

# 5G Massive MIMO 的优化思路探讨

## Discussion on 5G Massive MIMO Optimization

许国平,王 勇(中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033)

Xu Guoping, Wang Yong(China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

### 摘要:

首先重点介绍了5G Massive MIMO关键技术特征,然后分析了该技术与Pre-5G多天线技术的联系与区别。进一步给出了不同广播波束和业务波束配置条件下5G NR的覆盖能力与用户速率感知情况,最后再结合原理分析和测试结论,给出了5G Massive MIMO优化的主要思路,并针对后续优化工作面临的挑战提出了一些建议。

### 关键词:

5G; Massive MIMO; 网络优化; 干扰

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2020.01.001

文章编号: 1007-3043(2020)01-0001-05

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 key technology features of 5G Massive MIMO are focused on, then the relationship and difference between 5G Massive MIMO and Pre-5G Multi-antenna are analyzed. Furthermore, the 5G NR's coverage rate and download rate based the main kinds of broadcast beam pattern and traffic beam pattern are provided. At last, based on all given analyzations and experimental conclusions, the main optimization profiles of 5G Massive MIMO are brought out, and some suggestions about upcoming challenges are given.

### Keywords:

5G; Massive MIMO; Network optimization; Interference

**引用格式:** 许国平,王勇. 5G Massive MIMO的优化思路探讨[J]. 邮电设计技术, 2020(1): 1-5.

## 1 Massive MIMO的产生背景与影响

不断提高空中接口吞吐率是移动通信无线技术发展的动力和目标。5G下行峰值速率将达到20 Gbit/s,下行用户体验速率将达到100 Mbit/s,并且需要提供相对于LTE 20倍的小区容量和十分之一的空口时延。为了解决5G在峰值速率以及系统容量方面的挑战,需要从各个方面对技术进行增强,而Massive MIMO就是其中的关键技术之一,它使用大规模阵列天线,增强了空间维度的解析能力和使用效率。与传统的天线

相比,Massive MIMO的优势主要体现在以下3个方面。

a) 通信容量提升。Massive MIMO具备波束空间复用的特性,充分利用空分的维度降低了不同终端之间的信道相关性,增强了多用户MIMO技术,极大地提升了频谱效率。下行通过MU-BF(Multi-user beamforming)技术,将多个用户进行并发配对。和LTE的8T8R相比,理论容量可以提升5~8倍;上行通过MU-MIMO技术,将多个用户进行配对调度,和8T8R相比,理论容量可以提升4~6倍。

b) 覆盖能力提升。5G使用毫米波等高频频段进行部署。在高频场景下,无线电波衍射能力下降,穿透损耗大大增加,而Massive MIMO能够生成高增益、可

收稿日期: 2019-11-08

调节的赋形波束,从而明显改善信号覆盖。在5G通信中,广播信道采用窄波束发射,广播波束赋形是5G相对于4G的一个重大改变,通过多个窄波束取代原有的宽波束,可以很好地增强广播信道的覆盖能力。在同等水平波宽的情况下,8T8R垂直波宽为 $6.5^\circ$ ,Massive MIMO可以定制垂直波宽,最大垂直波宽达 $35^\circ$ ,波宽提升5.3倍,高楼覆盖水平可以提升9~15 dB。图1表述了Massive MIMO与4G系统的8T8R垂直覆盖能力的差异。

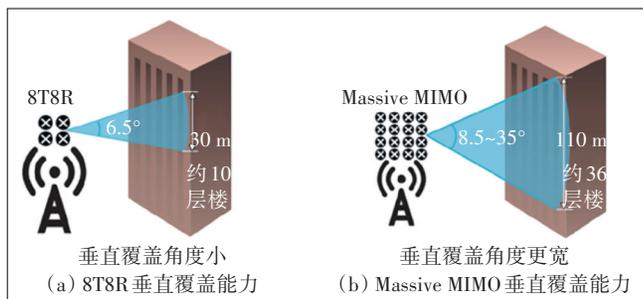


图1 Massive MIMO与4G系统的8T8R垂直覆盖能力

c) 抗干扰能力提升。自适应三维波束赋形可以有效对抗下行干扰。4G系统的波束赋形,波束只能在水平方向跟随目标终端调整方向,开通3D-BF(三维波束赋形)特性后,窄波束在水平方向和垂直方向都能随着目标终端的位置进行调整,始终对准目标终端,从而使目标终端获得更好的覆盖,且波束较窄,可以降低干扰。同时,上行波束跟踪可以降低上行干扰。在UE移动过程中,根据下行广播波束的变化,gNB可以同时调整上行的波束,实现上行波束跟踪,可以有效降低上行干扰。

