



专题：5G 组网与 6G 展望

5G 增强移动宽带关键技术性能研究

朱龙昶, 纪晓东, 张欣然, 李取鑫
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 5G 增强移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB) 场景对于频谱效率、系统容量提出了较高要求。传统技术无法带来相应的性能提升, 拟引入大规模天线、毫米波通信等技术, 结合应用异构网络, 提高系统性能。同时, 目前针对 eMBB 场景关键技术的仿真评估较少, 无法从仿真的角度说明各项技术的性能优势。通过搭建系统级仿真平台, 评估了不同天线数目下大规模天线的性能, 并根据异构网络下的仿真结果, 总结了工作在毫米波频段的微基站密度与接入偏移对系统性能的影响, 对 5G 网络的参数配置和网络建设都具有很大的参考价值。

关键词: 5G; eMBB; 大规模天线; 毫米波; 异构网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020003

Performance evaluation on key techniques for 5G enhanced mobile broadband

ZHU Longchang, JI Xiaodong, ZHANG Xinran, LI Quxin
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The 5G eMBB scenario puts high requirements on performance such as spectrum efficiency and system capacity. It was proposed to introduce technologies such as massive MIMO and millimeter-wave communication, and combine heterogeneous networks to improve system performance, because traditional technologies cannot bring about corresponding performance improvement. At the same time, there are few simulation evaluation results for the key technologies of the eMBB scenario, and the performance advantages of each technology cannot be explained from the perspective of simulation. The performance of massive MIMO with different antenna numbers by building a system-level simulation platform were evaluated, and the impact of the density and bias of micro BS in the mmWave frequency to the performance based on the results in the heterogeneous networks was summarized. It has great reference value for parameter configuration and network construction of 5G network.

Key words: 5G, enhanced mobile broadband, massive MIMO, mmWave, heterogeneous network

1 引言

近年来, 第五代移动通信网络 (the 5th gen-

eration network, 5G) 作为新一代的移动网络技术, 逐渐成为了行业内研究的热点, eMBB 场景是 5G 的 3 个主要应用场景之一^[1], 被第三代合作伙伴



计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 列为其新服务和市场技术推动者研究项目的关键部分进行研究。

eMBB 主要面向超清视频、虚拟现实和增强现实、高速移动上网等大流量移动宽带应用业务, 具有带宽大、时延不敏感、动态突发性等特点, 与 LTE 系统相比, 接入速率要求提高了数十倍, 系统容量要求提高近百倍, 这对无线网络的性能提出了极大挑战^[2]。为了解决已有技术无法满足 eMBB 场景性能指标的问题, 需要引入毫米波、大规模天线等技术, 结合异构网络, 来实现这一性能提升。

大规模天线是指在基站端采用大规模天线阵列同时服务大量的终端, 与传统的多天线系统相比, 可以提供更高的谱效和能效, 并在高可靠性方面提供一定的支持^[3]。配置了大规模天线阵列的基站, 可以通过混合波束成形, 使多个天线元素朝着同一方向共同收发。混合波束成形过程首先进行数字波束成形, 形成一定数量的射频链, 然后进行模拟波束成形, 形成成形波束^[4]。采用了混合波束成形的基站不仅可以为服务用户提供更高的天线增益, 还可以通过预编码技术在多用户 MIMO (multiple-input multiple-output, 多入多出) 中支持为更多的用户同时服务, 相较于传统系统, 具有高效能、高谱效的优点^[5]。但由于混合波束成形需要对大量的天线元素与射频链进行预编码操作, 运算复杂度较高, 给其实现和仿真带来了极大的挑战。

毫米波技术可以有效地增加带宽, 从而成倍地提高用户体验速率。毫米波频段为 30~300 GHz, 相应波长为 1~10 mm, 与微波相比, 带宽更大、方向性更强, 能够为用户带来更高的体验速率, 极大地缓解频谱资源紧张的现状^[6]。同时, 毫米波波长较短, 在大规模天线中结合毫米波技术, 可以有效地减小天线元素的体积。然而, 在毫米波频段进行通信时, 会带来极高的路径损耗, 因

