

5G 各类场景的天线覆盖解决方案

5G Antenna Coverage Solutions for Various Scenes

苏凤轩,陈楚雄,陈孟香(中国联通广州分公司,广东 广州 510630)

Su Fengxuan,Chen Chuxiong,Chen Mengxiang(China Unicom Guangzhou Branch,Guangzhou 510630,China)

摘要:

5G Massive MIMO 天线技术具有更高的无线吞吐量和抗干扰能力,64TR/32TR 被看作是 5G Massive MIMO 天线的标准配置。试验网数据证明 5G 基站系统通道数的增加并未提升单用户的感知,其作用主要是增加多用户的接入容量,但同时也增加了建网投资成本。天线设计复杂度高、体积大、造价高等缺点限制了其在某些场景使用的可行性。研究了各类典型场景下 5G 天线的解决方案,使其既发挥 5G 波束赋形天线的优势又适应各种应用场景的需求,在覆盖和容量上达到最佳的性价比。

Abstract:

5G Massive MIMO antenna technology has higher wireless throughput and anti-jamming ability. 64TR / 32TR is regarded as the standard configuration of 5G Massive MIMO antenna. The experimental network data shows that the increase of the channel number of 5G base station system does not improve the perception of single user, its main role is to increase the access capacity of multiple users, but also increase the investment cost of network construction. Its high complexity, large volume and high cost of antenna design limit its feasibility in some scenes. It studies the solutions of 5G antenna in various typical scenarios, which not only gives full play to the advantages of 5G beam shaped antenna, but also adapts to the requirements of various application scenarios, and achieves the best cost performance in terms of coverage and capacity.

Keywords:

5G; Massive MIMO; Antenna solutions; Shaped antenna; Leaky cable

引用格式:苏凤轩,陈楚雄,陈孟香. 5G 各类场景的天线覆盖解决方案[J]. 邮电设计技术,2020(8):53-59.

关键词:

5G; Massive MIMO; 天线方案; 赋形天线; 漏缆

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2020.08.011

文章编号: 1007-3043(2020)08-0053-07

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):



0 前言

根据通信市场发展的趋势研判,真正基于 5G 技术的高阶物联网应用场景的出现还需要很长一段时间,4G/5G 将长期共存,协同发展。基于 4G/5G 网络将长期共存的组网策略来分析天面架构的演进,业界提出了所有非 5G 网络的天线将高度集成为 1 副一体化高阶多系统共用天线,所有服务于 5G 网络的天线将高度集成为 1 副天线,各占一个天面空间,从而形成极简天

面架构的解决方案。5G Massive MIMO 天线技术具有更高的无线吞吐量和抗干扰能力,是 5G 的关键技术之一。随着 5G 试验网络开展,发现 5G 基站系统通道数的增加并未提升单用户的感知,其作用主要是增加多用户的接入容量,但同时也增加了建网投资成本。实际的应用场景,如室外密集热点场景、广域覆盖场景、室内分布场景、交通干线和隧道场景,在覆盖和容量上的需求都是有差异的。64TR/32TR 被看作是 5G Massive MIMO 天线的标准配置,但天线设计复杂度高、体积大、造价高等缺点限制了其在某些场景使用的可行性,所以很有必要针对各类细分场景研究 4G/5G 网络

收稿日期:2020-07-16

共存的天线解决方案。

1 基于场景的5G网络需求分析

移动通信网络的应用场景主要分为室外密集热点场景、广域覆盖场景、室内分布场景、交通干线和隧道场景等,其业务特点有所不同。

1.1 室外密集热点场景

室外密集热点城区对网络覆盖和容量要求都较高,在密集的城区场景,部分上下行链路存在遮挡以及基站穿透能力有限,室内或室外部分区域出现了弱覆盖或覆盖盲区,为实现连续覆盖,需要单独进行补盲,即为深度覆盖。业务热点区域用户对数据速率、数据流量需求大,特别是中心商用街区、人流量密集的广场及重要交通枢纽区等区域,存在30%的区域消耗70%流量的现象,也是5G网络部署的重点区域,这类场景的5G基站站距小,设备密集,宜选用抗干扰能力强、支持MU-MIMO及波束赋形的天线,提高整个小区的吞吐量和容量。

