

5G网络在新建高铁隧道中的覆盖研究及应用

Research and Application of 5G Network Coverage Schemes in New High Speed Rail Tunnels

李益锋¹, 王晓军¹, 徐恒晔², 罗安宁¹, 袁平¹, 韦翔¹ (1. 华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 中国铁塔股份有限公司浙江分公司, 浙江 杭州 310000)

Li Yifeng¹, Wang Xiaojun¹, Xu Hengye², Luo Anning¹, Yuan Ping¹, Wei Xiang¹ (1. Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. China Tower Co., Ltd. Zhejiang Branch, Hangzhou 310000, China)

摘要:

随着越来越多高铁的建成开通,需要5G网络覆盖的铁路隧道里程也越来越多。为了进一步提升电信运营企业铁路隧道5G网络覆盖的效果和投资建设的性价比,需要从提资阶段隧道口洞室距离、场坪站的位置选择、过轨后洞室选择,设计阶段的设备选型、链路预算、容量测算以及优化阶段的小区设置、切换区设置等各个方面进行分析,以提升网络覆盖的容量及质量。

关键词:

高铁隧道; 5G; 链路预算; 设备选型; 小区设置

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.006

文章编号: 1007-3043(2025)02-0030-07

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:

With the construction and opening of more and more high-speed railways, the railway tunnel mileage requiring 5G network coverage is also increasing. In order to further improve the effectiveness of 5G network coverage in railway tunnels for telecommunication operators and the cost-effectiveness of investment and construction, it is necessary to analyze various aspects such as the distance between tunnel entrances and caverns, the location selection of yard stations, the selection of caverns after rail crossing during the resource demand proposal stage, and equipment selection, link budget, capacity calculation during the design stage, as well as the cell settings and switching zones during the optimization stage, in order to improve the capacity and quality of network coverage.

Keywords:

High-speed railway tunnel; 5G; Link budget; Equipment selection; Cell settings

引用格式: 李益锋, 王晓军, 徐恒晔, 等. 5G网络在新建高铁隧道中的覆盖研究及应用[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 30-36.

1 概述

5G作为新一代通信技术,能够满足人们对移动网络容量及质量日益提高的需求,成为我国“新基建”战略的一个焦点。当前5G网络覆盖的主流频段为中国电信的800 MHz、2.1 GHz和3.5 GHz,中国联通的900 MHz、2.1 GHz和3.5 GHz,中国移动的700 MHz、2.6 GHz和4.9 GHz。其中中国电信的800 MHz、中国联通的900 MHz和中国移动的700 MHz的5G网络主要用

于室外覆盖^[1-3]。中国电信的2.1 GHz和3.5 GHz,中国联通的2.1 GHz和3.5 GHz属于双方共建共享频段,一般情况下,高铁隧道内中国电信和中国联通(下称“电联”)共建共享5G网络^[4-5]。

高速铁路作为我国经济运行的大动脉,是国民经济快速发展的催化剂,同时也是人们日常出行最为常用交通工具之一,是国家重要的基础产业和关键的基础设施,也是我国“新基建”战略的一个焦点,对中国国家安全、经济社会发展和民生改善起着无可代替的全局性支撑作用。

便捷的出行和人们对移动网络需求的提升,使得

收稿日期: 2025-01-16

铁路的5G网络覆盖变得尤为迫切。针对越来越多铁路的建成开通,国内电信运营企业的铁路隧道里程也越来越多。为了进一步提升电信运营企业铁路隧道5G网络覆盖的效果和投资建设的性价比,需要从资源需求提出(简称“提资”)阶段、设计阶段到实施阶段,多阶段、多方面进行控制,本文将从上述几个方面进行分析以提升铁路隧道5G网络覆盖建设的性价比。

2 5G网络高铁覆盖的挑战

随着高铁技术的不断进步,高铁的速度也越来越快,目前主流速度为350 km/h,未来可达500 km/h甚至更高。运行速度的提升会导致多普勒频偏的加重以及5G网络小区频繁的切换。新型全封闭高速列车和5G网络的高频段会导致更高的穿透损耗。目前高铁使用的主流列车复兴号,其TDD NR 3.5 GHz的5G网络的穿透损耗高达30 dB以上,而原来的FDD LTE 1.8 GHz的4G网络在和谐号的穿透损耗仅为21 dB,相差9 dB,严重影响了网络覆盖质量。高铁隧道内的超高安全性要求,导致5G信号的路径损耗增加。在高铁隧道中,洞室间距长达500 m,单侧覆盖需要达到250 m,信号从信源发出经过POI合路然后通过馈线连接到漏缆,链路损耗比较大,导致信号在500 m漏缆的中间处覆盖比较差,从而形成弱覆盖区或者覆盖盲区,无法满足覆盖要求。隧道中,除漏缆安装在隧道壁上之外,还有信源与漏缆相连接的馈线,这些连接馈线的走线路由也需要考虑高铁运行的安全性,需要在地面槽道内布放,从而增加连接馈线的长度,增加信号的衰减,给高铁的5G网络覆盖带来了困难^[5-6]。