## 2 Massive MIMO的关键技术流程

Massive MIMO相对于传统MIMO能够有效提升性能的硬件基础就是大规模阵列天线。其主要原理是基于相控阵天线,相控阵天线通过控制阵列天线中辐射单元的馈电线位来改变方向图形状,其突出优点是增益高,能够准确控制波束方向,波束无惯性,并且能够在覆盖范围内同时跟踪多个用户。下面讨论一下Massive MIMO的2个关键技术。

### 2.1 波束赋形

射频信号经过基站加权后,形成了指向终端的窄波束,这就是波束赋形(简称BF)。NR Sub6G多天线下行各信道默认支持自适应三维波束赋形,窄波束在水平方向和垂直方向都能随着目标终端的位置进行

调整以形成更窄的波束,精准地指向用户,提升覆盖性能。

波束赋形的关键流程中,首先考虑自由空间中电磁波的远场辐射情况。如果能够根据信道条件适当地控制每个阵元的加权系数,就能在增强期望方向信号强度的同时,尽可能降低对非期望方向的干扰。从原理上分析,阵元的数量越多,波束的方向性就能做到越精确。

权值计算是5G Massive MIMO充分发挥作用的关键步骤,是指gNodeB基于下行信道特征计算出一个向量,用于改变波束形状和方向。计算权值的关键输入是下行信道特征,有2种不同的获取下行信道特征的方法。

a) gNodeB通过获取UE上行信道的探测参考信号(SRS),根据互易性原理计算出对应下行信道的特征并计算Massive MIMO的权值。

b) gNodeB基于UE上行反馈的预编码矩阵指示(PMI)选择最佳的权值。

相对于SRS赋权,PMI赋权可以提升小区边缘的权值计算准确性,进而提升边缘用户的速率,后续测试分析也会进一步验证这一结论。

加权是指gNodeB计算出权值后,将权值与待发射的数据进行矢量相乘,从而达到调整波束的宽度和方向的目的。

Massive MIMO天线波束分为静态波束和动态波束,基于SRS加权或PMI加权获得的波束一般称为动态波束。SS Block及PDCCH中小区级数据,CSI-RS采用小区级静态波束和时分扫描的方式;PDSCH中用户数据采用用户级动态波束,根据用户的信道环境实时赋形。依据SRS或者PMI对5G Massive MIMO进行赋权的流程如图2所示。

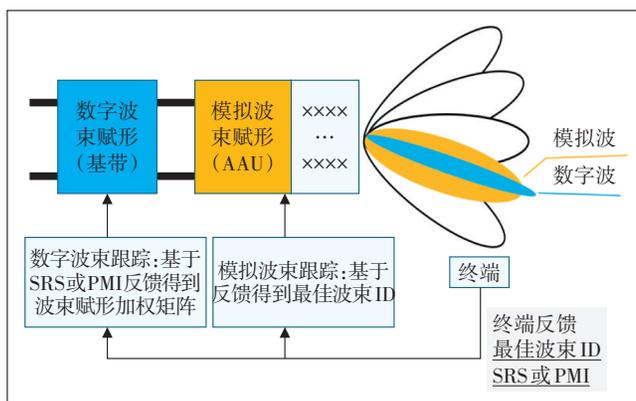


图2 依据SRS或者PMI对5G Massive MIMO进行赋权的流程

## 2.2 多流传输

Massive MIMO 技术的关键技术除了波束赋形外,为了提高用户传输速率,多流传输技术也必不可少。

a) 下行用户多流传输。Massive MIMO 技术支持单用户在下行同时支持多流数据传输,单用户最大下行数据流数取决于 gNodeB 发射天线数和终端接收天线数中的相对较小值。如图 3 所示,单用户下行在 gNodeB 64T64R 的情况下,2T4R 的 UE 下行最大可同时支持 4 流的数据传输。