1.2 广域覆盖场景

广域覆盖和连续覆盖是移动通信网络覆盖的最基本要求,需要同时兼顾用户的移动性和业务服务的连续性。

对于城区和发达省份的城郊结合区域,人流量密集、住宅小区、机关、企事业单位等较多,日常数据流量开销较大,但负荷量不高,业务调度的频次也不高。实际覆盖时不需要在垂直方向进行波束的数字扫描,常规的波束电下倾调整就可以满足网络的覆盖要求。这类场景宜选用性价比高的宽波束天线,在满足广域覆盖和连续覆盖的基础上,还能兼顾一定的容量覆盖。

针对农村、郊区等区域,用户相对较少,相应的数据流量需求也较低,只需满足5G网络的最基本需求即可。这类场景宜选用体积、重量与4G天线相当的天线,且不需要对杆塔进行升级。

1.3 室内分布场景

一般的建筑物内部间隔多,阻挡大,深度覆盖需求主要靠天线分布系统解决。室内场所人流固定,热点区域日常数据流量开销较大,负荷较高。室内覆盖具有天线功率小、天线体积小、容量灵活等需求。数字化室分系统能够较好满足5G室内覆盖的需求。容量方面,目前数字化室分只支持4TR,会损失部分波束赋形的特性,单用户速率体验受小区用户数影响较大。

1.4 交通干线和隧道场景

交通干线和隧道场景是典型的线覆盖,尽可能增加天线的覆盖距离和天线增益,保证线覆盖的连续性。典型的线覆盖通常使用窄波束天线来增强主瓣方向的天线增益,但容易出现塔下黑的现象,水平方向上会出现零点覆盖。在线覆盖的场景中,天线设计应采用多波束天线,让波束在水平方向上具有赋形功能,能够兼顾远点和近点的连续覆盖。

1.5 其他场景

在某些场景,用户对于环境和谐度要求高,或者业主对电磁敏感,需要特殊的美化天线或小型基站解决方案,如住宅小区和商业街区,对深度覆盖与数据流量需求较高,分布面积广。这种场景,单个基站的大规模波束赋形也难以解决深度覆盖问题,需要分布广泛、小型美化的天线方案。

2 主宏站场景5G天线解决方案

2.1 覆盖与速率测试

主宏站场景包括密集城区、一般城区以及乡镇农村的覆盖场景。中国联通对64T&32T高楼覆盖进行了对比测试,测试结果如下。

密集城区测试见图1和图2。普通城区测试见图3和图4。郊区测试见图5和图6。

测试结果表明,64T在密集城区的覆盖和下行速率增益更明显,64T下行覆盖增益为4 dB,下行速率增益平均为40%。而在普通城区或郊区,天线通道数的增加并没有获得明显的覆盖和下行速率增益。

