

5G 高低频无线协作组网及关键技术

5G Multi-Bands Wireless Collaborative Networking and Its Key Technologies

赵军辉/ZHAO Junhui^{1,2}
杨丽华/YANG Lihua¹
张子扬/ZHANG Ziyang¹

(1. 北京交通大学, 北京 100044;
2. 华东交通大学, 江西 南昌 310013)
(1. Beijing Jiaotong University, Beijing
100044, China;
2. East China Jiaotong University,
Nanchang 310013, China)

5G 是面向 2020 年以后移动通信需求而发展的新一代移动通信系统, 其将从频谱效率、网络致密化和频谱扩展 3 个方面^[1]进行演化与发展。作为提升系统容量的一项关键技术, 网络致密化在现有异构网络架构的基础上, 通过低功率节点 (LPN) 的密集部署来提高系统的频谱效率, 改善热点地区的网络覆盖和传输速率^[2]。异构多层且能支持全频段接入的高低频无线协作组网是未来 5G 网络架构的必然发展趋势, 各个组织已就“低频段主要解决覆盖问题, 高频段主要用于提升流量密集区域的系统容量”达成共识。高低频无线协作组网主要是宏基站通过低频段实现整个区域内的基础覆盖, 低功率节点通过高频段承担热点覆盖和高速传输, 以此来满足未来 5G 网络更高数据流量、更快用户体验速率、海量终

收稿日期: 2018-02-08
网络出版日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61471031, 61661021); 国家科技重大专项 (2016ZX03001014-006); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助 (2017D14); 轨道交通控制与安全国家重点实验室开放课题基金资助 (RCS2017K009)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 03-0002-008

摘要: 作为第 5 代移动通信系统 (5G) 的一种重要组网方式, 基于控制用户分离的高低频无线协作组网在提升区域覆盖能力的同时, 还能大幅提升系统整体频谱效率, 为接入用户提供无缝高速体验。系统性地介绍了高低频无线协作组网的网络架构及其关键技术, 并深入探究无线回程、干扰协调、越区切换等关键技术的研究现状和未来的发展趋势。研究具有超高覆盖率和系统容量的高低频无线协作组网方案对于未来超密集组网的实现有着重要的理论意义。

关键词: 5G 网络架构; 接入网; 无线回程; 干扰协调; 越区切换

Abstract: As an important networking method of 5G, the multi-bands wireless collaborative networking based on the control user separation will improve the capability of regional coverage, and boost the spectrum efficiency of overall system. In this way, it can provide the high speed seamless experience for accessed users. In this paper, the network architecture and some key technologies of multi-bands wireless collaborative networking are introduced systematically, then the research status and future development trend of wireless backhaul, interference coordination, and handover are discussed. The research of multi-bands wireless collaborative networking with ultra coverage rate and system capacity has important theoretical significances for the realization of ultra dense network (UDN).

Keywords: 5G network architecture; access network; wireless backhaul; interference coordination; handover

端连接和更低时延的需求, 最终实现“信息随心至, 万物触手及”的愿景^[3]。

随着毫米波通信技术的兴起, 考虑到 LPN 大规模部署带来的移动性、可扩展性和灵活性等要求, 基于控制用户分离 (CUPS) 的高低频无线协作组网架构受到了研究人员的广泛关注。文献[4]中, 作者指出了传统网络在未来网络部署中的局限性, 同时介绍了 CUPS 的优势以及与其相关的一些标准化建议。软件定义网络 (SDN) 凭借其能解耦网络设备的控制/用户平面、提供逻辑上集中的网络视图和控制、有利于优化传输网络等优势被认为具有同 CUPS 整合使用的潜力^[5-7]。文献[5]中, 作者提出了一

种基于 SDN 的网络架构, 该架构能够有效地实现负载平衡和干扰管理, 从而最大化系统吞吐量。一种由无线网络和网络云组成的双层网络架构被提出^[6], 该架构实现了 LPN、大规模多输入多输出 (MIMO)、CUPS、SDN 和网络功能虚拟化 (NFV) 等各种技术和设备的集成。文献[7]中, 作者提出了一种基于 SDN 的新型网络体系架构, 该架构支持由长期演进 (LTE) 移动通信系统和无线局域网 (WLAN) 覆盖下的多小区构成的超密集网络, 该网络可通过重新配置回程连接到核心网络。文献[8]中引入了一种通过分离无线链路中控制平面和用户平面来实现管理移动终端

与LPN间连接的新方法。文献[9]中,作者介绍了一种基于虚拟小区的分层无线组网方案,该方案的核心为控制平面与用户平面分离,虚拟小区通过使用高频段频谱资源来获得较高的系统容量。

然而,高低频无线协作组网的实现仍存在很多困难。首先,多层节点的密集部署需要考虑回传方式与部署成本之间的折中;其次,研究过程中无法忽视小区密集部署带来的强干扰问题;此外,LPN的小范围覆盖导致中高速移动用户频繁切换的问题。这些问题将会对整个系统的容量以及用户体验产生影响^[10]。

1 高低频无线协作组网

1.1 NG-RAN 架构

与LTE基本架构不同,除了部署一些5G基站(gNB)外,5G基本架构中基站与核心网之间的接口也发生了变化,具体的架构如图1所示。与LTE网络相同的是:gNB和4G基站(eNB)通过Xn接口相互连接,然而两者均通过NG接口连接到5G核心网,该接口与4G网络中的S1接口有很大不同。具体而言,负责承担热点的

gNB主要通过NG-U接口连接到核心网用户平面(UPF),eNB主要通过NG-C和NG-U接口分别连接到核心网移动管理(AMF)和用户平面来提供基础覆盖和部分非热点区域的通信需求。