b) 上行用户多流传输。Massive MIMO 技术支持

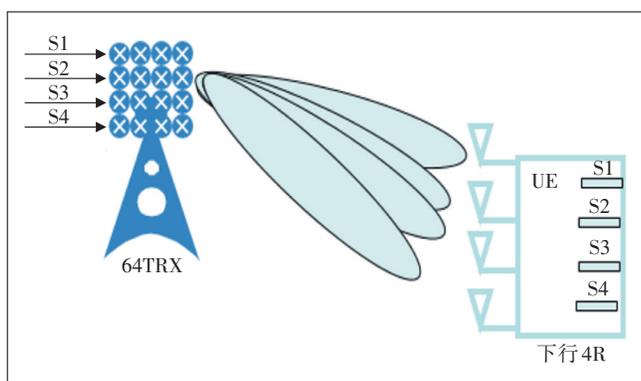


图3 单用户下行多流示意图

单用户在上行同时支持多流数据传输,单用户最大上行数据流数取决于 gNodeB 接收天线数和 UE 发射天线数中的相对较小值。如图 4 所示,单用户上行在 gNodeB 64T64R 的情况下,2T4R 的 UE 上行最大可同时支持 2 流的数据传输。

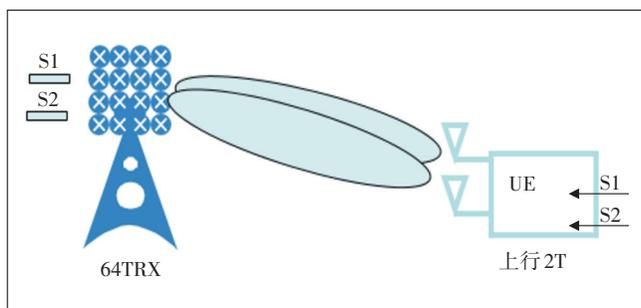


图4 单用户上行多流示意图

## 3 Pre-5G 多天线与 5G Massive MIMO 的区别

本文中的 Pre-5G 多天线技术主要是指 LTE FDD、TD-LTE 系统中应用的多天线技术,比如 TD-LTE 部署的 8T8R 技术,以及在部分城市得到部署的 LTE FDD 的 16T16R 或者 32T32R 技术。后续将对 Pre-5G 多

天线与 5G Massive MIMO 的联系与区别,以更好地理解多天线技术的特点,为将要研讨的测试分析和优化思路提供参考。

### 3.1 5G NR 与 LTE 广播机制的异同点

4G 广播信道无完备的波束赋形方案,在普通覆盖场景,广播信道覆盖弱于业务信道,未能充分发挥 MIMO 天线的增益。在高楼覆盖场景,水平面无法完全覆盖一个小区。

5G NR 改进了 LTE 时期基于宽波束的广播机制,采用窄波束轮询扫描覆盖整个小区的机制。SSB 的时频配置相当灵活,即可以通过波束协调来配置各小区 SSB 时频域位置保持相同,也可以设置各小区 SSB 随机发送,同时针对不同的覆盖场景也可以采用不同的波束数。因此可以根据不同场景配置不同的广播波束,以匹配多种多样的覆盖场景,比如楼宇场景、广场场景等。

### 3.2 5G NR 与 LTE 覆盖评价的异同点

4G 网络覆盖标准可以使用类似邻区 50% 负荷下小区特定参考信号接收功率(CRS-RSRP)、小区特定参考信号信干噪比(CRS-SINR)达到一定水平来衡量。而 5G NR 定义了辅同步信号(SSS)/信道质量指示参考信号(CSI-RS)替代了小区特定参考信号(CRS),但是 CSI-RSCP/CSI-SINR 只有连接态才可以得到,于是可考虑采用 SSS 评价 5G 覆盖。需要注意的是 SSB 时域和频域配置会影响 SINR,广播波束数会影响 RSRP,因此还需要进一步验证覆盖的评价方式和产生的影响。

### 3.3 5G NR 并发流数远高于 4G

LTE TM9 的解调参考信号(DMRS)端口数为 8,5G NR 的 DMRS 端口数增加到 32,用于控制信道和数据信道的相关解调。5G NR 的 DMRS 正交端口数远多于 LTE,小区支持单用户或者多用户的 MIMO,可实现下行 24 流、上行 12 流。

### 3.4 5G 借助 Massive MIMO 有效降低干扰

前文已经介绍,5G Massive MIMO 具有较多的天线单元,为干扰控制提供更多选择,从而实现更好效果。5G Massive MIMO 引入更多天线阵子,阵子数越多,波束越窄,可实现水平方向和垂直方向 2 个维度针对用户的精准跟踪,降低来自其他用户的干扰。NR 下行控制信道通过时域/频域的灵活配置,降低干扰;上行多通道相比 LTE 8T8R 的抗干扰能力也有所提升。表 1 是 LTE 和 NR 各个信道的波束配置对比情况,可以看到 NR 的波束扫描和赋形已经应用到了多数信道。