3 5G网络高铁覆盖的应对方式

面对5G网络高铁覆盖的挑战,为了进一步提升5G网络高铁覆盖的性价比,需要从提资、设计以及网络优化等多阶段入手,以提升5G网络高铁覆盖的水平^[7]。

3.1 提资阶段

提资一般指在进入铁路建设施工图设计阶段之前,铁路建设的各个专业(例如建筑专业、管线综合专业、电源专业等)把各自的需求提交给总设计单位,以便总设计单位将各专业所需要的资源在相应的图纸中给予预留。

铁路的施工图设计评审之后,铁路建设的格局基本定型,后期进行变革的可能性非常小,因此公众通

信在铁路上的相关需求需要提前进行提资,特别是隧道内的提资尤为重要,不仅需要对隧道内的设备、泄漏电缆的安装位置及空间、设备需要的电力、光缆/电缆的布放位置等进行提资,为了进一步提升5G网络覆盖的效果,还需要对其他细节进行提资。

3.1.1 隧道口洞室距离的提资

在铁路公众通信的覆盖中,隧道口的覆盖一直是难点,这个区域主要考虑的问题是5G网络在隧道口区域的覆盖以及该区域的小区切换。

隧道口到隧道内的第1个公众通信洞室的间距尤为重要,间距太大会导致洞室内的信号无法完全覆盖到隧道口;间距太小则会导致切换重叠区域过小,降低切换成功率。根据实际经验,建议隧道口的洞室到隧道口的间距在150~200 m(见图1)。

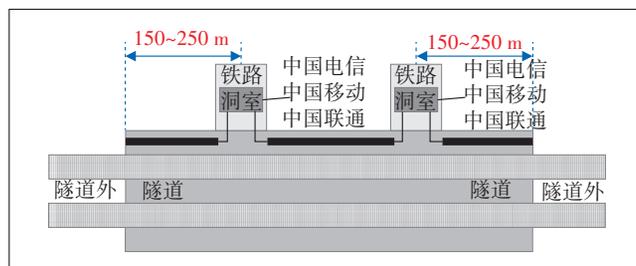


图1 高铁隧道口公众通信洞室与隧道口的间距要求

3.1.2 场坪站的位置选择

隧道口到隧道外的部分,为了提升隧道内基站和隧道外基站切换的成功率,一般情况下会在隧道口设置一个场坪站,用于延续隧道内的信号在隧道外覆盖一段距离,与外部基站形成一个重叠区,场坪站一般采用天线覆盖。

场坪站的信号需要和隧道内的漏缆连接,连接的路由距离很重要,间距太大会导致场坪站的信号无法输送到隧道口的漏缆内。建议隧道口到场坪站的路由距离在150 m以内(见图2)。

合理选择场坪站的位置,可以提升隧道口5G信号的切换成功率。

3.1.3 过轨后洞室间距选择

一般情况下,高铁隧道内公众通信使用的洞室间距为500 m,公众通信的漏缆在隧道同一侧,然而,在特殊情况下,由于本侧没有可以使用的洞室预留,需要将设备安装在对面(见图3),为了防止来回过轨,需要将一段漏缆安装在对面的隧道壁上。在过轨的情况下,为了保证铁路运营的安全性,会使设备到对面