此毫米波很难支持基站与距离较远的用户进行高速率的信息传输, 且由于毫米波的穿透能力差, 在非视距传播以及恶劣天气条件下, 其性能会受到很大影响^[3]。

3GPP、ITU 等组织对 eMBB 场景的标准化工作做出了极大的贡献。3GPP 对大规模天线的天线面板进行了建模, 2016 年 11 月 17 日, 中国公司主推的极化码方案成为 eMBB 场景控制信道编码的最终方案。同时, ITU 开展了自评估工作, 针对 eMBB 场景下的系统频谱效率、边缘用户频谱效率、峰值速率等提出了相应的要求。其中, 在室内热点、密集城区、乡村场景中, 基站端配备 128 根天线, 可以支持系统频谱效率分别超过 9 bit/(s·Hz)、7.8 bit/(s·Hz)、3.3 bit/(s·Hz), 边缘用户频谱效率分别超过 0.3 bit/(s·Hz)、0.225 bit/(s·Hz)、0.12 bit/(s·Hz)。而根据实物仿真的结果, 单用户 MIMO 小区平均速率可达 18.9 Gbit/s^[7]。针对毫米波技术, 3GPP 在 TR38.900 V14.3.1 中, 给出了毫米波频段的信道模型, 并给出了链路级仿真和系统级仿真的校准方案与结果。除此之外, 各标准化组织对 5G eMBB 场景的用户接入策略、移动性管理、调度与反馈设计、上行功率分配等方面, 均进行了研究。

本文针对 5G eMBB 场景中大规模 MIMO 技术和毫米波技术对小区频谱效率与覆盖性能的影响进行研究, 主要贡献包括: 通过搭建 5G eMBB 场景的系统级仿真平台, 从系统级的角度对网络覆盖以及频谱效率进行了分析; 综合评估了大规模天线技术对系统性能的增益以及微基站的部署密度和接入偏移对网络覆盖与频谱效率的影响; 给出了 eMBB 场景下, 微基站密度、接入偏移的优化配置方案, 为 5G eMBB 场景的实际部署提供了建议。

2 系统模型

2.1 拓扑结构

增强移动宽带场景单层蜂窝网络拓扑结构如

图1所示。利用OPNET仿真工具搭建5G增强移动宽带系统级仿真平台,其中宏基站布置在小区中心,用户在小区内均匀分布,各节点高度按照相关标准^[3]进行分布。基站天线为指向天线,天线指向同样由参考文献^[3]相关标准确定。用户选择参考信号接收功率最高的基站接入作为其服务基站。

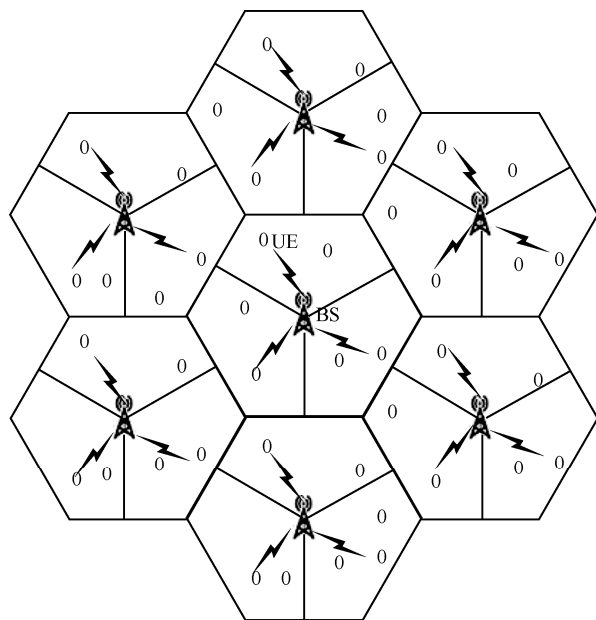


图1 单层蜂窝网络拓扑结构

为了进一步满足增强移动宽带场景的性能要求,需要考虑引入异构网络,通过工作在低频段的宏基站与多个工作在毫米波频段的微基站来增强网络覆盖性能与用户的体验速率。由于微基站发射功率较小,为了防止宏基站负载过大,同时使更多的用户接入微基站,可以在用户接入时为微基站设置接入偏移量。同时为了避免与宏基站之间的同频干扰,设置宏基站与微基站工作在不同频段。