表1 LTE和NR各个信道的波束配置对比

信道	LTE	NR
CRS	宽波束、全频带	无
PBCH	宽波束	可波束扫描,可频分、时分
公共业务信道	宽波束	可波束扫描
公共控制信道	宽波束、全频带	波束扫描/赋形、可频分
业务信道	宽波束+波束赋形	波束赋形

## 4 广播波束配置及小区性能分析

### 4.1 系统配置与场景设计

下面将结合具体测试结果,分析广播波束的部署与优化原则。测试中5G系统的关键配置信息如表2所示。

表2 5G测试配置情况

基站类型	频点号	天线配置	RS/通道发射功率/dBm	测试终端
NR	636666 (N78频段, 5 GHz)	64T64R, Massive MIMO	34.9	5G CPE, 2T4R

考虑到Massive MIMO具备场景化立体波束的覆盖能力,设计水平方向覆盖能力验证和垂直方向覆盖能力验证2种场景:水平方向覆盖能力从近乎垂直的2条道路进行路测分析;垂直方向覆盖能力选取5G小区覆盖范围内一栋居民楼的12层进行验证分析。

### 4.2 测试结果与分析

表3为选取几种主要的波束配置条件下,水平方向路面测试的情况。

表4为几种典型波束配置情况下,在居民楼高层位置测试的结果。

对表3和表4的数据进行综合分析,可以得到以下部署和优化经验。

a) 波束配置1的特点是远点增益较高,可以同时保证近点和远点用户的较好性能,比较适合城区室外连续覆盖组网的需求。

b) 波束配置2的特点是水平覆盖范围有限,远点

的覆盖性能较差;但是该配置的系统开销较低,用户近点下行峰值速率较高,适合于精准覆盖感知需求较高的竞争力区域。

c) 波束配置3的特点是垂直面提供了较好的覆盖能力,但是水平波束增益下降。规划阶段不宜使用,建议作为优化手段使用,适合于城镇环境水平和垂直都有覆盖需求的场景。

d) 波束配置4的特点是水平面提供了更远的覆盖能力;相对于配置1,垂直面波束宽度更窄,提高了单波束增益。适用于远点覆盖要求较高的场景,建议作为水平方向覆盖的优化技术手段使用。

e) 波束配置5的特点是水平覆盖范围较小,但垂直覆盖范围更大。适用于水平方向没有很大角度扩展要求,但是垂直面有较大角度扩展要求的场景,建议作为垂直方向覆盖的优化技术手段使用。

f) 波束配置6的特点是水平方向波束较窄,强调增强水平方向的远距离覆盖能力以及增强垂直方向大角度扩展的覆盖能力。适用于高层写字楼或者是居民楼的深度覆盖场景。

## 5 业务波束配置及小区性能分析

### 5.1 系统配置方案

Massive MIMO可以选择对业务信道的波束进行动态赋权,也可以选择固定基于SRS赋权或者固定使用PMI赋权。

动态赋权的技术实现方案是,当用户上行SNR较大时,基于SRS计算波束赋形的权值;在SNR较小时,基于PMI计算波束赋形的权值。相对于SRS赋权,远点基于PMI赋权可以提升权值准确性,进而提升边缘用户的速率。如图5所示,SRS SNR大于 $Th_{SRS}$ ,基于SRS赋权;SRS SNR小于 $Th_{PMI}$ ,基于PMI赋权。当用户的SRS SNR在 $Th_{SRS}$ 和 $Th_{PMI}$ 之间时,该用户权值保持不变。各个阈值发生作用的区间如图5所示。

### 5.2 测试结果与分析

表3 不同广播波束配置条件下水平方向路面性能

波束配置	水平扫描范围	水平面波束个数	垂直面扫描范围	垂直面波束个数	近点下行峰值速率/(Mbit/s)	近点覆盖性能	远点下行峰值速率/(Mbit/s)	远点覆盖性能
1	105°	7+1	6°	2	350	良好	150	良好
2	65°	1	6°	1	450	良好	150	较差
3	110°	8	25°	1	350	良好	100	较差
4	110°	8	6°	1	350	良好	150	良好
5	65°	6	25°	1	350	良好	100	较差
6	25°	2	25°	4	350	较差	150	较差

