

5G 多场景波束优化研究


Research on 5G Multi-Scenario Beam Optimization

蔡明兴,林婉婷,陈刚,梁彭韦,张永杰,吴文韵(中国联通广州市分公司,广东广州510220)
Cai Mingxing, Lin Wanting, Chen Gang, Liang Pengwei, Zhang Yongjie, Wu Wenyun(China Unicom Guangzhou Branch, Guangzhou 510220, China)

摘要:

Massive MIMO是5G的关键技术之一,相比传统MIMO技术,Massive MIMO不仅增加了垂直方向的波束赋形,且根据不同场景设计了不同的波束方案。通过分析波束赋形实现原理,结合实际场景情况,应用波束水平和垂直波瓣宽度计算公式,选择最佳覆盖场景设置,并选择实际场景进行波束优化试验,总结不同场景的波束优化案例。

关键词:

大规模天线;波束赋形;天线阵子;波束管理
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2020.08.013
文章编号:1007-3043(2020)08-0067-06
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:

Massive MIMO is one of the key technologies of 5G. Compared with traditional MIMO technology, Massive MIMO not only increases the beamforming in the vertical direction, but also designs different beams according to different scenarios plan selection. By analyzing the beamforming realization principle and combining the actual scene conditions, the calculation formulas of the beam horizontal and vertical lobe widths are used to select the best coverage scene settings, and the actual scene is selected for beam optimization test, which summarizes the beam optimization cases in different scenarios.

Keywords:

Massive MIMO; Beamforming; Antenna array; Beam management

引用格式:蔡明兴,林婉婷,陈刚,等. 5G多场景波束优化研究[J]. 邮电设计技术,2020(8):67-72.

0 前言

2019年中国工信部正式向移动、联通、电信以及中国广电发放5G商用牌照,5G网络在中国正掀起快速建设狂潮,同时全球各国也非常重视5G网络的建设商用,5G建设成为国家建设信息大国的重要举措。国际电信联盟ITU确定了5G未来三大应用场景:增强型移动宽带(eMBB)、超高可靠与低延迟的通信(uRLLC)和大规模(海量)机器类通信(mMTC)。其中eMBB侧重于移动通信,uRLLC和mMTC侧重于物联网。目前

5G网络处于建设发展初级阶段,5G业务应用主要为eMBB类,目前5G网络优化主要关注提升覆盖和速率。

Massive MIMO相对传统的MIMO技术,引入了垂直维度的空域利用,同时实现了在水平和垂直2个维度的电磁波覆盖,所以Massive MIMO也称为3D-MIMO。Massive MIMO带来了功率增益、阵列增益、分集增益三大多天线增益。Massive MIMO天线阵列中布有大量天线阵子,能够生成高增益、可调节的窄波束,不仅能提升小区的吞吐率,还能降低周边基站的干扰,即波束赋形。随着5G建设速度加快,基站密度逐渐加大,5G网络优化逐渐成为网络优化人员的首要优化目标,波束优化将成为新的网络优化手段。

收稿日期:2020-07-03

1 波束优化技术原理及应用

1.1 波束赋形实现原理

波束赋形(BF——Beamforming)是下行多天线技术之一,指基站对多天线加权后发送信号,形成窄的发射波束,将能量对准目标用户。与传统LTE宽波束相比,BF主要有以下2个方面优势:

a) 形成窄的发射波束,将能量对准目标用户,提高用户的信号强度。

b) 波束对准实时移动的用户,提升用户(特别是小区边缘用户)的信噪比。

BF主要运用了信号传播的空间相关性及电磁波的干涉原理,从而调整波束的宽度和方向(见图1)。

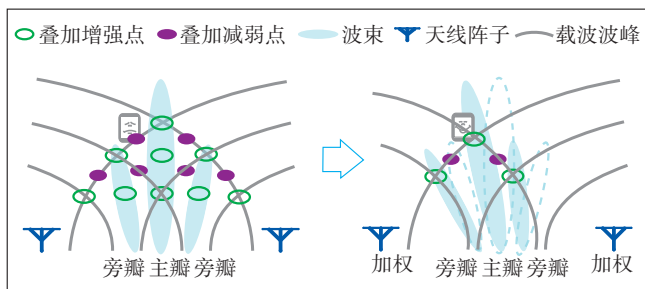


图1 波束赋形干涉原理示意图

图1中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。

a) 未使用BF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。

b) 使用BF后,通过对信号加权,调整各天线阵子的发射功率和相位,改变波束形状,使主瓣对准用户,提高信号强度。

简言之,BF通过加权形成定向窄波束,集中接收能量。接收方享有分集增益,通道数越多,分集增益越大。其加权方式采用基带将权值与待发射的数据进行矢量相加,实现信号幅度和相位的改变。