与传统3G、4G网络不同,5G网络主要存在以下4个研究难点:首先,5G网络为多个频率共存(高低频以及非授权频段)且多层重叠,如何在如此复杂的网络环境中获得更大的性能增益成为研究热点;其次,由于5G的带宽大、天线数目多,导致完全集中化管理受限;然后,实现多连接时,用户到网络的连接来自多个频率下的多个传输点,为了防止话务在前传上多次转发,要进行话务处理;最后,5G系统中采用NFV时,一些高层功能可以集中在硬件资源池中实现。针对上述问题,2017年3月无线接入网(RAN3)会议上明确指出将分组数据汇聚协议(PDCP)和无线资源控制(RLC)层进行分割,具体如图2所示。经过水平分割之后,无线接入网架构可以分为集中单元(CU)和分布单元(DU),其中CU主要包括无线资源控制和分组数据汇聚层协议;CU设备主要包括非实时的无线高层

协议栈功能,同时也支持部分核心网功能下沉和边缘应用业务的部署。DU包括RLC层、媒体访问控制(MAC)层和物理层;DU设备主要处理物理层和实时性需求的功能,这种分割方式能更加体现出未来5G网络中的LPN仅具备的数据功能。

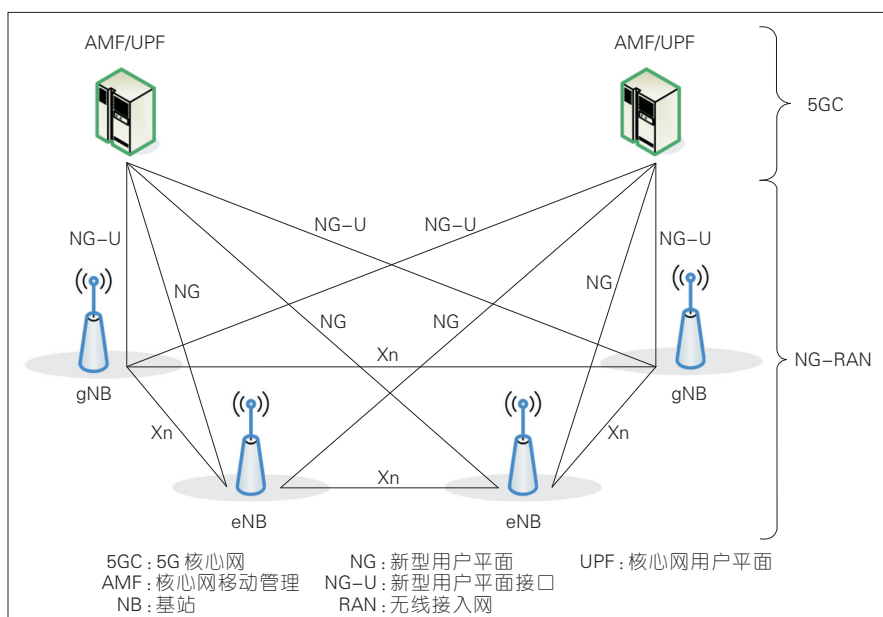
5G基站分为高频基站和低频基站:5G低频基站用于广覆盖,5G高频基站主要用于实现热点地区高速数据传输。在5G基站部署的初期阶段,5G低频基站和4G基站会址部署,同时基站密度相当^[11]。5G新型基站结构既可以支持频分双工(FDD)模式,又可以支持时分双工(TDD)模式或双模式操作。gNB由gNB-CU和gNB-DU组成,一个gNB-CU可以允许多个gNB-DU通过F1接口连接,而一个gNB-DU只能连接到一个gNB-CU。在gNB架构中,CU和DU可以由独立的硬件来实现以节省成本;该CU/DU分离的架构可以实现负载管理的协调、实时性能优化,此外还可针对不同应用场景的需求进行单独配置。

1.2 双层组网架构

基于控制/用户分离和分簇化集中控制思想,我们构建了图3所示的控制平面和用户平面分离的架构图,其中既有负责基础覆盖的宏基站,又有承担热点覆盖的LPN。整个接入框架划分为2个子系统,即LPNs通信子系统和宏蜂窝通信控制子系统。该架构在宏基站提供覆盖范围下,宏用户由宏基站在低频段提供控制和数据信息,LPN覆盖范围下的用户由宏基站在低频段提供控制信息,由LPN在高频段提供数据信息。该架构具有以下3个方面的特点:

(1) 基站间分簇化集中控制。将部分LPN划分到同一集群中可以较容易地实现小区间干扰协调,从而能够满足热点区域用户的高体验速率要求。

(2) 部分LPN仅具有数据功能,



▲ 图1 5G系统基本架构

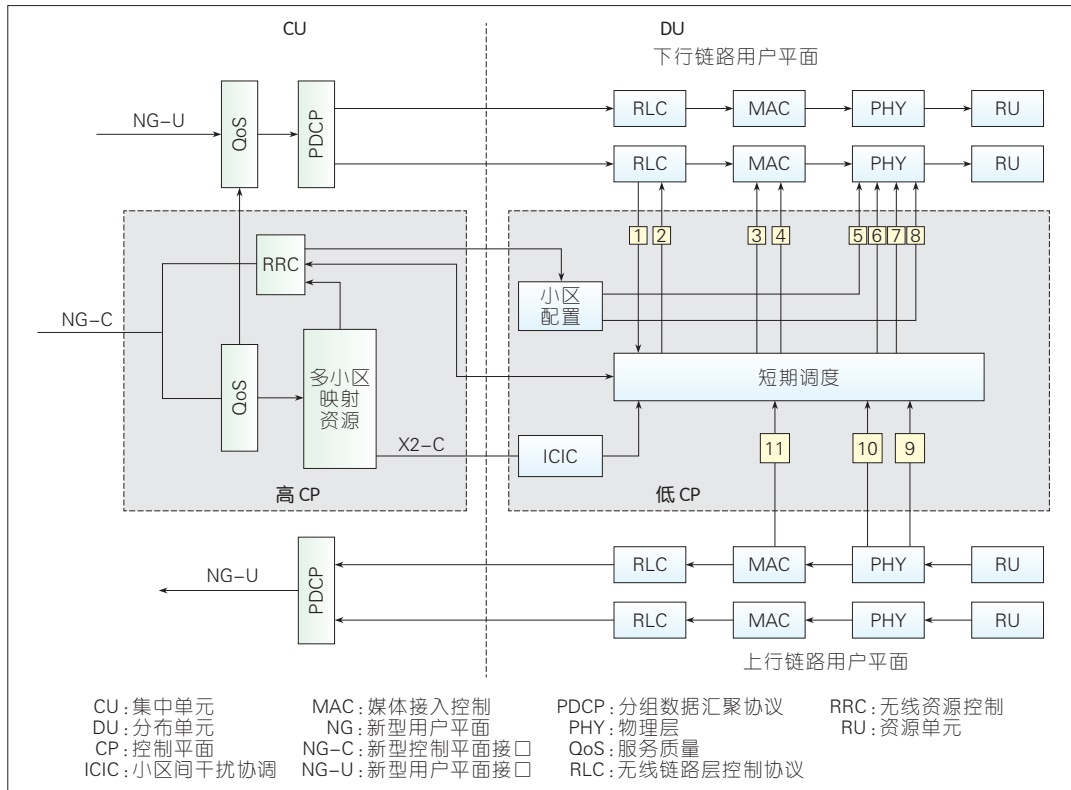


图2 CU/DU 方案示意图

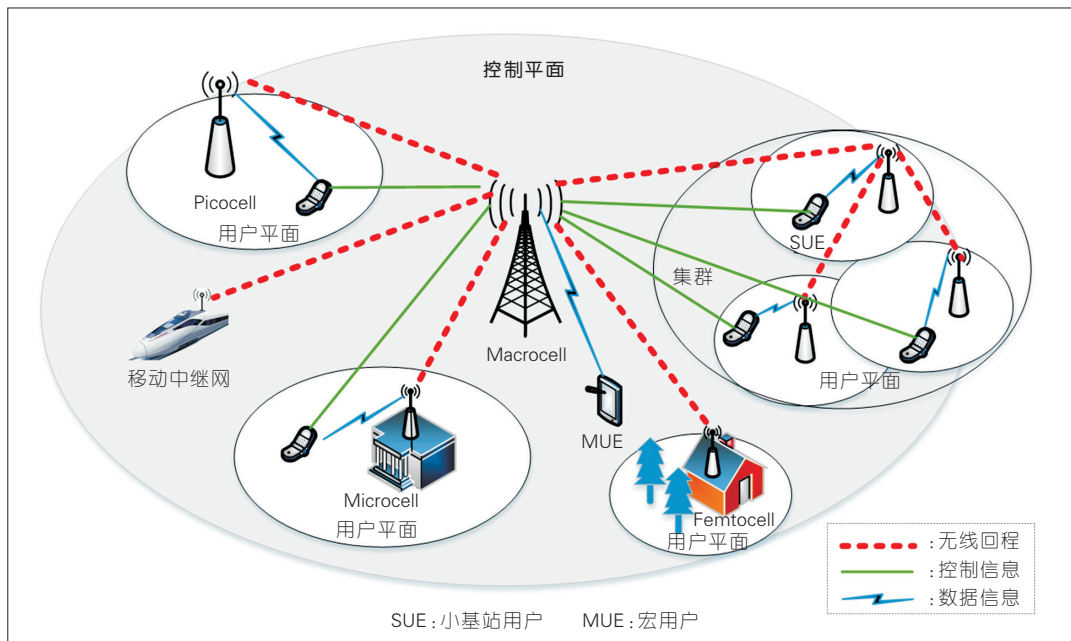


图3 双层组网架构图

即只有 RLC、MAC 层和物理层的功能,可明显降低运营商的部署成本。

(3) 当集群中的用户数目较少时,集群中的基站可以进行检测,在保证用户服务质量的前提下适当关闭一部分基站来实现小区动态开关,

从而降低能耗。

2 组网关键技术

2.1 无线回程

无线数据流量的指数增长,使得

未来网络的部署呈现密集化特点。自组织、低成本的 LPN 在热点地区的大量部署能够有效地改善无线链路的可靠性,增强用户体验。然而,如何高效可靠地回传 LPN 覆盖范围下的用户数据到核心网络成为研究人

员不得不关心的问题^[12]。现有的回程方式主要以光纤回程为主,虽然这种回程方式具有高可靠性、高传输效率,但是在实际无线网络建设中,某些业务热点地区部署的LPN并不具备光纤回程的条件^[13]。此外,光纤回程存在投资回报困难、建设成本高、某些区域入场难等问题,极大地限制了必须使用光纤回程才能实现的网络架构的可用范围。

无线回程具有低成本、易部署等优点,可有效地解决LPN有线回程成本高的问题。随着5G关键技术的快速发展以及LPN的超密集部署,未来网络很有可能将采用无线回程为主、光纤回程为辅的回程方式。然而,无线回程的关键技术研究也不是一帆风顺的,仍存在很多问题亟待解决,无线回程容量受限便是其中主要问题之一。