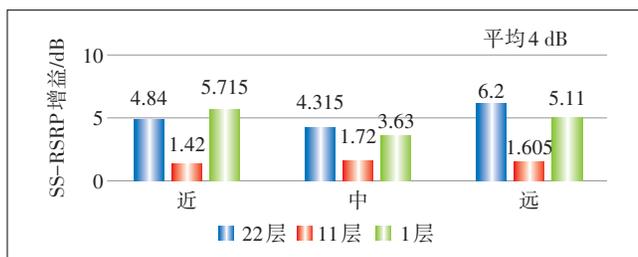


图1 密集城区64T&32T高楼覆盖SSB-RSRP增益

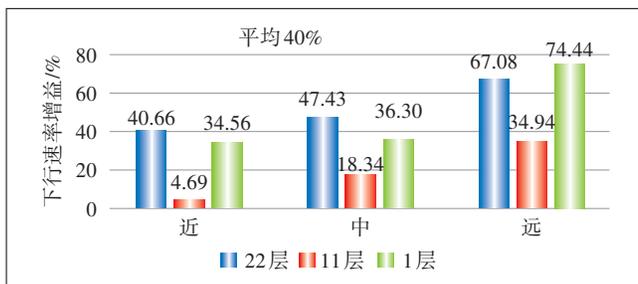


图2 密集城区64T&32T高楼覆盖下行速率增益

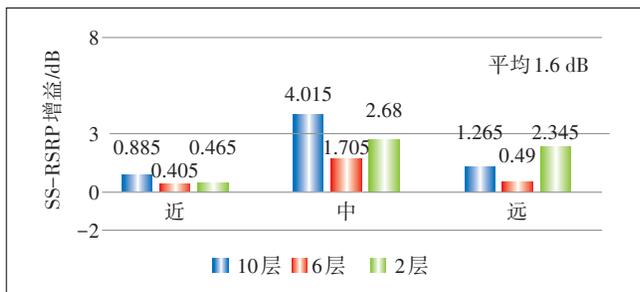


图3 普通城区 64T&32T 高楼覆盖 SSB-RSRP 增益

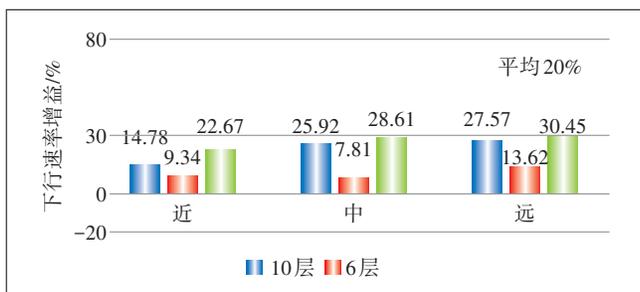


图4 普通城区 64T&32T 高楼覆盖下行速率增益

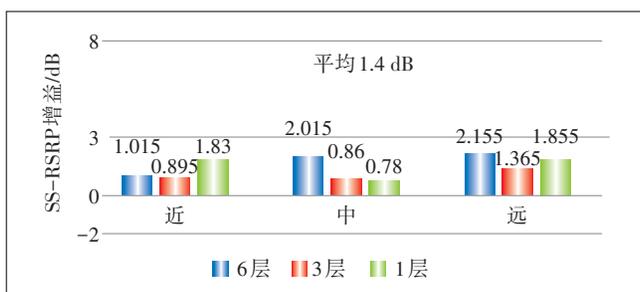


图5 郊区 64T&32T 高楼覆盖 SSB-RSRP 增益

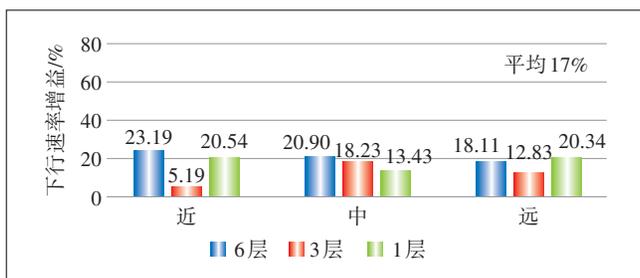


图6 普通城区 64T&32T 高楼覆盖下行速率增益

2.2 上下行容量仿真

主宏站场景包括密集城区、一般城区以及乡镇农村的覆盖场景。中国联通对 64T&32T 进行以上场景的容量仿真对比,仿真结果见图 7 和图 8。

仿真结果表明,64T 密集城区容量增益更明显,64T 下行容量为 32T 的 1.2~1.6 倍,上行为 1.1~1.2 倍。而在普通城区或郊区,天线通道数的增加并没有获得明显的上下行容量增益。