低频段(3.5 GHz)与高频段(30 GHz)下5%边缘用户频谱效率的对比见表1,小区半径为288 m,可以看到,当载波频率由3.5 GHz变为30 GHz时,边缘用户频谱效率下降非常明显,接近0。这意味着,在30 GHz载频下,基站已经无法有效覆盖到半径288 m的蜂窝小区。因此,可

以设置宏基站工作在低频段来提供有效的覆盖,而微基站工作在毫米波频段,来满足区域热点高速率的通信要求。

表1 不同频段下边缘用户频谱效率对比

载波频率	5%边缘用户频谱效率
3.5 GHz	0.40 bit/(s·Hz)
30 GHz	0.000 1 bit/(s·Hz)

本文采用两层蜂窝异构网络,单个蜂窝小区的拓扑结构如图2所示,微小区热点中心在小区内均匀分布,微小区用户在热点范围内均匀分布,微基站布置在热点边缘,配置指向天线,方向指向热点中心。在仿真中,对不同的微基站部署密度和接入偏移下的系统性能进行评估,结合仿真结果,总结工作在毫米波频段的微基站的密度与接入偏移对系统性能的影响,并给出组网优化建议。

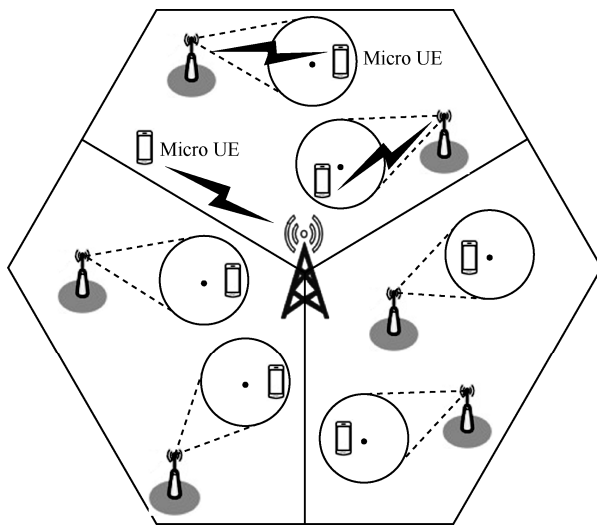


图2 两层蜂窝异构小区拓扑示意图

2.2 传播模型

本文中,假设信道模型为3D空间信道模型,路径损耗模型、穿透损耗以及阴影衰落,均为影响无线信号传播的重要因素。在毫米波频段下,载波频率为30~300 GHz,由于载频的提高,大尺度衰落与低频段通信相比也会更高。

路径损耗是无线信号在空间传播所产生的损



耗,是由发射功率的辐射扩散及信道的传播特性造成的,城市街区场景和密集城区场景、视距传播和非视距传播时的路径损耗模型均有所区别^[8],在城市街区场景视距传播时,路径损耗模型如式(1)所示:

$$PL_{\text{UMa-LOS}} = \begin{cases} 28.0 + 22\lg d_{3D} + 20\lg f_c, 10 \text{ m} \leq d_{2D} \leq d'_{\text{BP}} \\ 28.0 + 40\lg d_{3D} + 20\lg f_c \\ -9\lg(d'_{\text{BP}}{}^2 + (h_{\text{BS}} - h_{\text{UT}})^2), d'_{\text{BP}} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

其中, d'_{BP} 由参考文献[8]给出。

穿透损耗是无线信号穿过建筑物时信号的衰减,其数值与建筑物的结构有关,具体由 4 部分组成,如式(2)所示:

$$PL = PL_{\text{out}} + PL_{\text{tw}} + PL_{\text{in}} + N(0, \sigma_P^2) \quad (2)$$