作为5G物理层关键技术,大规模MIMO技术通过在基站侧布置大规模天线代替现有的多天线技术,使得系统容量和频谱效率有了量级的提升^[14]。将大规模MIMO技术应用到无线回程中,不仅能够有效地提高无线回程链路的系统容量和数据传输速率,更能降低站址选择及回程线路架设的成本。此外,无线回程容量的提高还需要大量可用带宽。在文献[15]中,作者指出无线回程链路需要依赖1~10 GHz带宽资源才能有效地支撑起整个超密集网络。然而,现有的商业无线通信工作频段主要是集中在300 MHz~6 GHz频段,该频段虽然在数据传输方面存在较高的可靠性和稳定性,但是其频谱资源严重短缺,根本不足以支撑起无线回程网络的高数据容量传输。值得庆幸的是:30~300 GHz的毫米波频段仍存在大量可用的频谱资源^[1]。如何高效地利用该频段资源,将有效地解决无线回程容量受限问题。

目前,相关研究人员已经证实毫米波频段在高速率数据传输方面存在巨大潜力。文献[16]中,作者设计

了一种工作在毫米波频段的天线,实现了2 km的距离、1 Gbit/s以上的数据传输速率。同时,毫米波波长较短,有效地降低了毫米波天线的尺寸和制作难度,为大规模天线在宏基站和LPN的配置提供可能。与传统的微波链路相比,毫米波大规模MIMO波束赋型技术可为无线回程链路提供巨大的天线增益,能够有效地对抗由降雨以及空气吸收带来的相对较高的路径损耗。毫米波大规模MIMO波束赋型技术已被广泛研究,文献[13]研究了不同风速对大规模天线波束对齐的影响,如图4所示,其中 M_{MBS} 和 M_{LPN} 分别为宏基站与LPN的天线数目。文献[17-18]中,作者提出一种模拟域与数字域混合预编码方案,有效地降低了毫米波大规模MIMO系统的硬件设计复杂度,图5为宏基站与LPN收发信机的简化框图, N_s 为宏基站发送的数据流数目, N_d 为LPN发送的数据流数目。 N_t , N_r 为宏基站与LPN天线数目。

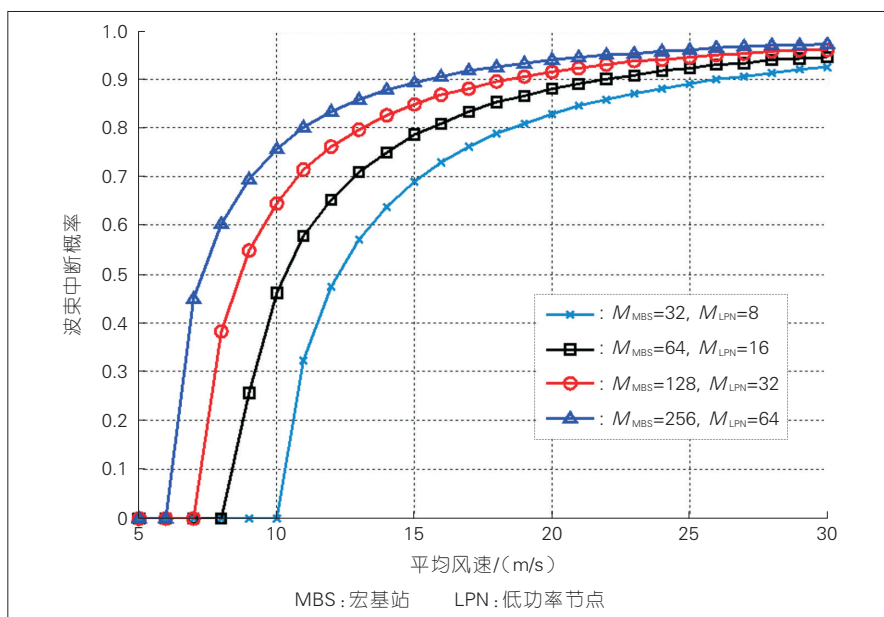
将毫米波大规模MIMO技术应用到5G超密集异构网络的无线回程中,不仅能够有效地克服传统无线回程网络容量受限问题,还能实现网络拓扑结构的灵活部署,降低网络建设

与运营维护成本,从而加速5G超密集网络的部署。

2.2 干扰协调

高低频无线协作组网中宏基站和LPN分别采用低频段和高频段的异频部署策略,因此可以忽略系统中的跨层干扰。但是在超密集组网的环境中,LPN部署数目越来越多,在有限的空间内LPN之间的距离越来越近,同层干扰问题越来越严重。因此,LPN用户可能会受到几个相邻基站不可忽略的干扰,同时每个LPN也可能对周边几个相邻基站造成干扰形成复杂的干扰网络,严重影响系统性能。如果没有有效的干扰协调方案,将会严重降低网络能量效率。

针对网络中存在的干扰问题,较为有效地解决方案为小区间干扰协调(ICIC)技术、功率复用技术和功率控制技术^[19]。但是ICIC技术无法解决信道之间的干扰问题,同时频谱资源的短缺和终端用户数目的井喷式增长使得频率复用和功率控制技术的缺陷逐渐显现。针对ICIC技术的局限性,第3代合作伙伴计划(3GPP)引入了增强型小区间干扰协调(eICIC)技术,其中最为有效的是几