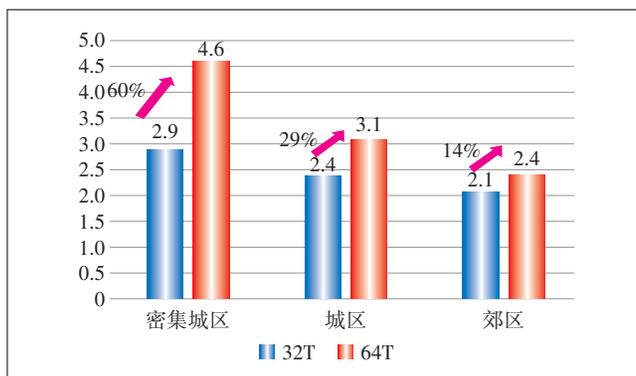


图7 64T&32T 高楼覆盖下行容量增益对比

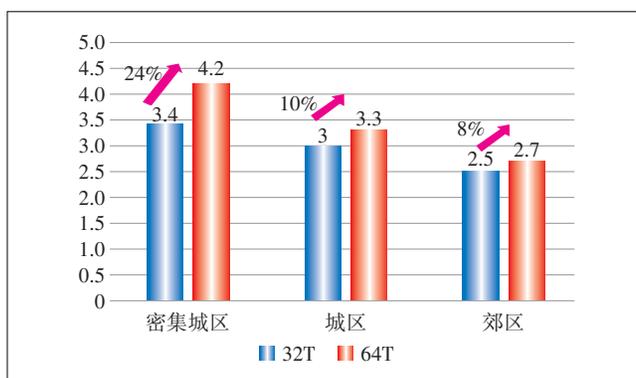


图8 64T&32T 高楼覆盖上行容量增益对比

2.3 主宏站场景 5G 天线解决方案

基于以上分析,综合考虑覆盖与容量及天线投资的性价比,在密集城区,5G 天线宜采用 64T/32T 为主的 Massive MIMO 3D 赋形天线。在普通城区,5G 天线宜采用 16T 为主的多波束天线。在乡镇郊区,5G 可使用 8T 为主的普通天线。主宏站场景 5G 天线解决方案见图 9。

a) 64T/32T 3D 赋形天线。在密集城区,5G 天线宜采用 64T/32T 为主的 Massive MIMO 3D 赋形天线。Massive MIMO 作为 5G 的关键技术之一,其关键技术在于 MU-MIMO 技术和 3D-MIMO 技术。MU-MIMO 即多用户 MIMO,网络中的多个用户可以在同一时频资源上利用 Massive MIMO 提供的空分通道与基站同时进行通信,在不增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率。3D-MIMO 技术是基于多阵列的波束赋形,波束赋形技术通过对各个天线阵元的信号作加权组合,进而改变天线阵列的权值,使波束形状和方向随之改变,让能量较小的波束集中在一块小型区域,可以赋形不同指向的不同增益的窄波束,这些窄波束可以根据需要在垂直和水平方向进行扫描,具备三维立体的覆盖能力。同时,还可以根据业务调度的需



图9 主宏站场景5G天线解决方案示意图

要匹配相应的波束,实现对小区内不同终端的灵活跟踪,且具备超强的抗干扰能力。一方面3D-MIMO波束具有更高的增益、更窄的波束宽度,并根据实际的需求指向任意的垂直和水平方向;另一方面,3D-MIMO波束可以同时存在并形成MU-MIMO波束,完成全空域覆盖。波束赋形技术的实现不仅需要更多的天线阵子,同时也需要天线由过去的射频处理单元同天线阵子相分离的无源向融合后的有源天线转变,以实现各个天线阵子相位和功率的自适应调整。缺点是算法复杂,大规模的天线阵列增加天线的体积和重量,天线造价昂贵。优点是3D波束赋形技术在提高网络覆盖范围的同时可以抑制干扰,提升小区边缘用户的体验,并能容纳更多的用户,提高小区的无线吞吐量和容量。

b) 16T/8T水平多波束天线。在普通城区,5G天线宜采用16T为主的多波束天线。在乡镇郊区,5G可使用8T为主的普通天线。如前所述,广域覆盖时不需要在垂直方向进行波束的数字扫描,常规的波束电下倾调整就可以满足网络的覆盖要求,但为发挥MIMO天线的作用,可以在水平方向做成多波束天线,在满足广域覆盖和连续覆盖的基础上,还能兼顾一定的容量。多波束天线也是利用多个天线阵列,将水平宽波束天线分裂成多个窄波束天线,以实现空间分集。水平多波束天线相比3D的赋形天线,其算法相对简单,阵元数量减少,从而减小天线的体积和成本。

3 室分场景5G天线解决方案

3.1 典型数字化室分系统

典型的室分场景包括政企写字楼、购物中心、宾馆酒店、医院等。一般建筑物内部间隔多,阻挡大,深度覆盖需求主要靠天线分布系统解决。传统室内分布系统(DAS)难以满足5G时代3.5 GHz以上的高频和Massive MIMO等要求,在工程实施、故障检测难和业务单一等方面的不足持续凸显。相比传统的DAS方案,数

字化室内分布方案将逐渐成为主流。

传统的无源天线分布系统很难实现MIMO,于是集成了传统RRU+天线的新型数字化室分在5G时代将会得到广泛应用。室内覆盖具有天线功率小、天线体积小、覆盖距离小,信号分布均匀和容量灵活调整等需求,数字化室分系统能够较好地满足5G室内覆盖的需求,但数字化室分系统天线仍是以全向天线为主以达到一定空间的全面覆盖,因此会损失波束赋形的特性,并且体积和功耗也受到限制,天线通道数目前只能做到4~6个TR。