图2为波束加权计算示意图,设 H 是信道, $w(i)$ 是权值, $x(i)$ 是输入信号, N 是噪声,则输出信号为:

$$y(i) = Hw(i)x(i) + N$$

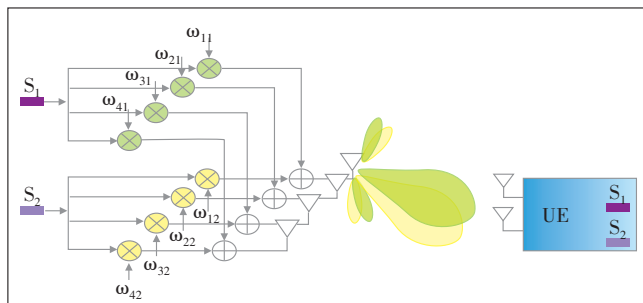


图2 波束加权计算示意图

BF权值的计算采用基站基于下行信道特征计算得到的权值向量,用于改变波束形状和方向。BF权值主要有控制信道静态权值和数据信道动态权值,数据信道动态权值由SRS权和PMI权2个部分组成。

SRS权:一般中、近点使用SRS权,获取UE上行SRS信号,根据互易原理计算出对应下行信道特征。

PMI权:一般远点使用PMI权,基于UE上行反馈的PMI选择最佳权值。

1.2 波束赋形实现流程

BF的完整实现流程包括数据流处理流程和Beamforming流程2个环节。

1.2.1 数据流处理流程

图3给出了数据流处理流程。

a) 码字:对应Transport Block,即物理层需要传输的原始数据块。支持在同一块资源同时传输2个相对独立的codeword。

b) 层映射:编码数据流和空间复用数据流层数通过层映射过程建立起对应关系。空间复用最大层数 $\leq \min(\text{发射天线数}, \text{接收天线数})$ 。

c) 预编码:将天线域的处理转换为波束域进行处理(利用已知的空间信道信息,即加权)。

1.2.2 Beamforming流程

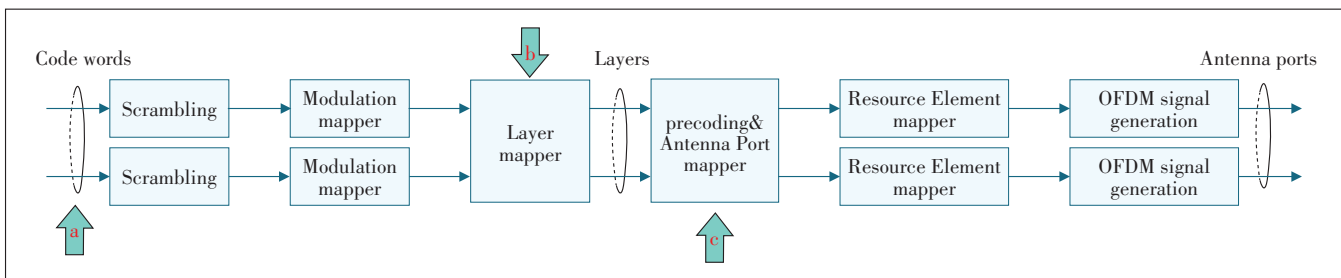


图3 数据流处理流程

波束赋形流程主要包括如下4个步骤。

a) 通道校正:保证收发通道的互易性和通道间的一致性。

b) 权值计算:gNodeB基于下行信道特征计算得到一个权值向量,用于改变波束的形状和方向。

c) 加权:在基带将权值与待发射的数据进行矢量相加,实现信号幅度和相位的改变。

d) 赋形:应用干涉原理,调整波束的宽度和方向。

1.3 波束优化作用

1.3.1 提升覆盖

波束赋形通过形成窄的发射波束,将能量对准目标用户,提升用户的信号强度。在各类场景中,基于场景的建筑特性及用户的行为习惯,使用不同的波束,可有效提高各种场景下的5G覆盖率,如:

a) 广场场景:近点可使用宽波束保证用户的接入,远点则使用窄波束,尽量提升覆盖。

b) 高楼场景:由于楼层比较多,用户分散在各楼层中,可使用垂直面比较宽的波束,可有效提升垂直覆盖范围,保证全量用户都在覆盖范围内。

c) 商业区场景:一般来说这类区域既有广场又有高楼,要想同时保持各处的覆盖能力,需要同时兼顾水平方向及垂直方向的覆盖,基于此,当我们采用水平、垂直覆盖角度都比较大的波束可同时满足该类场景的覆盖需求。

1.3.2 降低干扰

在传统的网络规划中,考虑到用户的移动性及分散性,为了保证全量用户的有效接入,天线往往是全向覆盖。但是在部分信号源较多且杂的场景中,如城中村场景,同频信号间的干扰往往会导致信号质量的下降,极大影响用户端感知。基于此,5G运用波束赋形技术,在小区间干扰较为严重的区域,使用水平扫描范围相对窄的波束,将波束实时对准用户,减少与相邻信号的接触,避免强干扰源,提升用户(尤其是小区边缘用户)的SINR(信号干扰噪声比)。

1.3.3 提高速率

运用5G波束赋形技术,提升5G覆盖和降低小区间干扰后,使用户使用的5G网络质量更好,从而达到提高速率的效果。另一方面5G波束优化可以发射窄波束,采用窄波束轮询扫描覆盖整个小区的机制,精准定位用户位置,可将能量对准目标用户发射,用户收到的网络服务更加集中,从而有效增加用户端的感知速率。

2 波束优化管理

2.1 波束优化场景分类

波束管理主要包含小区级波束管理和用户级波束管理,小区级波束管理是波束赋形时采用预定义的权值,即小区下会形成固定的波束,比如波束的数目、宽度、方向等都是确定的;而用户级波束管理是波束赋形时的权值是根据用户信道质量计算得到,会动态调整波束的宽度和方向。在开展5G网络优化中波束管理指小区级波束的配置与管理(见表1)。

表1 波束优化分类

| 波束优化类型 | 信道 | 技术 | 波束个数限制 |
|--------|--|-------------------|--|
| 小区级 | 广播信道(PBCH/SS) | 波束管理(预设权值) | Sub6G ≤ 8个;Sub3G ≤ 4个 |
| 用户级 | 数据信道(PDSCH/PUSCH) 控制信道(PUCCH/PDCCH) CSI-RS / TRS | 选择固定权值波束、动态权值波束赋形 | 波束个数不超过收发通道数,当前gNodeB最大支持64T64R,所以最大支持64个波束,典型为32个波束 |

5G波束除了预定义覆盖场景,不同厂家的5G AAU还具备不同的波束覆盖可设置场景,不同覆盖场景广播波束有不同的倾角、方位角、水平波宽、垂直波宽。此特性可解决或降低不同场景下小区覆盖受限以及邻区干扰问题。例如厂家A某型号5G AAU可以再支持配置16种覆盖场景(见表2);厂家B某型号5G AAU可再支持配置3种覆盖场景(见表3)。

2.2 波束场景选择

可以通过计算覆盖需求区域的宽度、高度与基站距离、高度、下倾角之间的关系,求出匹配场景覆盖需求的波束覆盖场景方案。

a) 垂直波宽确定。如图4所示,通过输入站高、楼高以及楼站距离可以算出所需垂直波宽A:

$$A = \text{degrees} \left(\text{atan} \frac{\text{站高}}{\text{楼站距}} \right) + \text{degrees} \left(\text{atan} \frac{\text{楼高} - \text{站高}}{\text{楼站距}} \right)$$

b) 水平波宽确定。如图5所示,通过输入楼宽以及楼站距离可以算出所需水平波宽B:

$$B = \text{degrees} \left(\text{atan} \frac{\frac{1}{2} \text{楼宽}}{\text{楼站距}} \right) \times 2$$