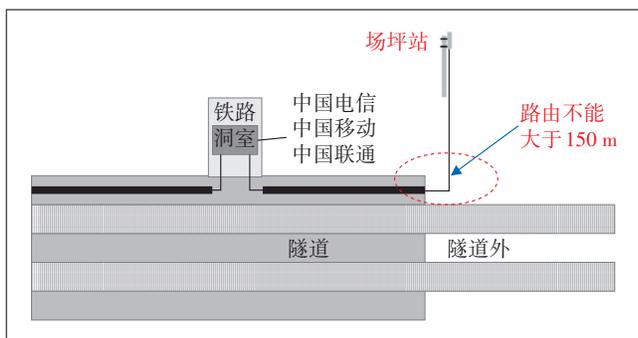


图2 高铁隧道口场坪站与隧道口路由距离要求

的漏缆接头连接馈线变长,从而导致信号的链路损耗增大,因此建议过轨后的洞室和本侧的洞室间距在250 m左右,不建议超过300 m。

3.2 设计阶段

实际上,提资阶段已经根据铁路的建设情况,进行了5G网络覆盖的初步设计,为了提升5G网络覆盖的效果,还需要在一些细节方面进行更加精细化的设计。

根据运营速度不同,铁路可以分为高速铁路和普通铁路,根据铁路的重要性也有很多等级,比如货运

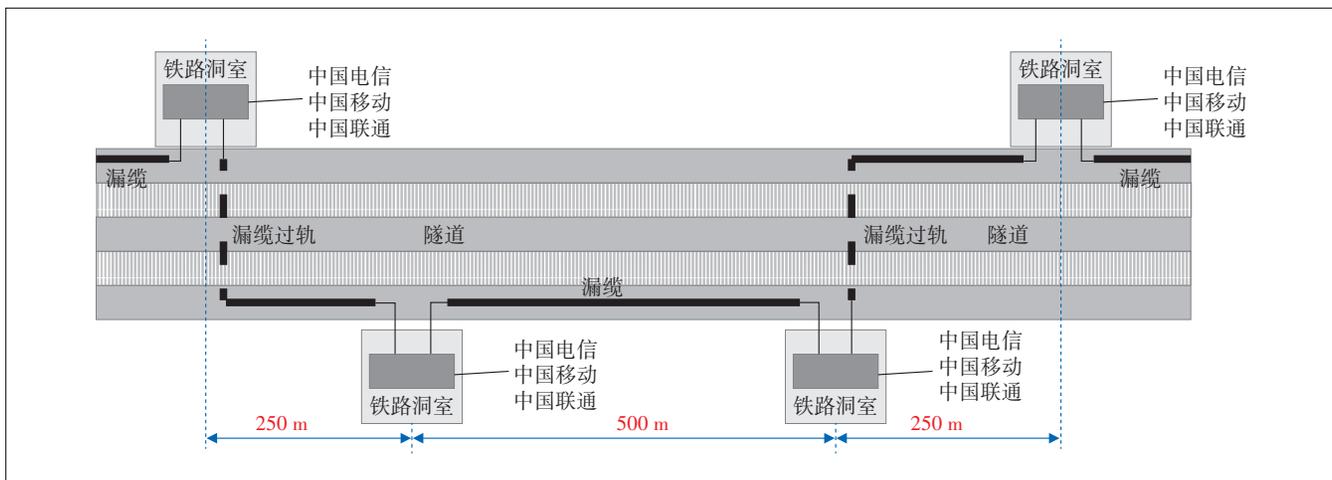


图3 高铁隧道漏缆过轨示意

铁路、客货两用铁路、普通客运铁路、高速客运铁路等。电信运营企业可以根据铁路等级的不同,选择不同的泄漏电缆数量对铁路隧道进行覆盖^[8](见图4)。

a) 货运铁路、客货两用铁路。由于铁路每天运行的班列比较少,用户的业务需求比较低,可以考虑采用单缆覆盖,3家电信运营企业共享使用。

b) 普通客运铁路。铁路上每天运行的班列数量较多,用户业务需求比较高,可以采用双缆覆盖,3家电信运营企业共享使用。

c) 高速客运铁路。铁路上每天运行的班列很多,用户业务需求非常高,由于列车运行速度快,车体损耗大,因此可以采用4缆覆盖,中国移动为了保证隧道内信号,可以采用13/8"的漏缆,电联为了保证网络的容量,则需要采用5/4"的漏缆。从共建共享的角度,中国移动和电联可以相互共享对方的2条漏缆,形成网络的4流效果。