以华为的5G数字化室分为例,其组成示意图见图10。

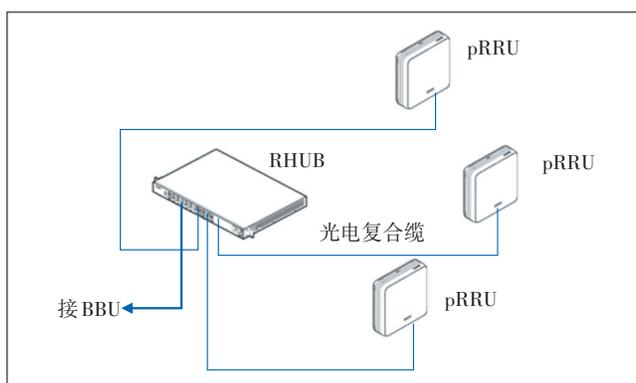


图10 数字化室分示意图

RHUB为射频远端CPRI数据汇聚单元,其主要功能包括:

- a) RHUB配合BBU、DCU以及pRRU使用,用于支持室内覆盖。
- b) 接收BBU/DCU发送的下行数据转发给各pRRU,并将多个pRRU的上行数据转发给BBU/DCU。
- c) 内置DC供电电路,向pRRU供电。
- d) 支持通过光纤链接pRRU组网方式。

pRRU为射频拉远单元,实现射频信号处理功能,其主要功能包括:

a) 将基带信号调制到发射频段,经滤波放大后,通过天线发射。

b) 从天线接收射频信号,经滤波放大后,将射频信号进行变频,经模数转换为数字信号后发送给BBU进行处理。

- c) 通过光纤/网线传输CPRI数据。
- d) 支持内置天线(4T4R)。
- e) 支持通过PoE/DC供电。
- f) 支持多频多模灵活配置。

3.2 大型场馆立方波赋形天线

大型场馆作为特殊的室内覆盖,具有空间大、人员密集、用户集中,业务需求量极大的特点。为了保证场馆内的容量需求,传统使用壁挂板状天线+小区分裂的方案来解决覆盖,但是小区分裂对同频组网会产生较严重邻区干扰,影响用户体验。借鉴宏站场景的赋形天线思路,针对大型场馆的室内覆盖,可采用特殊的赋形天线,控制波束的辐射范围,以达到精准覆盖和分区切割的效果。

立体方波赋形天线具有优异的波束收敛与旁瓣抑制能力,使得覆盖范围以外的信号迅速衰减,边界清晰,有效避免越区干扰与弱覆盖。

表1示出的是立体方波赋形天线与其他天线波束增益与波宽对比。

表1 立体方波赋形天线与其他天线波束增益与波宽对比

波束	3 dB波束宽度/°	10 dB波束宽度/°	20 dB波束宽度/°	25 dB波束宽度/°
立体方波赋形天线	40	65	75	80
常规65°场馆天线	65	120	150	160

立体方波赋形天线波束宽度合理收窄,更利于密集场景下多小区分割,实现容量提升。基于信源功率足够大,根据天线波束宽度及三角函数推算出天线覆盖范围。

表2示出的是立体方波赋形天线与其他天线覆盖范围对比。

4 高铁场景5G天线解决方案

4.1 传统33°与65°高增益天线

表2 立体方波赋形天线与其他天线覆盖范围对比

20 dB波束宽度覆盖直径	挂高15 m	挂高20 m	挂高25 m
立体方波赋形天线/m	25	33	42
常规65°场馆天线/m	168	224	280

相比传统高铁信号覆盖,5G高铁覆盖面临更大难题,一方面5G特色业务要求更高的网络性能,另一方面,5G更高的频率,高铁更快的速度会带来更严重的信号衰减和畸变,影响用户体验。传统线覆盖使用33°水平窄波束天线或65°水平宽波束高增益天线,都容易出现塔下黑的现象,水平方向上会出现零点覆盖。

4.2 5G 8TR波束赋形天线

5G高铁天线可考虑波束赋形,5G技术支持波束时分扫描。波束时分扫描可以有效地提高覆盖范围,即增加了等效的波束宽度。基于波束时分扫描原理,针对高铁应用场景可以在水平和垂直方向赋形,以弥补零陷带来的覆盖空洞,可弥补塔下黑的问题。