上述2个步骤是小区在理想方位和下倾角覆盖条件下,求出的是理想垂直和水平波宽需求。波束优化不同场景选择里面具备不同的下倾角、方位角可调范

表2 厂家A某型号5G AAU(64T64R)支持的波束场景表

| 场景 | 覆盖场景 | 场景介绍 | 水平3 dB波宽/° | 垂直3 dB波宽/° | 倾角可调范围/° | 方位角可调范围/° |
|----|-----------|---|------------|------------|----------|-----------|
| 1 | 广场场景 | 适用于水平宽覆盖,水平覆盖比场景2大,比如广场场景和宽大建筑。近点覆盖比场景2略差 | 110 | 6 | -3~15 | 0 |
| 2 | 干扰场景 | 当邻区存在强干扰源时,可以收缩小区的水平覆盖范围,减少邻区干扰的影响。由于垂直覆盖角度最小,适用于低层覆盖 | 90 | 6 | -3~15 | -10~10 |
| 3 | 干扰场景 | 当邻区存在强干扰源时,可以收缩小区的水平覆盖范围,减少邻区干扰的影响。由于垂直覆盖角度最小,适用于低层覆盖 | 65 | 6 | -3~15 | -22~22 |
| 4 | 楼宇场景 | 低层楼宇,热点覆盖 | 45 | 6 | -3~15 | -32~32 |
| 5 | 楼宇场景 | 低层楼宇,热点覆盖 | 25 | 6 | -3~15 | -42~42 |
| 6 | 中层覆盖广场场景 | 水平覆盖最大,且带中层覆盖的场景 | 110 | 12 | 0~12 | 0 |
| 7 | 中层覆盖干扰场景 | 当邻区存在强干扰源时,可以收缩小区的水平覆盖范围,减少邻区干扰的影响。由于垂直覆盖角度相对于SCENARIO_1~SCENARIO_5变大,适用于中层覆盖 | 90 | 12 | 0~12 | -10~10 |
| 8 | 中层覆盖干扰场景 | 当邻区存在强干扰源时,可以收缩小区的水平覆盖范围,减少邻区干扰的影响。由于垂直覆盖角度相对于SCENARIO_1~SCENARIO_5变大,适用于中层覆盖 | 65 | 12 | 0~12 | -22~22 |
| 9 | 中层楼宇场景 | 中层楼宇,热点覆盖 | 45 | 12 | 0~12 | -32~32 |
| 10 | 中层楼宇场景 | 中层楼宇,热点覆盖 | 25 | 12 | 0~12 | -42~42 |
| 11 | 中层楼宇场景 | 中层楼宇,热点覆盖 | 15 | 12 | 0~12 | -47~47 |
| 12 | 广场+高层楼宇场景 | 水平覆盖最大,且带高层覆盖的场景。当需要广播信道体现数据信道的覆盖情况时,建议使用该场景 | 110 | 25 | 6 | 0 |
| 13 | 高层覆盖干扰场景 | 当邻区存在强干扰源时,可以收缩小区的水平覆盖范围,减少邻区干扰的影响。由于垂直覆盖角度最大,适用于高层覆盖 | 65 | 25 | 6 | -22~22 |
| 14 | 高层楼宇场景 | 高层楼宇,热点覆盖 | 45 | 25 | 6 | -32~32 |
| 15 | 高层楼宇场景 | 高层楼宇,热点覆盖 | 25 | 25 | 6 | -42~42 |
| 16 | 高层楼宇场景 | 高层楼宇,热点覆盖 | 15 | 25 | 6 | -47~47 |

表3 厂家B某型号5G AAU(64T64R)支持的波束场景

| 覆盖场景 | 场景介绍 | 水平波瓣/° | 垂直波瓣/° | 倾角可调范围/° | 方位角可调范围/° |
|-----------|------------|--------|--------|----------|-----------|
| Macro | 用于广场覆盖 | 65 | 8 | -5~5 | 1~11 |
| Hot spot | 用于流量热点区域覆盖 | 65 | 30 | -5~5 | 6 |
| High rise | 用户高层楼宇覆盖 | 20 | 30 | -5~5 | 6 |

