铁建设中面临的诸多技术挑战，

本文分析了 5G 高铁组网的关键技术、设备选型、传输资源需求、多场景建设方案等技术内容，为 5G 高铁网络建设提供重要的技术分析。未来，将进一步研究高铁性能提升技术，提升用户体验。同时，高铁专网部署成本较大，未来将研究低成本网络部署策略，实现网络建设的降本增效。

参考文献：

- [1] 岳军, 张惠, 陶琳, 等. LTE 网络高铁及地铁场景性能分析工具介绍[J]. 电信科学, 2019, 35(Z1): 157-164.
YUE J, ZHANG H, TAO L, et al. Introduction of performance analysis tool for high[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(Z1): 157-164.
- [2] 程日涛, 张海涛, 王乐. 5G 无线网部署策略[J]. 电信科学, 2018, 34(Z1): 1-8.
CHENG R T, ZHANG H T, WANG L. Deployment strategy of 5G wireless network[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(Z1): 1-8.
- [3] 汤勇胜, 王正平. TD-LTE 高铁网络规划设计探析[J]. 移动通信, 2015(5): 81-86.
TANG Y S, WANG Z P. Analysis on planning and designing of TD-LTE high-speed railway network[J]. Mobile Communications, 2015(5): 81-86.

表 8 改造场景建设方案对比

方案	配置系统	适用场景
方案一（高）	使用 8T 设备对存量升级	业务量高，现网天线不支持 160 MHz 的场景，采用 8T 模式部署
方案二（低）	使用 2T FAD 设备对存量线路做升级，工程量最小	现网天线支持 160 MHz 且业务量需求低的场景，直接利旧现有天面，采用 2T 模式部署

表 9 改造场景 2/8 通道设备工作量对比

对比项	2T	8T
天面	部分天线可直接利旧，其他需替换为 2222 天线，2222 为成熟产品，设备成本低	全部替换为 2228 天线，新型定制产品
光纤	2T 设备采用标准 25GE 光口，可支持级联，每个物理站需要配置 1 对光纤	8T 设备采用标准 25GE 光口无法支持级联，BBU 和 RRU 间可采用星形连接方式建设，每个物理站需要配置 2 对光纤
光模块	将 FAD 模块光模块替换为 25GE	新增 2 对 25GE 光模块
BBU 框	新增或替换 BBU 框	
小区合并规划	支持 6 RRU 以上合并，能力同 4G，不需要重新规划	
单站功耗	增幅小，电源系统一般不用改造	增幅大，需要对供电能力进行评估

- [4] 董帝琅, 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(6): 36-41.
DONG D L, DU P J, XU S S. 5G wireless network planning and optimization in high-speed rail scenario[J]. Mobile Communications, 2019(6): 36-41.
- [5] 马良德, 左自辉, 彭博, 等. 高铁无线通信干扰检测及识别技术研究[J]. 中国铁路, 2019(7): 39-44.
MA L D, ZUO Z H, PENG B, et al. Interference detection and recognition technology for HSR wireless communication[J]. Chinese Railways, 2019(7): 39-44.
- [6] 3GPP. Physical layer measurements (Release 15): TS38.215 V15.5.0[S]. 2019.
- [7] 3GPP. Physical layer procedures for control (Release 15): TS38.213 V15.7.0[S]. 2019.

[作者简介]



焦燕鸿(1977-), 女, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络规划设计。



王韬(1973-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络规划设计。



李富强(1980-), 男, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为 5G 无线网云化、5G 无线网架构演进。

马向辰(1971-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司教授级高级工程师, 主要研究方向为 4G、5G 无线网络规划设计及无线通信新技术等。

尧文彬(1983-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为 5G 无线网规划关键技术与解决方案。