5G高铁赋形天线由4列天线振子组成,在水平有8个通道,可实现±30°的扫描范围。由于天线振子数的增加,天线增益相比F频段有3 dB的增益,配合MIMO功能,可以弥补D频段信号衰减大带来的影响。

按照三维模型,获取水平8通道天线合成波束在高铁线路不同距离上对应的增益值,与传统33°天线相比,水平零点被填充,覆盖效果有明显的提升。

图11示出的是水平8TR时分覆盖方案与传统高铁天线在高铁线路不同距离下的增益值对比。

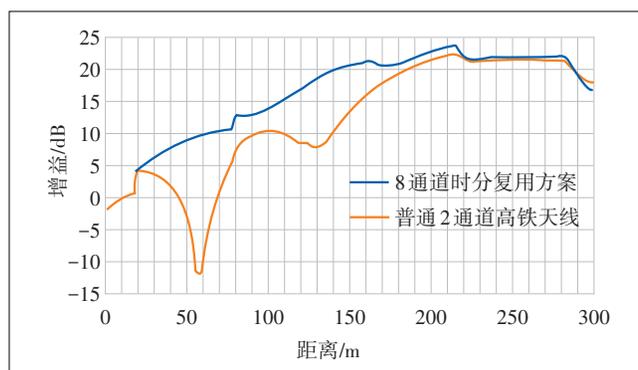


图11 水平8TR时分覆盖方案与传统高铁天线在高铁线路不同距离下的增益值对比

5 隧道场景5G天线解决方案

5.1 新型漏缆

高铁、地铁隧道内空间狭小且封闭,多径反射严重,传统13/8漏缆不支持3 GHz以上的频段,新型支持3.5 GHz的5/4漏缆百米损耗接近10 dB,当隧道区间超过500 m,漏缆不满足高铁站距500 m的要求。

表3示出的是漏缆百米损耗。

表4示出的是漏缆覆盖地铁隧道下行链路预算。

表3 漏缆百米损耗

漏缆型号	1.8 GHz	2.1 GHz	3.5 GHz
5/4漏缆传输损耗/(dB/100 m)	4.34	4.66	9.76
13/8漏缆传输损耗/(dB/100 m)	4.70	5.40	-

表4 中国联通漏缆覆盖地铁隧道下行链路预算

类别	计算	FDD-LTE 1.8 GHz	WCDM 2.1 GHz	5G
上行频段/MHz		1 735~1 765	1 940~1 980	3 500~3 600
下行频段/MHz		1 830~1 860	2 130~2 170	3 500~3 600
设备功率/dBm	<i>a</i>	43	43	90
载频数	<i>b</i>	1	4	1
回退值	<i>c</i>	0	10	0
导频功率、载波功率及RS功率/dBm	<i>d</i>	12.2	33	18.2
POI插入损耗/dB	<i>e</i>	2	2	2
	<i>f</i>	3	3	3
接头及跳线损耗/dB	<i>g</i>	1	1	1
连接电缆损耗/dB	<i>h</i>	0	0	0
泄露电缆入口功率/dBm	$i=d-e-f-g-h$	6.2	27	12.2
泄露电缆百米损耗(5/4)/dB	<i>j</i>	4.34	4.66	9.76
泄露电缆2 m处耦合损耗(95%)/dB	<i>k</i>	72.00	71.00	70.00
4 m处衰减因子(宽度因子)	<i>l</i>	3	3	3
车体阻挡/dB	<i>m</i>	12	12	12
人体损耗/dB	<i>n</i>	3	3	3
工程余量/dB	<i>o</i>	3	3	3
覆盖边缘场强/dBm	<i>p</i>	-105	-85	-110
最远点馈入点功率/dBm	$q=k+l+m+n+o+p$	-12	7	-19
最远点漏缆长度/m	$r=(i-q)/j$	419.35	429.18	319.67
双边覆盖距离/m	$s=r \times 2$	838.71	858.37	639.34
列车时速/(km/h)		100	100	100
切换距离/m		30.58	61.16	30.58
考虑切换, 单边距离/m	r -切换预留	388.77	368.02	289.09