其中,各部分的具体计算由参考文献[8]给出。

地理条件、建筑类型、车辆或其他基础设施障碍等地理、结构和环境特征的变化会影响基站与用户之间的信号传播,从而导致路径损耗偏离平均值,这种效应被称为阴影衰落。阴影衰落的大小与距离有关,相邻的衰落值之间具有一定的相关性。在仿真平台中,阴影衰落被建模为对数正态分布,其均值 μ 和标准差 σ 由参考文献[8]给出。

2.3 大规模天线建模

本文中的大规模天线阵列采用如图 3 所示的 2D 有源天线阵列,每个天线阵列包含 $M_g \times N_g$ 个天线面板,天线面板的水平 and 垂直间距由 $d_{g,H}$ 、 $d_{g,V}$ 表示;每个天线面板包含 $M \times N$ 个天线元素,天线元素的水平和垂直间距由 d_H 、 d_V 表示; P 表示每个天线的极化方式, $P=1$ 表示单极化, $P=2$ 表示双极化。

基于图 4 所示的天线模型进行波束成形,各个天线原件均位于 yOz 平面,具有固定的间隔距离和相同的辐射方向图。 xOy 平面表示水平面,信号方向的俯仰角表示为 θ_{beam} (限定在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间),方位角表示为 φ_{beam} (限定在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间)。

在实际系统中,基站动态调整波束成形配置,以达到最优的系统性能。为了简化过程,系统级仿真平台中采用静态波束成形,根据天线面板的配置确定波束成形的具体指向^[9],并分别进行数字波束成形和模拟波束成形过程。在数字波束成形过程中,基站端采用 SVD 预编码,用户端采用 MMSE 接收机,根据参考文献[10]确定数字预编码增益。之后,根据参考文献[11],计算各个用户的模拟波束成形增益。最终大规模天线增益为数字波束成形增益与模拟波束成形增益之和。