▲图4 波束中断概率与风速关系图

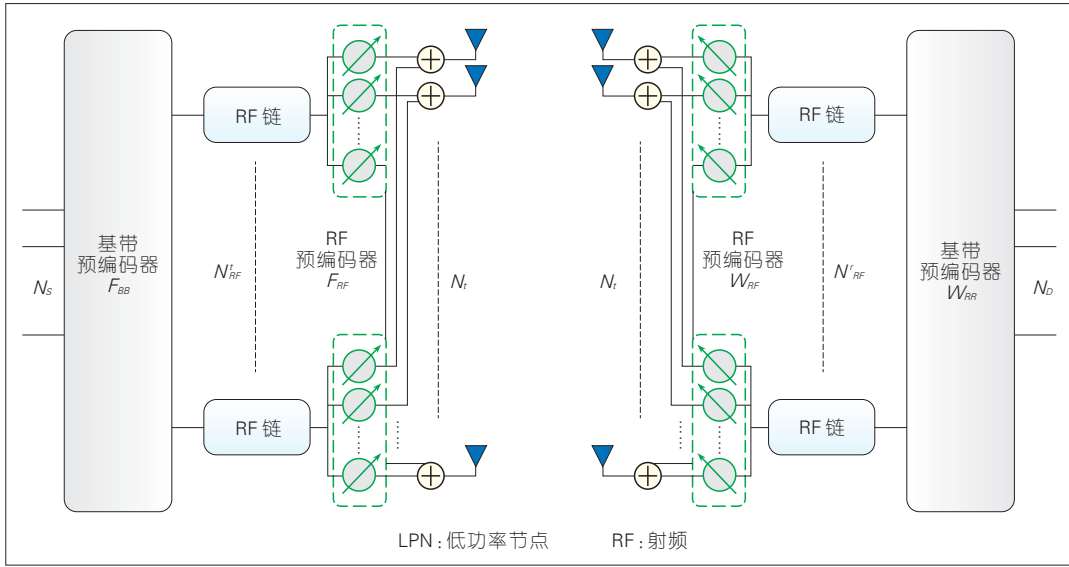


图5 宏基站与LPN收发射机的简化框图

乎全空子帧 (ABSF) 技术,其主要思想是预留部分保护时隙来发射空白帧。在 ABSF 中仅传输参考信号,不进行控制或数据信号的传输^[20],从而在时域上协调不同基站的子帧利用率。此外,也有一些学者提出了其他的干扰协调方案。文献[21]中,作者提出了一种基于离散权值的干扰图构建方案。该算法主要根据每个用户所处的地理位置来构建干扰图,并依据干扰图对用户进行分群,之后对每个集群进行信道分配来提升边缘用户的信干噪比。

在基站密集化部署的场景中,由

于干扰类型的多样性和时变性,现有的协调算法难以应付。WOOSEOK Nam 等人指出:未来 5G 先进的干扰管理方案是网络端和用户端同时进行干扰管理^[22]。为了验证该思想的准确性,我们研究了一种网络端和用户端结合进行干扰管理的方案,其中网络端采用一种基于干扰图的分群算法来降低 LPN 与用户之间的同层干扰;用户端使用串行干扰消除接收机来消除同一集群中用户之间的干扰。图 6a)、b) 分别为小区数与系统容量和频谱效率仿真结果图。从图中可以看出:当小区数目增加时,即

使整个系统中的干扰会变得更加严重,但是所提方案的系统容量和频谱效率依然会随着小区数目的增加而不断增大。

网络端的干扰管理方案除了基于干扰图的分群算法外,多个小区间的协调处理,可以避免甚至消除干扰,例如:协作多点 (CoMP) 传输技术^[23]。该技术是多个协作节点之间通过共享数据、信道状态信息 (CSI)、调度信息、预编码矩阵索引 (PMI) 信息来进行协作处理,以提高小区边缘用户的性能。下行的多点传输技术是通过位置不同的多个传输点之间