根据隧道场景的下行链路预算,使用5/4漏缆覆盖地铁,单边有效覆盖距离为300 m左右,普通站距的地铁平均时速是35~40 km,通过隧道内增加设备断点,5/4漏缆可解决地铁隧道的5G覆盖。高铁平均时速是250~350 km,高铁隧道的设备区间平均为500 m,在高铁隧道的区间内不能增加设备断点,所以根据5/4漏缆的覆盖能力,依然不能完全解决高铁隧道的5G覆盖。

5.2 5G高增益贴壁天线

5G高增益贴壁天线可作为高铁、地铁隧道的覆盖解决方案。由于隧道空间狭窄封闭,该天线可设计为水平/垂直30°的窄波束天线,天线增益可达14 dB+,支持5G 4TR接入,保证网络容量。天线可贴壁安装,更低风载荷,安全可靠,整体建设成本费用远低于漏缆方案。

在江苏宜兴公路隧道进行了试点,试点采用3.5 GHz 4TR贴壁天线,信源采用8TR(100 W RRU)设备,在满足安全性安装的基础上进行隧道覆盖,分别在行车状态和步行状态测试网络的上下行速率。试点结果表明:实现了对隧道贯穿覆盖,覆盖距离达到800 m以上。隧道内人行道步测得的最大下行速率为488 Mbit/s,最大上行速率为90 Mbit/s,各项指标均满足相关要求。

6 其他特殊场景5G天线解决方案

在住宅小区和商业街区这种要求环境和谐高、对电磁辐射敏感的场景,基站选址会变得困难,而且单个基站的大规模波束赋形也难以解决深度覆盖问题。对于这种特殊场景,建议选用小型化、具有隐蔽外观的5G美化天线进行覆盖。

6.1 新型楼宇美化天线

对于住宅小区与工业园区,对深度覆盖和数量流量需求都很大,既要求天线分布式部署,又要多通道天线来提高用户的空口速率,现有室外覆盖多采用射灯天线、普通板状天线等楼间对打方案,但由于性能不佳,弱覆盖影响用户体验,成为投诉热点。5G需要天线厂家研发小型化、隐蔽外观的美化天线。

以京信公司研发的新型美化天线为例,其可在女儿墙壁挂安装,安装便捷。天线垂直波宽65°,垂直倾角可调±30°,支持4+4端口,可作为在64T宏站主场景选址困难的情况下4G/5G融合天线的选型。

图12示出的是新型楼宇天线波束宽度。

某小区采用传统射灯天线的覆盖方案,试点天线由第16栋(共18层)对打覆盖到18栋(共34层),楼间距40 m。试验结果表明,该款新型天线比传统射灯天线覆盖区域RSRP值平均增强5.5 dB;下载速率平均约提升6.9 Mbit/s,上传速率平均约提升0.97 Mbit/s,可作为住宅小区或工业园区分布式室外天线的选型。

6.2 5G小基站

随着5G时代的到来以及4K、8K、VR/AR等应用逐步商用,用户流量需求仍将保持高速增长,用户对无线网络覆盖和传输能力的需求不断提升。4G网络建设

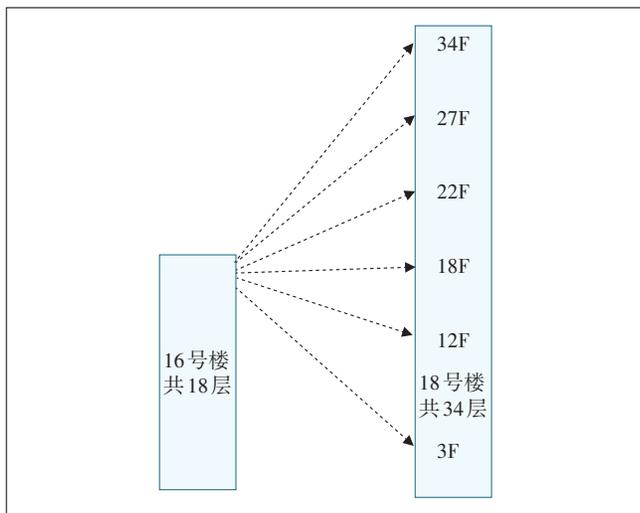


图 12 新型楼宇天线波束宽度

的后期,在宏站选址困难或某些业务热点的地方,运营商已大量部署灯杆、监控杆挂装的一体化小基站。同时,5G时代室内移动宽带的需求越来越大,传统室分无法支撑5G时代室内覆盖的需求和挑战,数字化室内分布方案将逐渐成为主流,并成为面向5G小基站演进的重要技术途径,小基站的重要性进一步凸显。小基站可以有多种产品形式,具有结构简单、功耗低、扩容方便、易于部署等特点,5G时代,改进版的小基站可以进一步增加天线通道数以满足5G用户的空口速率,满足深度覆盖与业务热点扩容的需求,具有广阔的应用前景。