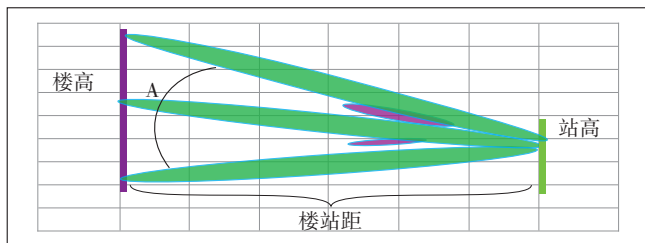


图4 垂直波宽计算示意图

围,结合实际的小区方位角和下倾角进行补偿后即可求出实际所需垂直和水平波宽。在方位角和下倾角与实际需求相差过大时,还需要结合RF优化调整。

3 多场景波束优化应用案例

3.1 高楼场景

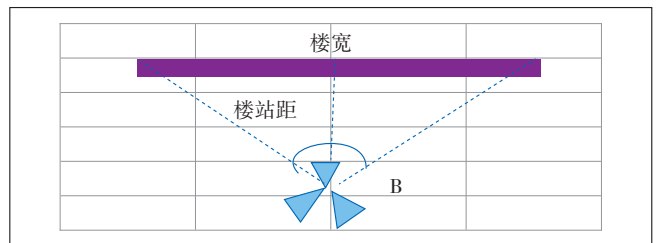


图5 水平波宽计算示意图

为研究波束优化在高楼场景中的应用效果,选取某小区进行试验,该小区内包含高、中、低层楼宇,外围已开通5G宏站,小区内楼宇建有4G室分,5G NSA组网模式下需4G作为锚点,因此选取该住宅小区具有很好的高楼场景代表性。

3.1.1 小区概况

该小区共8栋楼,其中A1、A2、A3、B这4栋楼为15层,C1、C2、C3这3栋楼为10层,D栋楼为25层高楼。

该小区由2个5G 64TR宏站(天线振子数192个)覆盖,分别为:263702-1-1-ONR、263693-1-1-ONR。

3.1.2 波束优化调整方案

根据波束优化原理对星汇雅苑覆盖楼栋进行场景选择计算,得出优化方案如表4所示。

表4 波束优化方案

| 小区名 | 经度 | 纬度 | 高度/m | Azimuth/° | 机械下倾/° | 场景 |
|----------------|----|----|------|-----------|--------|-------|
| 263702-1-1-ONR | XX | XX | 14 | 30 | 7→0 | 默认→13 |
| 263702-2-1-ONR | XX | XX | 14 | 130→157 | 8→-6 | 默认→12 |
| 263702-3-1-ONR | XX | XX | 14 | 340→318 | 7→6 | 默认→13 |
| 263693-1-1-ONR | XX | XX | 57 | 80 | 20 | 默认→14 |
| 263693-2-1-ONR | XX | XX | 57 | 230 | 20 | 默认→14 |
| 263693-3-1-ONR | XX | XX | 57 | 310→340 | 20→6 | 默认→12 |

3.1.3 波束优化前后仿真对比

根据优化前后站点参数进行仿真效果对比分析,优化后小区5G覆盖率由59.95%提升至92.7%,速率≥50 Mbit/s占比由58.47%提升至87.4%,速率≥100 Mbit/s占比由46.72%提升至82.35%。

3.1.4 波束优化前后测试对比

选取A1栋、B栋、C3栋、D栋的高、中、低层进行优化前后测试对比分析,测试情况如表5所示。

3.1.5 高楼场景案例分析小结

根据仿真效果及实际测试情况分析,波束优化对高楼场景影响如下。

a) 从整体上看,波束优化后5G覆盖率及速率都得到了显著提升。

b) 波束优化对低中高层影响不同,低层楼宇覆盖及速率有升有降;中层楼宇覆盖大幅提升,速率有明显提升;高层楼宇优化前为覆盖盲区,优化后覆盖和速率均大幅提升。

3.2 广场场景

广场场景通常为大面积无阻挡的广场,并由多个基站小区覆盖。为研究广场场景的波束优化效果,结合实际工作,选取某机场3F作为广场场景进行波束优化。

3.2.1 机场整体概况

该机场层高楼阔,节假日期间人群密集,覆盖和容量需求高。5G室分方案由于楼层过高的原因无法较好用于机场覆盖,因此采用5G AAU方案,AAU天线不同于室分天线,具有非常强烈的方向性和覆盖穿透能力,故机场3F使用了4个5G AAU进行全面覆盖(见图6),划分之后4个小区AAU信息如表6所示。