表4 不同广播波束配置条件下垂直方向覆盖情况

波束配置	SSB RSRP(均值)/dBm	SSB SINR/dB	波束 ID
1	-107	14	2
3	-97	27	2
4	-110	13	2
6	-98	24	7

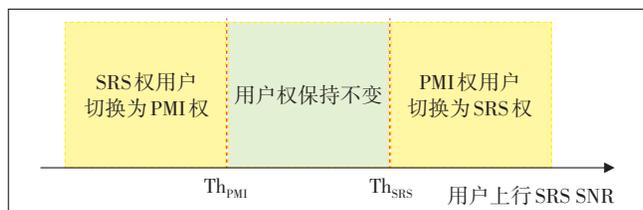


图5 Massive MIMO 动态赋权阈值示意图

由表5所示测试结果结合系统原理,可以得到以下结论。

a) 固定使用 PMI 赋权的特点是小区近点及远点覆盖性能均为良好,但是同时覆盖半径比场景1要大,说明垂直方向的增益比场景1高,适用于高楼覆盖场景。

b) 固定使用 SRS 赋权的特点是近端用户体验较好,远端用户体验较差,业务动态波束覆盖范围受限。

c) 自适应动态赋权的特点是小区近点及远点覆盖性能良好,覆盖半径较长,业务速率保持平稳,可以保证较好的用户体验。

表5 不同业务波束配置条件下水平方向路面性能

配置方案	近点下行峰值速率/(Mbit/s)	近点覆盖性能	远点下行峰值速率/(Mbit/s)	远点覆盖性能
固定使用 PMI 赋权	350	良好	200	良好
固定使用 SRS 赋权	600	良好	150	较差
自适应动态赋权	350	良好	160	良好

## 6 总结与展望

经过上文的原理分析和测试验证,可以看到 Massive MIMO 为 5G 无线覆盖优化工作提供了更多的手段,解决弱覆盖更灵活、窄波束抗干扰能力强、容量能力较强,极大提升了频谱效率,但是新技术也为 5G 的网络优化工作带来了更多挑战。

a) 立体覆盖,优化调整更复杂。5G Massive MIMO 组网后,小区覆盖范围从二维增加到三维,邻区关系、切换/重选参数、互操作参数、负载均衡参数等均需考虑垂直覆盖区域。

b) 天线权值优化更复杂。5G Massive MIMO 通过

灵活的权值设计和自适应调整,可实现波束扫描个数和天线方向图的调整。相较 4G,5G 的权值灵活度更高,但是也增加了调整难度,这不仅体现在变化组合更多,需要更多研究和验证,也体现在如何提高权值匹配的实时性方面。

后续工作中为充分发挥 Massive MIMO 的性能优势,可以考虑通过波达方向(DOA)的用户分布统计评估、确定用户集中的位置,然后通过现场射频或后台权值优化调整,使有源天线单元(AAU)对准用户集中方向,提升用户感知。可进一步考虑结合自动迭代优化+人工智能的优化方案匹配方式实现 5G Massive MIMO 的权值与用户分布及感知的最佳匹配。

### 参考文献:

- [1] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F, et al. Massive MIMO for next generation wireless Systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2013(2): 186-195.
- [2] BJÖRNSON E, LARSSON E G, Marzetta T L. Massive MIMO: ten myths and one critical question[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 114-123.
- [3] MARZETTA T L, LARSSON E G, HONG Y, et al. Fundamentals of massive MIMO[C]//IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2016.
- [4] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9): 56-62.
- [5] JUNGnickel V, MANOLAKIS K, ZIRWAS W, et al. The role of Small Cells, Coordinated Multipoint, and Massive MIMO in 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 44-51.
- [6] BJÖRNSON E, LARSSON E G, DEBBAH M. Massive MIMO for Maximal Spectral Efficiency: How Many Users and Pilots Should Be Allocated? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 15(2): 1293-1308.
- [7] YANG G, HO C K, ZHANG R, et al. Throughput Optimization for Massive MIMO Systems Powered by Wireless Energy Transfer [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(8): 1640-1650.

### 作者简介:

许国平,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要从事无线优化工作;王勇,毕业于北京大学,高级工程师,硕士,主要从事移动网络优化工作。