7 结论

64TR/32TR被看作是5G Massive MIMO天线的标准配置,但天线设计复杂度高、体积大、造价高等缺点限制了其在某些场景使用的可行性。基于对各类细分场景覆盖与业务需求的分析,建议不同场景采用不同的天线覆盖解决方案。

综合考虑覆盖与容量及天线投资的性价比,在密集城区,5G天线宜采用64T/32T为主的Massive MIMO 3D赋形天线。在普通城区,5G天线宜采用16T为主的多波束天线。在乡镇郊区,5G可使用8T为主的普通天线。典型的室分场景宜采用4G/5G融合数字化室分系统覆盖,大型室内场馆使用特殊的方波赋形天线减少小区间干扰。高铁线覆盖建议使用8TR的波束赋形天线,波束扫描能有效解决水平0点覆盖空洞,也能兼顾水平增益。漏缆不能满足500m隧道区间覆盖距离的情况下,可采用窄波速高增益贴壁天线解决方案。

对其他特殊场景,小型化的美化天线以及小基站具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 卜斌龙,林学进,孙全有. 5G宏网天线覆盖解决方案及现网融合技术[J]. 移动通信,2019,43(4):21-24,42.
- [2] 董佳,王安娜,张敏,等. 5G高铁深度覆盖创新天线解决方案[C]//5G网络创新研讨会(2019)论文集,2019.
- [3] 张长清. 面向5G的大规模MIMO天线阵列研究[J]. 邮电设计技术,2016(3):34-36.
- [4] 中国联通网络技术研究院. 中国联通5G数字化室分技术白皮书[EB/OL].[2020-05-12]. <https://max.book118.com/html/2019/0628/8027125062002032.shtm>.
- [5] 栾帅,冯毅,张涛,等. 浅析大规模MIMO天线设计及对5G系统的影响[J]. 邮电设计技术,2016(7):28-32.
- [6] 张新军,刘海平,黄国钿,等. 5G新型数字化室内分布系统及其应用[C]//2019广东通信青年论坛优秀论文专刊,2019.
- [7] 孙广新. 智能天线在5G通信中的应用研究[J]. 科学技术创新,2019(6):88-89.
- [8] 陈嘉明. 新无线接入技术NR-MIMO赋形研究[J]. 电信工程技术与标准化,2019,32(10):76-82.
- [9] 伍国权. 面向5G的大规模MIMO天线阵列分析[J]. 信息与电脑(理论版),2018(16):161-162.
- [10] 郭志成. 5G室内分布系统解决方案研究[J]. 信息通信,2020(1):197-199.
- [11] 杨艳. 5G高铁覆盖及部署能力研究[J]. 电信技术,2019(10):28-31.
- [12] 查昊,朱巧玉. 5G地铁覆盖解决方案探讨[J]. 电信快报,2019(5):21-24.
- [13] GAO H Y, SU Y M, ZHANG S B, et al. Antenna Selection and Power Allocation Design for 5G Massive MIMO Uplink Networks[J]. 中国通信,2019,16(4):1-15.
- [14] ALI E, ISMAIL M, NORDIN R, et al. Beamforming techniques for massive MIMO systems in 5G: overview, classification, and trends for future research[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2017,18(6):753-772.
- [15] KIM J, SUNG M, KIM E S, et al. 4x4 MIMO architecture supporting IFoF-based analog indoor distributed antenna system for 5G mobile communications[J]. Optics express,2018,26(22).
- [16] 容静宝. 5G密集组网下Massive MIMO天线垂直覆盖应用研究[C]//5G网络创新研讨会(2019)论文集. 2019.

作者简介:

苏凤轩,毕业于中山大学,工程师,硕士,主要从事移动通信工程优化工作;陈楚雄,毕业于广东工业大学,工程师,学士,主要从事移动通信无线网络优化工作;陈孟香,毕业于南京陆军指挥学院,工程师,学士,主要从事移动通信无线网络优化工作。