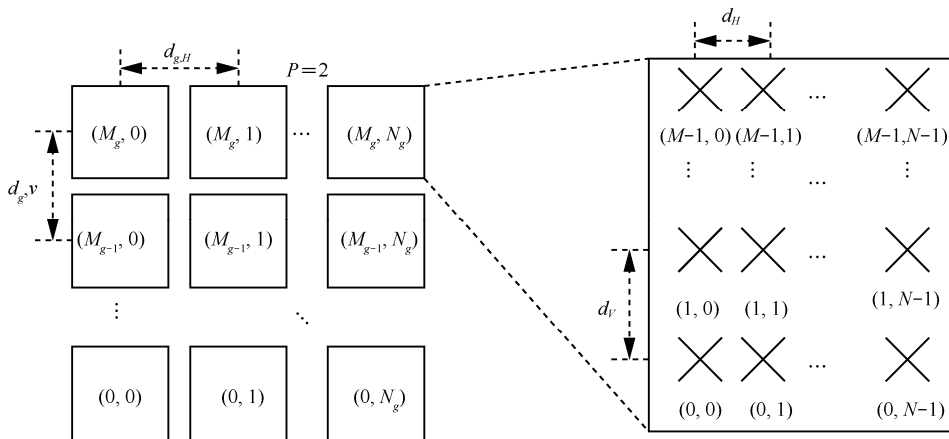


图 3 2D 有源天线阵列示意图

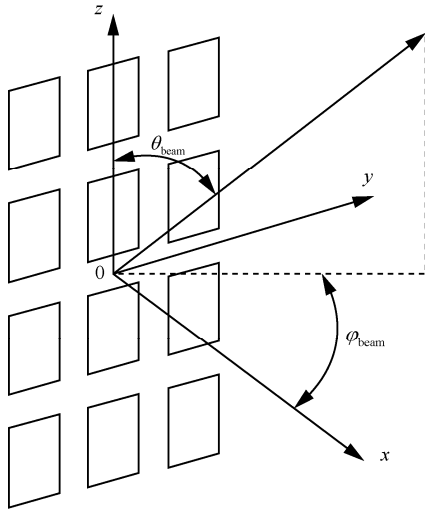


图4 大规模天线波束成形示意图

用户 k 的接收 SINR 如式 (3) 所示:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_T L_{i,k} G_{k,i,A}(\theta, \varphi, \theta_{\text{beam}}, \varphi_{\text{beam}}) G_{k,i,D}}{\sum_{j \neq i} P_T L_{j,k} G_{k,j,A}(\theta, \varphi, \theta_{\text{beam}}, \varphi_{\text{beam}}) G_{k,j,D} + N_0} \quad (3)$$

其中, P_T 为基站的发射功率, $L_{i,k}$ 为用户 k 的服务基站 i 与用户 k 之间信道的路径损耗, $L_{j,k}$ 为用户 k 的干扰基站 j 与用户 k 之间信道的路径损耗, $G_{k,i,A}(\theta, \varphi, \theta_{\text{beam}}, \varphi_{\text{beam}})$ 为基站 i 对用户 k 的模拟波束成形增益, θ 、 φ 分别为基站与用户的垂直、水平夹角, θ_{beam} 、 φ_{beam} 分别为波束的俯仰角和指向角, $G_{k,i,D}$ 为基站 i 对用户 k 的数字波束成形增益, N_0 为高斯白噪声。

3 仿真与分析

在增强移动宽带场景中,大规模天线的天线配置、基站的工作频段以及微基站的密度和接入偏移,都会对系统的整体性能产生影响。基于对基站体积、成本的考量,天线数不能无限制地增加;在毫米波频段进行通信,可以占据更大的带宽,为用户提供更高的体验速率,但同时信道的大尺度衰落也更加严重;微基站密度过小,只有较小区域的用户可以接入微基站,无法明显提高系统容量,微基站密度过大,将

使各微基站间产生非常大的同频干扰,严重影响通信^[11];而过小的接入偏移将使宏基站负载较大,过大的接入偏移将使微基站负载较大,都会降低系统性能。

不合理的参数配置,无法充分发挥各项关键技术优势,因此通过仿真来评估各项技术对频谱效率以及边缘用户频谱效率的影响,是非常有必要的。在仿真中统计各基站(共19个)的频谱效率,然后计算各个基站频谱效率的平均值,作为统计量,边缘用户频谱效率取小区5%边缘处用户的频谱效率。

3.1 大规模天线性能评估

在 eMBB 同构场景中,通过改变宏基站的天线个数,研究大规模天线技术对基站频谱效率的影响,仿真假设见表2。

表2 仿真参数

仿真参数	参考取值
基站间距	200 m (密集城区)、500 m (城市街区)
载波频率	3.5 GHz
仿真带宽	100 MHz
基站发射功率	44 dBm (密集城区)、49 dBm (城市街区)
基站天线高度	25 m
单基站用户数	10 个
用户天线数	4 根
MIMO 模式	单用户 MIMO, 最高支持 8 流传输
调度方式	轮询调度
业务模型	Full Buffer

城市街区和密集城区场景如图5所示,不同基站天线数下的基站频谱效率。配置了大规模天线的基站频谱效率获得了大幅提高,与 64×4 的收发天线配置相比, 128×4 的收发天线配置使基站平均频谱效率提高了 22.1%,但随着基站天线数的增加,大规模天线对于系统性能的增益逐渐减小, 256×4 的收发天线配置的基站频谱效率仅比 128×4 的天线配置提高了 5.8%。