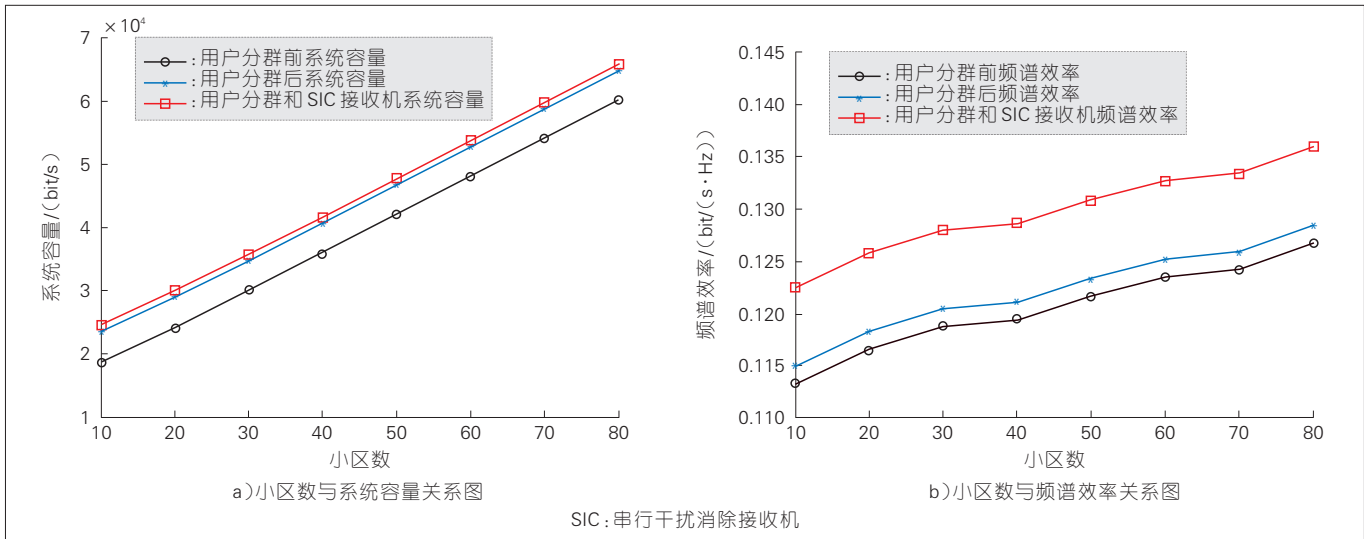


图6 小区数与系统容量和频谱效率仿真结果图

的动态协作处理为目标用户提供服务,其主要包括协作调度/波束赋型和联合处理。协作调度/波束赋型的原理为:参与 CoMP 操作的各节点共享 CSI 信息,用户数据只存在于该用户的服务 eNB。通过在各传输点之间进行协作调度或者波束赋型以降低各传输点覆盖重叠区域的用户间干扰。联合处理的原理为:CSI 信息和用户数据在参与 CoMP 操作的节点之间共享,各节点按一定的准则向用户发送数据,用户的隶属 eNB 可以选择采用联合传输或者动态小区选择来为用户进行 CoMP 操作^[24]。在高低频无线协作组网架构中,几十个小区的信号处理集中在一个具有较强计算和存储能力的基站中,这些小区中的数据 and 信道状态信息被统一定位,因此相邻小区间的协作多点传输技术更容易实现。同时,以用户为中心的协作多点传输技术可以动态选择最优集群以达到减小小区间干扰、提升系统最优性能的目的。

2.3 越区切换

在 5G 通信网络中,更加复杂的通信环境将会给越区切换带来更多新的挑战。其中,5G 通信网络中的数据传输速率将远高于 4G 网络,这将会使得越区切换需要拥有更快的处理速率。随着基站数量和移动终端数量的急剧增加,集中化的移动性管理将不再高效^[25]。同时,随着毫米波和 LPN 的应用,基站覆盖范围不断缩小,用户终端的越区切换频率急剧增加。因此,在 5G 通信网络的整个构架中,不同的切换场景下的越区切换方法已经成为当下移动性管理的研究热点。

针对 5G 通信场景中信号测量不准确以及频繁切换的问题,我们可以通过对基站切换参数进行调整,来改善无线覆盖环境,减少越区切换频率,从而保证越区切换的顺利完成。通过仿真与实测,大多数越区切换失败是由于原基站信道质量太差,切换

请求(HO CMD)无法正确送达导致的。文献[26]中,作者提出了一种将切换准备提前的方案,能够有效提升 HO CMD 的发送正确率。如图 7 所示,在基站收到触发时间(TTT)测量上报后,便开始与目标基站开始进行越区切换准备过程,完成准备过程后发送 HO CMD 给终端。终端收到 HO CMD 后,并不会马上执行切换,而是等待 TTT2 事件的触发。若 TTT2 事件始终未触发,终端便会释放 HO CMD,源基站发送信令通知目标基站释放预留的资源。这种方案可以进一步提升 HO CMD 的发送成功率,但需要对终端侧进行一定的调整。

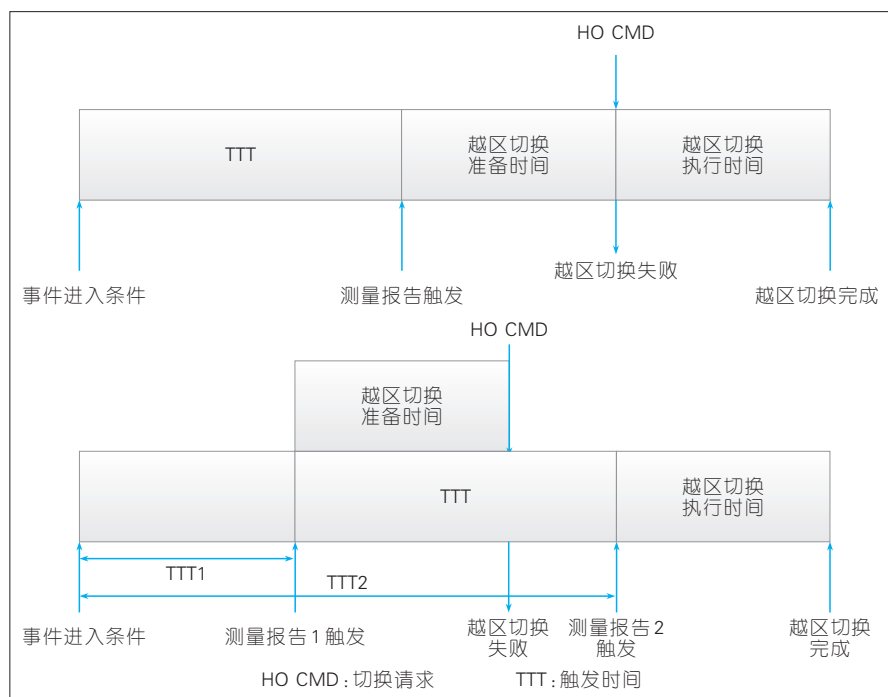
此外,在 5G 中的高低频无线协作组网架构中控制信息与数据信息是分离的。相应地,越区切换也会分别发生在控制平面和用户平面。在文献[27]中,研究人员提出了一种适用于 5G 宏基站之间越区切换的最佳 eNB 选择方法,通过使用时空估计方法来改善越区切换的性能。文献[28]中,作者针对 5G 高铁场景中控制用户分离的情况,提出了一种双链路软切换方案。通过引入双播技术来减

少越区切换时的通信中断时间,并设计了控制用户分离架构下终端在两个宏基站之间的切换流程,如图 8 所示。与传统 4G 硬切换方法相比,该方法的越区切换成功率提升了 35.7%。但文献[28]的研究环境是在基站线性布局的高铁环境,其方法在 5G 超密集网络中的应用还需进行一定的优化与改善。