采用不同的漏缆数量进行覆盖,需要结合网络使用的频段选择漏缆的线径,还需要结合链路预算、容

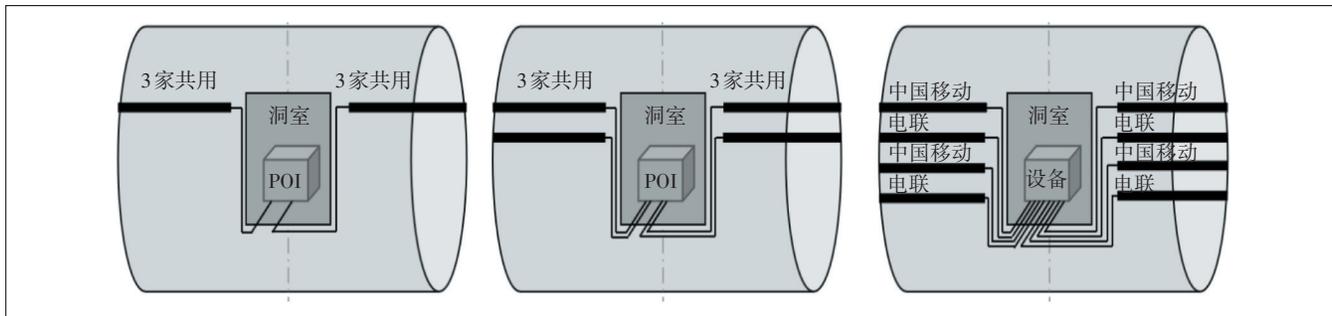


图4 铁路隧道漏缆布置类型示意

量测算和设备选型等综合考虑5G网络的覆盖。

3.2.1 链路预算

为了提升网络覆盖的能力,建议隧道内采用非线性损耗的泄漏同轴电缆,以增加覆盖距离。在铁路隧道中,公众通信洞室间距为500 m,单侧覆盖需要达到250 m,信号从信源发出经过POI合路然后通过馈线连接到漏缆的距离为13 m,采用5/4"非线性损耗漏缆进行覆盖,选择目前目录库中各个频段的大功率设备,根据各类参数计算其链路损耗,并测算250 m处的信号强度,结果如表1所示。

从表1可以看出,目前采用5/4"非线性损耗的漏

表1 高铁隧道网络覆盖链路预算(5/4"漏缆)

参数	网络频段				
	FDD LTE 1.8 GHz	FDD NR 2.1 GHz	TDD LTE 2.3 GHz	TDD NR 2.6 GHz	TDD NR 3.5 GHz
带宽/MHz	40	40	40	100	100
通道数	2	2	2	2	2
设备功率 P_t/W	160	160	160	100	160
设备功率 P_m/dBm	18.24	18.24	18.24	16.20	16.89
POI插入损耗 f_a/dB	5	5.5	5.5	5.5	5.5
功分器损耗 f_b/dB	0	0	0	0	0
跳线及接头损耗 f_c/dB	1.81	1.96	2.03	2.14	2.44
基站发射端口至漏缆处总损耗 $L_1(L_1=f_a+f_b+f_c)/dB$	6.81	7.46	7.53	7.64	7.94
阴影衰落余量 L_2/dB	0	0	0	0	0
车体损耗 L_3/dB	26	27	28	29	30
2 m处耦合损耗 L_4/dB	包含在综合损耗				
4 m处宽度因子 L_5/dB	6.02	6.02	6.02	6.02	6.02
人体损耗 L_6/dB	3	0	3	0	0
5/4"漏缆250 m综合损耗 L_6/dB	82	83	83	82	83
250 m覆盖边缘场强 P_r/dBm	-105.59	-105.24	-109.31	-108.46	-110.07

缆,在250 m处的边缘场强也仅仅满足覆盖要求,这是目前高铁隧道内5G网络覆盖的最好情况。若采用线性损耗的漏缆对隧道进行覆盖,同样条件的情况下,若采用5/4"的漏缆,TDD NR 3.5 GHz在250 m处的边缘场强为-123.37 dBm,完全不能满足覆盖要求,为覆盖盲区。

3.2.2 容量测算

高铁的容量测算可以根据运行列车的载客量进行测算,例如复兴号列车在2列8节编组列车组成的情况下,长度为414.26 m,高铁隧道内的公众通信洞室间距一般为500 m,即一个5G信源覆盖距离为500 m。因此一列高铁列车,基本处于1个RRU或者2个RRU覆盖区域之内(见图5)。

高铁隧道内的无线覆盖比较困难,为了满足大部分人的业务需求,一般情况下要保证4 Mbit/s的单用户下行速率。高铁列车8节编组载客数为600人左右,16节编组载客数为1200人,假设终端激活率为70%,5G渗透率为60%,中国移动的渗透率为60%,电联的渗透率为40%,则可以测算该列车5G网络数据流量的总体需求如表2所示。

根据3GPP的5G网络峰值速率计算公式:

$$R_{\max}(\text{Mbit/s}) = 10^{-6} \times \sum_{j=1}^J \left\{ V_{\text{Layers}}^{(j)} \times Q_m^{(j)} \times f^{(j)} \times R_{\max} \times \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j)\mu} \times 12}{T_s^{\mu}} \times [1 - \text{OH}^{(j)}] \right\} \quad (1)$$