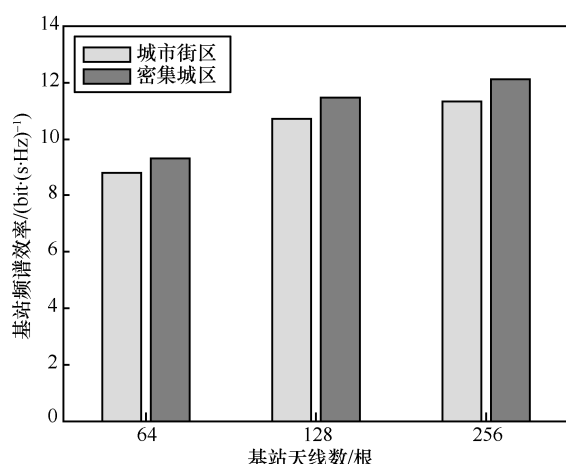


图5 不同天线配置下基站频谱效率

城市街区和密集城区场景下不同基站天线数下的边缘用户频谱效率如图6所示。与64×4的收发天线配置相比，128×4的收发天线配置使边缘用户频谱效率提高了63.1%，而256×4的收发天线配置的边缘用户频谱效率仅比128×4的天线配置提高了13.0%。

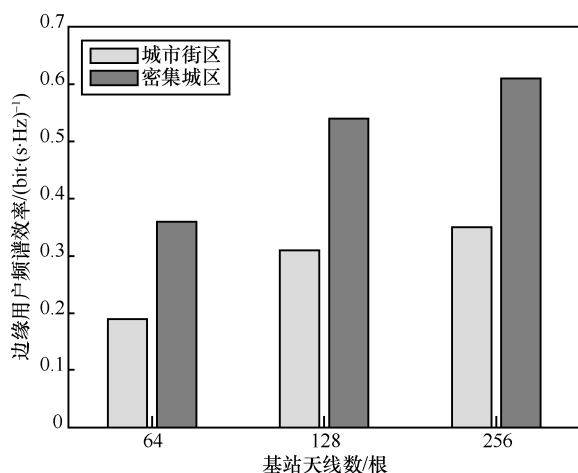


图6 不同天线配置下边缘用户频谱效率

不同基站天线数下的用户SINR的CDF分布如图7所示，可以看出，当基站天线数由64根增加到128根时，用户的SINR最大增加了约5 dB，而当基站天线数由128根增加到256根时，用户的SINR只增加了约1 dB，这与图5、图6得出的结论相吻合。

随着基站天线数的增加，小区平均频谱效率

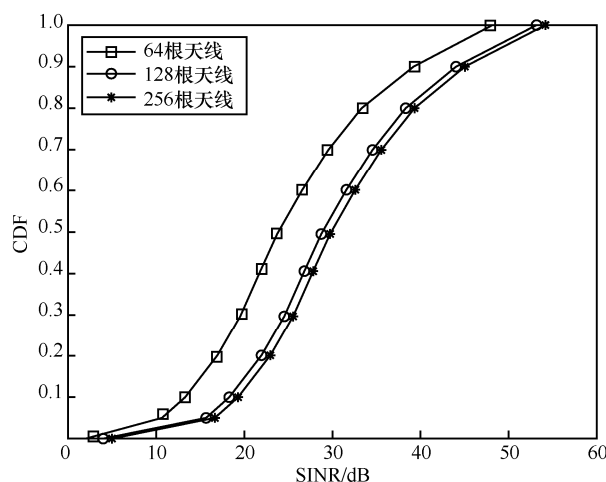


图7 不同天线配置下用户SINR的CDF

和边缘用户频谱效率也随之增大，但是增长的幅度越来越小。因此，在实际网络部署中，需要结合仿真结果，考量高性能与高成本之间的折中，选择最佳的基站天线配置方案。

3.2 异构网络性能评估

为了验证在小区中加入微基站对系统性能的影响以及微基站的最优配置，首先通过系统级仿真平台仿真了不同宏基站天线配置和微基站天线配置下基站平均频谱效率和边缘用户频谱效率；然后研究了在固定范围的仿真区域内，不同微基站密度和不同微基站接入偏移下，基站平均频谱效率和边缘用户频谱效率的变化趋势，得到了本文仿真参数下最优的微基站配置方案。具体的仿真参数配置见表3。