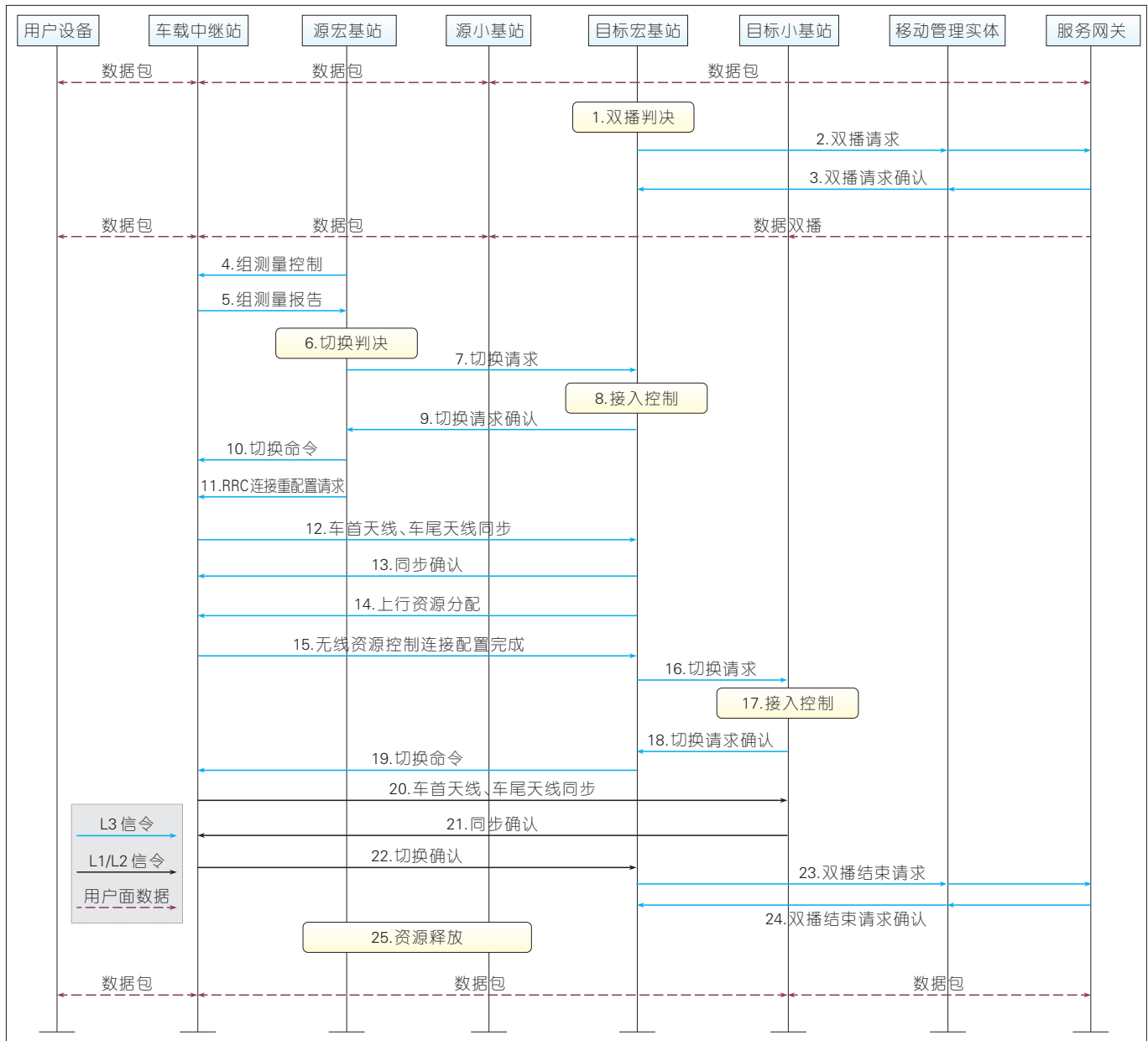
现有网络中的越区切换技术已经被广泛地学习和研究,然而如何将这理论结果与 5G 通信网络结合以达到 5G 的通信需求仍然会是一个研究难题。

3 结束语

作为提升系统容量、改善用户体验的一项关键技术,高低频无线协作组网正得到越来越广泛的关注。然而,接入网的架构目前尚未制定统一标准,现有的 4G 网络已不能满足未来 5G 三大应用场景的需求,因此如何实现高效、低复杂度的高低频无线协作网络成为 5G 技术从理论到应用的重大挑战之一。本文介绍了 5G 的系统架构、5G 基站的架构、4G 基站重



▲ 图7 切换提前方案时序示意图



▲图8 宏基站之间越区切换的信令

新部署的双层架构以及无线回程、干扰协调和越区切换三大关键技术的发展现状,详细比较各种技术的优缺点,总结三大关键技术的发展方向。随着通信技术的发展,基于无线回程、干扰协调和越区切换等关键技术的高低频无线协作组网将成为现实。

参考文献

[1] BHUSHAN N, LI JY, MALLADI D, et al. Network Densification: the Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G [J]. IEEE

Communications Magazine, 2014, 52(2): 82-89. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736747
 [2] NIU C, LI Y, HU R Q, et al. Fast and Efficient Radio Resource Allocation in Dynamic Ultra-Dense Heterogeneous Networks [J]. IEEE Access, 2017, (5): 1911-1924. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2653798
 [3] 倪善金, 赵军辉. 5G 无线通信网络物理层关键技术[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 48-53
 [4] MOHAMED A, ONIRETI O, IMRAN M A, et al. Control-Data Separation Architecture for Cellular Radio Access Networks: A Survey and Outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 446-465. DOI: 10.1109/COMST.2015.2451514
 [5] GUDIPATI A, PERRY D, LI L E, et al. SoftFRAN: Software Defined Radio Access