式(1)内各类字母表示5G网络内的各类参数(具体见表3)。根据式(1)分别对电联的3.5 GHz 100 MHz带宽的5G网络、中国移动2.6 GHz 100 MHz带宽的5G网络和电联2.1 GHz 2×40 MHz的5G网络进行峰值速率计算,结果如表3所示。

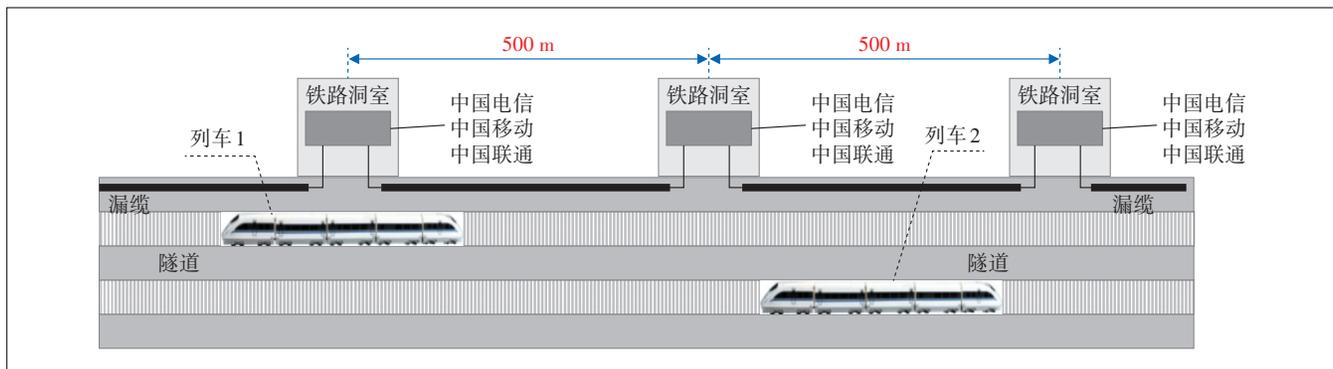


图5 高铁列车轨道运行示意

表2 高铁的列车数据需求

参数	中国移动	电联
旅客人数/个	1 200	
运营企业渗透率/%	60	40
终端激活率/%	70	
5G渗透率/%	60	
5G激活用户数/个	302	202
下行人均速率/(Mbit/s)	4	
列车数据需求/(Gbit/s)	1.21	0.81

表3 5G网络峰值速率计算

参数	代码	TDD NR 3.5 GHz 100 MHz		TDD NR 2.6 GHz 100 MHz		FDD NR 2.1 GHz 40 MHz	
		下行	上行	下行	上行	下行	上行
聚合载波数	J	1	1	1	1	1	1
码率 ^①	R_{max}	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926
最大层数(通道数)	V_{Layers}	4	2	4	2	4	2
最大调制阶数	Q_m	8	8	8	8	8	8
扩频因子	$f(j)$	1	1	1	1	1	1
子载波带宽指数	μ	1	1	1	1	1	1
OFDM符号时间长度/s	T_s	0.000 035 71				0.000 071 43	
最大RB数	N_{PRB}	273	273	273	273	216	216
开销 ^②	$OH(j)$	14	8	14	8	14	8
上下行符号占比/%	-	64.3	32.9	74.3	22.9	100	100
峰值速率/(Mbit/s)	-	1 502.4	410.7	1 736.1	285.7	924.5	494.5

注:①根据3GPP调制编码模式表(Modulation and Coding Scheme table, MCS table),我国几大运营商的5G网络采用的码率为最高码率,为0.926;② $OH(j)$ 是控制信道开销,根据3GPP TS 38.306要求,下行取14%,上行取8%。

从表3可以看出,中国移动2.6 GHz的5G网络在100 MHz带宽的情况下,单小区下行速率可以达到1.7 Gbit/s,电联的3.5 GHz的5G网络在100 MHz带宽的情况下,单小区下行速率可以达到1.5 Gbit/s,结合表2可知,隧道内5G网络采用上述2种频段覆盖,列车在单个小区情况下,能够满足数据业务需求。

若电联采用2.1 GHz的5G网络,在40 MHz下行带宽的情况下,单小区下行速率为0.9 Gbit/s,理论上也能满足要求,但是从通信设备性能角度来看,容量已经达到理论容量的87.6%,高于70%的扩容门限,因此可以认为网络容量无法满足要求。