在优化前,默认波束场景下对机场进第一轮全面测试,结果显示:机场整体3F覆盖良好,由于4个5G

表5 波束优化前后测试情况对比

| 区域 | 楼层 | 分类 | 对比角度/% | | |
|-----|---------|---------|------------------|------------------|-----------------------|
| | | | RSRP≥-105 dBm 比例 | RSRP≥-125 dBm 比例 | 单用户下行速率≥100 Mbit/s 比例 |
| A1栋 | 3层 | 室内(寻优前) | 97.29 | 100.00 | 97.22 |
| | | 室内(寻优后) | 94.32 | 99.99 | 65.90 |
| | 11层 | 室内(寻优前) | 99.99 | 100.00 | 77.58 |
| | | 室内(寻优后) | 92.40 | 99.99 | 61.53 |
| | 18层 | 室内(寻优前) | 100.00 | 100.00 | 62.16 |
| | | 室内(寻优后) | 100.00 | 100.00 | 63.45 |
| B栋 | 3层 | 室内(寻优前) | 76.38 | 100.00 | 53.48 |
| | | 室内(寻优后) | 91.11 | 100.00 | 77.33 |
| | 11层 | 室内(寻优前) | 100.00 | 100.00 | 89.85 |
| | | 室内(寻优后) | 99.99 | 99.99 | 70.30 |
| | 18层 | 室内(寻优前) | 65.45 | 90.91 | 41.92 |
| | | 室内(寻优后) | 82.08 | 99.99 | 66.13 |
| C3栋 | 3层 | 室内(寻优前) | 59.26 | 100.00 | 11.54 |
| | | 室内(寻优后) | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| | 6层 | 室内(寻优前) | 100.00 | 100.00 | 32.14 |
| | | 室内(寻优后) | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| | 11层 | 室内(寻优前) | 100.00 | 100.00 | 25.00 |
| | | 室内(寻优后) | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| D栋 | 3层 | 室内(寻优前) | 89.47 | 100.00 | 61.02 |
| | | 室内(寻优后) | 37.14 | 100.00 | 26.22 |
| | 13层 | 室内(寻优前) | 45.36 | 100.00 | 49.09 |
| | | 室内(寻优后) | 66.13 | 100.00 | 56.67 |
| | 23层 | 室内(寻优前) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | | 室内(寻优后) | 29.23 | 100.00 | 14.55 |
| | 23层 | 室内(寻优后) | 57.05 | 100.00 | 79.82 |
| | | 室内(寻优前) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 15层 | 室内(寻优前) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | | 室内(寻优后) | 79.64 | 100.00 | 73.21 |
| 20层 | 室内(寻优前) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | |
| | 室内(寻优后) | 100.00 | 100.00 | 98.91 | |

AAU方位角距离较近,其中东西2个方向有2个小区覆盖方位角重合度较高,且机场大厅过于空旷,4个小区之间存在严重的重叠干扰,小区覆盖的区域存在交叉,未能较好覆盖初始规划区域,存在干扰严重区域点位,下行速率低的情况。

3.2.2 波束优化方案

机场5G覆盖包括室外和室内,分别由不同的5G AAU覆盖,由于3F采用4个200 W的小区,功率过大,导致室外存在越区干扰,故开展波束优化前应先整体降低功率。且由于5G AAU东西方向并非完全对称,故需采取差异化功率配置。

由机场覆盖示意图可知,3F整体面积不大,且可以忽略景点的覆盖问题,根据波束场景选择公式,为

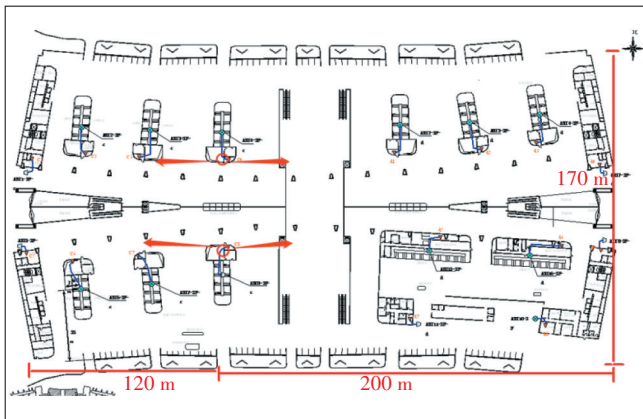


图6 机场3F的4台5GAAU覆盖示意图

表6 机场5G小区工参

| 项目 | 小区1 | 小区2 | 小区3 | 小区4 |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| TAC | 9486 | 9486 | 9486 | 9486 |
| CI | 1536 | 1537 | 1538 | 1539 |
| PCI | 675 | 676 | 677 | 678 |
| 小区带宽/MHz | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 中心频率号 | 636666 | 636666 | 636666 | 636666 |
| 5G帧结构 | 2.5 ms 双周期 | 2.5 ms 双周期 | 2.5 ms 双周期 | 2.5 ms 双周期 |
| 特殊子帧时隙配比 | 7:3 | 7:3 | 7:3 | 7:3 |
| 发射功率/W | 200 | 200 | 200 | 200 |