表3 仿真参数

仿真参数	参考取值
宏基站间距	200 m
载波频率	3.5 GHz（宏基站）、30 GHz（微基站）
仿真带宽	100 MHz
基站发射功率	44 dBm（宏基站）、33 dBm（微基站）
基站天线高度	25 m（宏基站）、10 m（微基站）
单基站用户数	10
MIMO 模式	单用户 MIMO，最高支持 8 流传输
调度方式	轮询调度
业务模型	Full Buffer

不同微基站密度和接入偏移下,微小区的总吞吐量如图 8 所示。在微基站密度固定的情况下,增大接入偏移将使微小区总吞吐量有所下降,而增大微基站密度可以显著增加微小区总吞吐量,在接入偏移为 0 dB 的情况下,单扇区微小区数由 1 个增加为 6 个,可以使微小区总吞吐量提高约 379%。

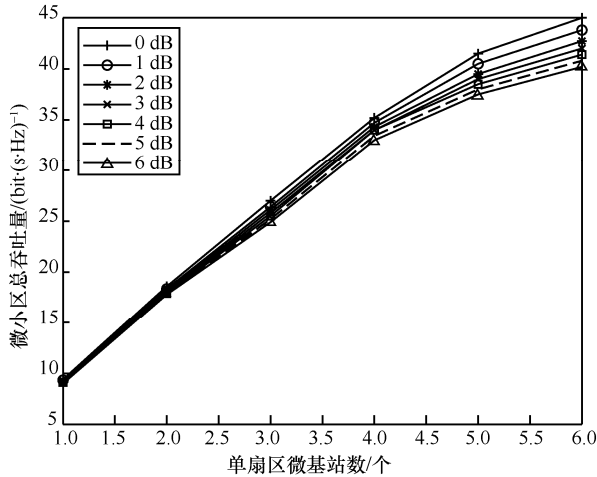


图 8 不同参数下微小区总吞吐量

不同微基站密度和接入偏移下,微基站的频谱效率和边缘用户的频谱效率分别如图 9 和图 10 所示。可以看出,随着微基站接入偏移的增大,微基站频谱效率下降,边缘用户频谱效率增加;随着单扇区微基站数目的增加,微基站频谱效率下降,边缘用户频谱效率先上升后下降。

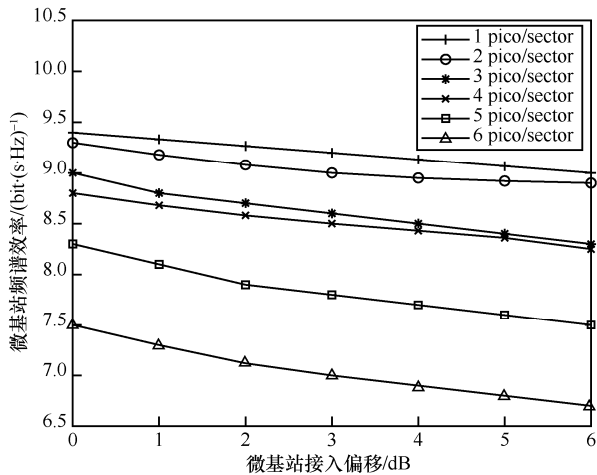


图 9 不同参数下微基站频谱效率

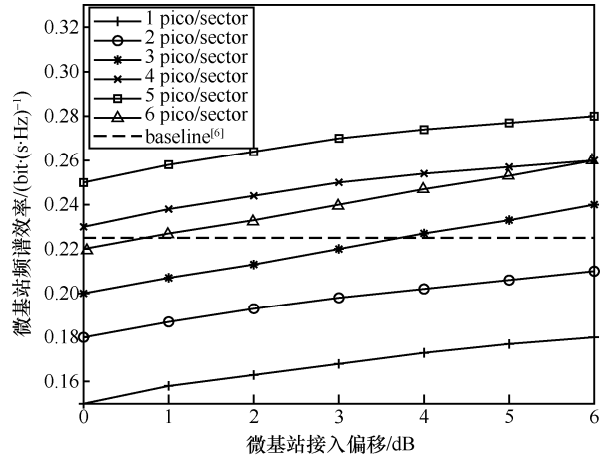


图 10 不同参数下边缘用户频谱效率

为了保证边缘用户的频谱效率,以参考文献[6]中,密集城区场景下边缘用户频谱效率 0.225 bit/(s·Hz) 作为基准数据,那么在表 3 所示的仿真参数配置下,单扇区配置 4 个微基站且不设置接入偏移,可以在保证边缘用户频谱效率达标的情况下,使系统总体性能最优。在实际网络规划中,可以根据具体的性能指标要求,参考仿真给出的不同配置下的系统性能,灵活制定 eMBB 场景中最优的异构网络组网配置方案。