利用同样的方法,可以计算各类铁路隧道的网络容量需求,根据需求选择网络进行覆盖。

3.2.3 设备选型

3.2.3.1 信源的选型

目前国内电信运营企业建设的5G网络,采用的频段主要包括中国电信的800 MHz、2.1 GHz和3.5 GHz,中国联通的900 MHz、2.1 GHz和3.5 GHz,中国移动的700 MHz、2.6 GHz和4.9 GHz。电联的2.1 GHz和3.5 GHz属于双方共建共享频段,一般情况下,高铁隧道内电联共建共享5G网络。

铁路隧道内使用的5G信源,根据输出端口数主要有2T2R RRU和4T4R RRU 2种类型。对铁路覆盖使用的RRU而言,其功率是最为关键的因素,会直接影响5G信号的强弱,常用RRU的功率输出情况如表4所示。

表4 隧道覆盖主要5G RRU功率输出情况

设备类型	频率/MHz	通道数	带宽/MHz	通道输出功率/W	子载频输出功率/dBm
RRU	2 100	2	20	120	20.00
RRU	2 100	4	40	120	16.99
RRU	2 600	2	100	160	16.89
RRU	2 600	2	160	160	14.86
RRU	3 500	2	100	160	16.89
RRU	3 500	2	200	160	13.88

从表4可以看出,子载频功率的大小不仅和通道输出功率有关,还和带宽有关。由于带宽会直接影响用户的体验速率,一般情况下会选择带宽大的方式进行覆盖,因此为了能够进一步提升覆盖信号的强度,建议采用信源设备目录库中通道输出功率最大的RRU。

3.2.3.2 POI的选型

部分共享一套漏缆系统的铁路隧道覆盖,一般会使用POI合路各个覆盖网络的信号。选用的POI需要满足该铁路的网络需求,并进行专门的设计,以便降低POI的插损。

例如某铁路采用双缆覆盖,电信运营企业需要将各个系统接入POI,一般情况下,会采用2T2R的RRU作为信源,POI则采用“一进两出”的类型,如图6(a)所示,这种类型的POI插损高达5.5 dB,大大降低了信号强度。为了提升网络覆盖的功率,可以采用4T4R的RRU作为信源,充分利用RRU端口的输出功率,POI则可以采用“两进两出”的类型,如图6(b)所示,这种类型的POI插损为2 dB,可以降低信号损耗。