最大程度降低水平方位干扰,计算出4个采用华为5G AAU5613的波束场景设置为11,水平波瓣宽度为 15° ,并对方位角进行修改,可以满足覆盖需求,具体参数设置如表7所示。

表7 机场波束优化调整方案

| 小区PCI | 功率/W | 波束场景设置 | 水平3 dB波宽/ $^\circ$ | 垂直3 dB波宽/ $^\circ$ | 波束数字下倾调整/ $^\circ$ | 波束数字方向调整/ $^\circ$ |
|-------|------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 678 | 6 | 11 | 15 | 12 | - | +10 |
| 677 | 3 | 11 | 15 | 12 | - | -10 |
| 676 | 6 | 11 | 15 | 12 | - | -10 |
| 675 | 3 | 11 | 15 | 12 | - | +10 |

3.2.3 波束优化效果

按照设置方案修改功率、波束场景和波束数字方位角后进行测试,结果如下:

a) 覆盖电平有所降低,平均RSRP由 -75.3 dBm降低为 -84.6 dBm,覆盖情况仍为良好。在满足机场3F覆盖需求前提下,通过降低覆盖电平可以减少室内5G AAU覆盖到机场外导致的越区覆盖范围。

b) 覆盖质量:平均SINR有所提升,平均SINR由 5.2 dB提升至 11.4 dB,下行干扰降低,网络质量提升。

c) 覆盖范围更规整,各小区按规划范围覆盖,减少小区之间的重叠覆盖。

d) 感知速率有所提升,下行平均速率由 749 Mbit/s提升至 826 Mbit/s,5G网络性能提升。

由以上对比可知,除了降低功率导致信号覆盖强度降低外,网络质量、小区覆盖范围以及用户感知速率都有不同程度的提升,波束优化效果明显。

4 总结

5G网络初期应用主要为eMBB类业务,而为了提高5G上下行速率就需提升目标区域覆盖、降低小区间干扰。5G波束优化是波束赋形技术的应用,根据实际场景覆盖需求,灵活配置不同垂直、水平波瓣的场景方案,以及进行方位角、下倾角的远程调整。垂直方向的波束优化为传统宏站无法覆盖高层楼宇的难题提供了解决方案,5G AAU高层波束覆盖场景可以替代部分传统高层室分建设,为运营商节约室分建设成本。同时,5G波束优化不仅可以为5G网络规划提供多样的选择方案,还可以方便后期进行远程优化调整,节省塔工调整等方面劳动力。

5G网络发展迅速,随着5G基站密度越来越大,降低小区间干扰问题尤为重要。5G网络2B市场应用,确保网络的覆盖和灵活优化逐渐成为常态化,5G波束优化提供了一种方便且高效的方法,在网络优化中起到重要的作用。

参考文献:

- [1] 杨清凌. 用于5G终端的毫米波多波束天线[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [2] 董梦曦. 基于波束赋形的信号处理和接入方式的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2017.
- [3] 芦滨雁. 未来5G系统中基于3D-MIMO的波束赋形技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [4] 徐春龙. 大规模MIMO波束赋形技术与性能分析[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [5] 王晟劼. 基于5G大规模阵列天线波束指向精度的研究[J]. 通讯世界,2017(12).

作者简介:

蔡明兴,助理工程师,学士,主要从事移动网络优化相关工作;林婉婷,助理工程师,硕士,主要从事移网工程优化工作;陈刚,高级工程师,硕士,主要从事移动网络规划和应用研究工作;梁彭韦,学士,主要从事网络测试和优化工作;张永杰,助理工程师,学士,主要从事移网投诉处理优化工作;吴文韵,助理工程师,学士,主要从事移网系统优化相关工作。