4 结束语

本文研究了 5G 增强移动宽带场景下大规模 MIMO 技术和毫米波技术对系统性能的影响。从系统级仿真结果可以看出,在基站端配置大规模天线,可以大幅提高系统的频谱效率与覆盖性能,但是随着天线数目的增加,其增益有所下降。另一方面,在蜂窝异构网络中,布置工作在毫米波频段的微基站,并为其配置大规模天线阵列,能够有效地提高小区总吞吐量,但合理配置微基站密度与微基站接入偏移,对系统性能具有显著影响。通过本文给出的仿真结果,可以直观地看出不同天线配置和网络结构下的小区频谱效率和边缘用户频谱效率,能够给出不同的性能要求时的最优配置方案,不仅带来了很高的研究价值和经济效益,而且为 5G 网络规划与搭建提供了指导和建议。



参考文献:

- [1] 项弘禹, 肖扬文, 张贤, 等. 5G 边缘计算和网络切片技术[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 54-63.
XIANG H Y, XIAO Y W, ZHANG X, et al. Edge computing and network slicing technology in 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 54-63.
- [2] PENG M G, ZHANG K C. Recent advances in fog radio access networks: performance analysis and radio resource allocation[J]. IEEE Access, 2016(4): 5003-5009.
- [3] 贺子健, 艾元, 闫实, 等. 无人机通信网络的容量与覆盖性能[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 65-70.
HE Z J, AI Y, YAN S, et al. Performance evaluation of capacity and coverage in UAV communication networks[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 65-70.
- [4] KUUTY S, SEN D. Beamforming for millimeter wave communications: an inclusive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 949-973.
- [5] PENG M G, LIU H M, WANG W B, et al. Cooperative network coding with MIMO transmission in wireless decode-and-forward relay networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3577-3588.
- [6] 李瑛. 5G 多天线技术链路级仿真研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
LI Y. Research on link level simulation for multi-antenna technology in 5G[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [7] IMT-2020. 5G 无线技术试验进展及后续计划[Z]. 2016.
IMT-2020. 5G wireless technology test progress and follow-up plan[Z]. 2016.
- [8] 3GPP. Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz: TR 38.900 V14.3.1[S]. 2017.
- [9] 江甲沫, 王文博, 彭木根, 等. TD-HSUPA 系统双极化智能天线性能仿真研究[J]. 数据通信, 2010(6): 25-28.
JIANG J M, WANG W B, PENG M G, et al. Performance simulation of dual polarization smart antenna in TD-HSUPA system[J]. Data Communications, 2010(6): 25-28.
- [10] 韩镭. Massive MIMO 中矩阵 SVD 分解算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

HAN K. Research on matrix SVD decomposition algorithm in massive MIMO[D]. Chengdu: UESTC, 2016.

- [11] 彭木根, 艾元. 异构云无线接入网络: 原理、架构、技术和挑战[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 47-51.

PENG M G, AI Y. Heterogeneous cloud radio access networks: principle, architecture, techniques and challenges [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 47-51.

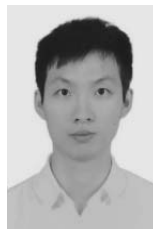
[作者简介]



朱龙昶 (1995-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



纪晓东 (1964-), 男, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为无线网络技术、移动 IP 技术。



张欣然 (1992-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士生, 主要研究方向为车联网和 5G 系统级仿真。



李取鑫 (1996-), 男, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。