从图6可以看出,“两进两出”的POI比“一进两

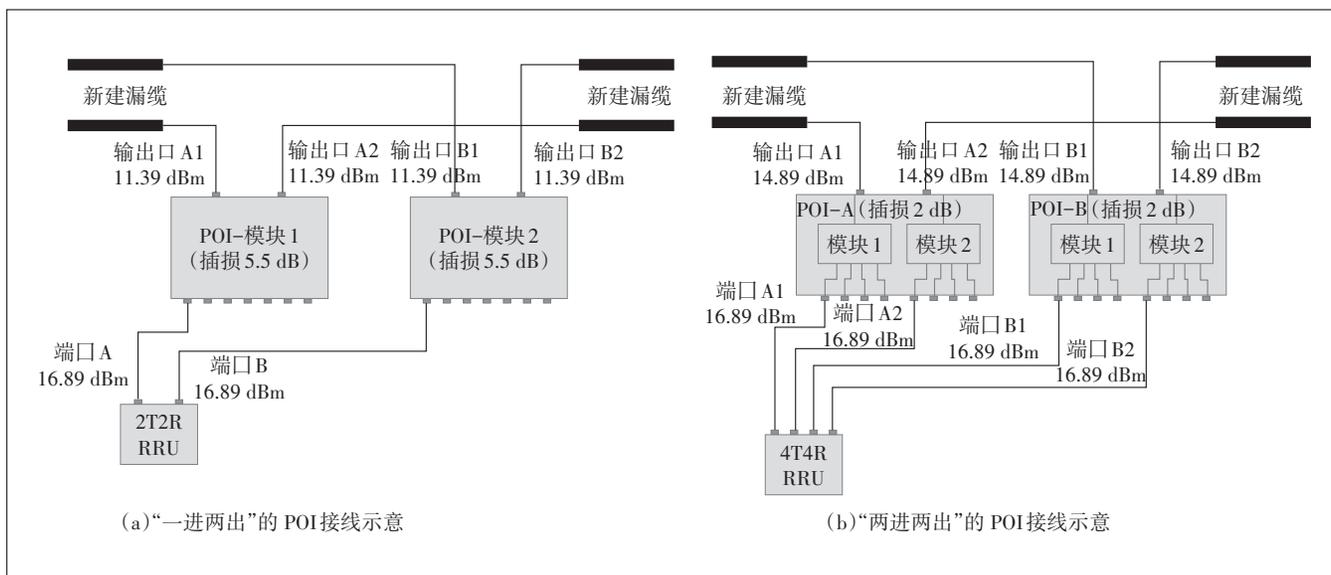


图6 2种POI连线示意

出”的POI输入漏缆的信号直接增加3.5 dB,极大地提升了信号强度。需要注意的是,“两进两出”的POI要考虑邻频合路问题,必要时有邻频的2个系统需要退频作为保护频段。

对于低频的系统,例如700、800、900 MHz,也可以根据实际需要,选择2T2R的RRU,而中高频选择4T4R的RRU,则POI需要对各类RRU进行专门的设计,以满足覆盖需求。

3.2.3.3 漏缆的选型

铁路隧道内的覆盖采用泄漏电缆,信号覆盖随着漏缆的延伸而逐步减小,直到不能满足覆盖目标为止。为了进一步提升铁路隧道里面的覆盖,使无线信号能在铁路隧道里面形成一个良好的覆盖,则需要引入非线性损耗漏缆。

对于普通的漏缆,同一频率的信号传输的传输损耗(最大纵向衰减常数,20℃)是固定的,而对于非线性损耗漏缆,同一频率的信号传输的传输损耗(最大纵向衰减常数,20℃)是不固定的,它的传输是有方向性的,靠近信源侧,信号强度比较大,所以耦合出去的信号比较小,随着漏缆的延伸,耦合出去的信号逐渐变大,也就是说,传输损耗随着漏缆的延伸而增大,可以使外部信号更加平衡,也使漏缆的覆盖距离得以增加。

泄漏电缆的线径越大,损耗越小,考虑到泄漏电缆的截止频段,在5G网络覆盖不需要高于2.8 GHz频段的5G网络时,可以采用13/8"的泄漏电缆;若需要

3.5 GHz频段的5G网络覆盖时,则需要选择5/4"的泄漏电缆。

3.2.4 漏缆的挂高设置

为了减少网络信号通过列车车体的穿透损耗,提升列车车厢内的覆盖水平,考虑到信号对玻璃的穿透损耗比车体低得多,故将漏缆的挂高安装在和列车的窗户相同高度的区域。目前使用比较多的高铁列车型号为CRH400BF,其车窗的上沿离轨道面2 753 mm,下沿离轨道面2 000 mm,与其他高铁车型窗户的上下沿高度相差不大。此次以CRH400BF为例布置漏缆。在单缆的情况下,建议安装高度为2 400 mm;双缆的情况下,建议高度为2 100和2 600 mm;4缆的情况下,建议安装高度为1 900、2 200、2 500和2 800 mm。

3.3 优化阶段

网络优化是网络建设中非常重要的一环^[9-12],优化工作已经作为一个长期的工作,贯穿于整个建设过程,例如提资阶段的洞室间距、场坪站的位置选择以及过轨洞室间距这些环节也是提升小区切换成功率的关键。设计阶段的设备洞室选择以及外部BBU的挂接等环节也是为了设置超级小区。

3.3.1 超级小区设置

当高铁的运行速度达到350 km/h时,即97.2 m/s,在一个RRU小区覆盖500 m的情况下,列车不到7 s就会经过一个RRU的覆盖区域到达下一个RRU的覆盖范围,若不进行小区合并则会导致频繁的小区切换,极大降低用户的感知。

目前主流的5G网络主设备厂家推荐的超级小区最大为6个RRU合并为一个小区,考虑6个RRU在隧道内的最大覆盖距离为3 000 m,350 km/h的高铁列车通过3 000 m的距离时间约为31 s,降低了小区切换次数,极大地改善了用户感知。

根据高铁列车的密度,在最小的高铁列车时间间隔为2 min的情况下,超级小区的设置也不影响网络的容量需求。

3.3.2 小区切换设置

为了使用户能够顺利地进行小区切换,需要从如下几个方面进行考虑。

a) 隧道口设置。为了使隧道内外的5G覆盖信号能够平滑过渡,建议隧道内的漏缆信号在隧道出入口得到延伸,考虑到高铁的安全性,需要在隧道口设置场坪站,将泄漏电缆的信号与场坪站的基站天线的信号连接起来;若场坪站不新增RRU,泄漏电缆与场坪站的基站天线直接连接即可,若场坪站新增RRU,则将场坪站RRU和隧道内的RRU设置为超级小区,防止信号在隧道口位置进行小区切换。

b) 小区切换的位置点选择。高铁5G网络覆盖的小区切换点的选择非常重要,一般情况下需要和超级小区的设置相协调。考虑到高铁覆盖的重要性,电信运营企业会选择部分高铁线路进行专项网络建设,在这种情况下,网络切换需要考虑室外切换和隧道内切换。室外切换点建议选在铁路周边网络比较单一、基本没有业务需求的地方,例如山区、田间等。若不考虑建设专项网络,隧道内切换点选在2个间距在500 m的RRU覆盖的洞室之间。室外则需要考虑隧道口延伸信号与外部基站小区间的切换。

c) 切换重叠区设置。根据网络的性能,高铁的小区切换时间一般在20 ms左右,在350 km/h的车速下,20 ms可以通过35 m,考虑到小区切换门限,建议5G信号重叠区在100 m左右,以提升小区的成功率。

3.4 5G网络高铁覆盖的实例

某高铁采用上述技术手段进行覆盖,开通后进行测试,测试的网络为FDD NR 2.1 GHz,信源采用2×80 W,测试结果如表5所示。

表5 某高铁5G网络测试数据统计

测试区间	平均RSRP/dBm	平均SINR/dB	下行平均速率/(Mbit/s)	上行平均速率/(Mbit/s)	RSRP≥-105采样点占比/%	SINR≥-3采样点占比/%
某高铁	-97.06	19.09	25.01	11.32	95.43	94.86

从表5可以看出,覆盖电平SS-RSRP值大于等于-105 dBm的测试点的比例达到95.43%,SS-SINR值大于等于-3 dB的测试点的比例达到94.86%,覆盖效果良好。

4 结束语

高铁隧道内环境错综复杂,各种原因导致无线环境恶劣,如何有效地部署5G网络,需要综合考虑隧道内的局限性,通过各类产品的选型,尽量降低其网络覆盖的局限性,提升网络覆盖的质量,提升电信运营企业网络建设的性价比和用户感知度。

参考文献:

- [1] 马彦波,赵敏,李益锋. LTE MIMO 2×2技术在地铁民用通信覆盖中的实现[J]. 轨道交通装备与技术,2017(2):24-26.
- [2] 艾渤,马国玉,钟章队. 智能高铁中的5G技术及应用[J]. 中兴通讯技术,2019,25(6):42-47,54.
- [3] 李益锋,金超,陶昕. 地铁民用通信的5G覆盖解决网络研究[J]. 电子技术应用,2020,46(8):26-32.
- [4] 张晓江,吴丽勇. 5G高铁隧道覆盖方式分析[J]. 移动通信,2020,44(3):85-88,96.
- [5] 彭威城. 多运营商高铁隧道中国移动网络覆盖方案[J]. 电信工程技术与标准化,2019,32(10):29-33.
- [6] 罗小红. 高铁隧道公网信号覆盖的干扰分析与解决方案的探索[J]. 通讯世界,2019,26(7):152-154.
- [7] 马丹,冯明仁,李凤花,等. 高铁5G覆盖方案的应用及分析[J]. 广东通信技术,2022,42(8):34-39.
- [8] 许灏,王渤,俞彬,等. 高铁隧道5G覆盖应用渐变辐射型漏缆的研究[J]. 通信技术,2022,55(10):1368-1375.
- [9] 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.
- [10] 李益锋,于江涛,王晓军,等. 5G网络深度覆盖技术基础解析[M]. 北京:人民邮电出版社,2023.
- [11] 李益锋,王晓军,于江涛,等. 5G网络深度覆盖技术实战进阶[M]. 北京:人民邮电出版社,2023.
- [12] 赵洪伟,谢永芳,刘建华,等. 5G高铁专网部署优化策略及应用技术研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(1):167-174.

作者简介:

李益锋,高级工程师,学士,主要从事无线网络规划与设计及室内深度覆盖研究和高铁地铁公众通信覆盖研究工作;王晓军,高级工程师,硕士,主要从事无线网络规划与设计及室外广覆盖研究工作;徐恒晔,高级工程师,学士,主要从事高铁公众通信覆盖研究工作;罗安宁,高级工程师,学士,主要从事无线网络规划与设计及技术研究工作;袁平,高级工程师,学士,主要从事无线网络规划与设计及技术研究工作;韦翔,工程师,学士,主要从事无线网络规划与设计及技术研究工作。