Network[C]//Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. USA: ACM, 2013: 25-30
 [6] AGYAPONG P K, IWAMURA M, STAEHLE D, et al. Design Considerations for a 5G Network Architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 65-75. DOI: 10.1145/2491185.2491207
 [7] ALI AHMAD H, CICONETTI C, DE LA O A, et al. CROWD: An SDN Approach for DenseNets[C]// 2013 Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN). USA: IEEE, 2013: 25-31. DOI: 10.1109/EWSDN.2013.11
 [8] ISHII H, KISHIYAMA Y, TALAJASHI H. A Novel Architecture for LTE-B: C-Plane/U-

- Plane Split and Phantom Cell Concept[C]// Globecom Workshops. USA: IEEE, 2012: 624–630. DOI: 10.1109/GLOCOMWV.2012.6477646
- [9] 李玥, 彭木根. 基于虚拟小区的分层异构无线组网方案[J]. 电信科学, 2013, 29(1): 8–14
- [10] 赵天宇. 超密集组网中联合传输与联合资源分配算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017
- [11] 张宝亚. 5G 承载网技术和优化组网[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1): 42–48. DOI: 10.3969/j.issn.1009–6868.2018.01.009
- [12] GE X, CHENG H, GUIZANI M, et al. 5G Wireless Backhaul Networks: Challenges and Research Advances[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 6–11. DOI: 10.1109/MNET.2014.6963798
- [13] HUR S, KIM T, LOVE D J, et al. Millimeter Wave Beamforming for Wireless Backhaul and Access in Small Cell Networks [J]. IEEE Transactions Communications, 2013, 61(10): 4391–4403. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.090513.120848
- [14] NI S, ZHAO J, GONG Y. Optimal Pilot Design in Massive MIMO Systems Based on Channel Estimation [J]. IET Communications, 2016, 11(7): 975–984. DOI: 10.1109/ISWCS.2015.7454372
- [15] TAORI R, SRIDHARAN A. Point-to-Multipoint In-Band mmWave Backhaul for 5G Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 53(1): 195–201. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010534
- [16] BLEICHER A. Millimeter Waves May Be the Future of 5G Phones[EB/OL]. [2018–02–08]. <https://spectrum.ieee.org/telecom/wireless/millimeter-waves-may-be-the-future-of-5g-phones>
- [17] EI AYACH O, RAJAGOPAL S, ABU-SURRA S, et al. Spatially Sparse Precoding in Millimeter Wave MIMO Systems[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2014, 13(3): 1499–1513. DOI: 10.1109/TWC.2014.011714.130846
- [18] RUSU C, MENDEZ-RIAL R, GONZALEZ-PRELCICY N, et al. Low Complexity Hybrid Sparse Precoding and Combining in Millimeter Wave MIMO Systems[C]// 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). USA: IEEE, 2015: 1340–1345. DOI: 10.1109/ICC.2015.7248509
- [19] LOPEZ-PEREZ D, GUZENC I, GUILLAUME D L R, et al. Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 22–30. DOI: 10.1109/MWC.2011.5876497
- [20] 陈晓冬, 熊尚坤, 王庆扬. LTE 小区内干扰抑制技术分析[J]. 电信科学, 2010, (5): 16–21
- [21] CHANG Y J, TAO Z, ZHANG J, et al. A Graph-Based Approach to Multi-Cell OFDMA Downlink Resource Allocation[C]// 2008 Global Telecommunications Conference. USA: IEEE, 2008: 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2008.ECP.713
- [22] NAM W, BAI D, LEE J, et al. Advanced Interference Management for 5G Cellular Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 52–60. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6815893
- [23] LI Y, JIANG T, LUO K, et al. Green Heterogeneous Cloud Radio Access Networks: Potential Techniques, Performance Trade-offs, and Challenges [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(11): 33–39. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600807
- [24] 郭静东. LTE-Advanced 中 CoMP 技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010
- [25] IMT-2020(5G) Promotion Group. 5G Vision and Requirements, White Paper [EB/OL]. (2014–05–28)[2018–02–08]. <http://www.imt-2020.cn>
- [26] ZTE. HO Performance Improvement in hetnet: R2–130957 [Z], 3GPP RAN2 #81b, 2014
- [27] BILENILEN T, DUTONG T Q, CANBERK B. Optimal eNodeB Estimation for 5G Intra-Macrocell Handover Management[C]// Proceedings of the 12th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks. USA: ACM, 2016: 87–93. DOI: 10.1145/2988272.2988284
- [28] ZHAO J H, LIU Y Y, GONG Y, et al. A Dual-Link Soft Handover Scheme for C/U Plane Split Network in High-Speed Railway [J]. IEEE Access, 2018, (1): 2169–3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794770

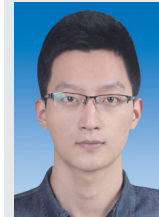
作者简介



赵军辉, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 华东交通大学信息工程学院院长; 主要研究方向为 5G 通信、车联网、轨道交通无线通信、射频识别(定位技术、防撞碰撞技术和安全协议)和应用开发(停车场管理系统、嵌入式车载防盗系统和 GPS 导航系统开发)等; 主持和参与过 30 余项课题; 在全球期刊和国际会议上共发表论文 100 余篇, 4 篇论文获最佳会议论文奖, 其中 SCI 收录 15 篇, EI 收录 50 余篇, 已申请国家发明专利 21 项。



杨丽华, 北京交通大学电子信息工程学院博士在读; 主要研究方向为异构网络、干扰管理、控制/用户平面分离架构等。



张子扬, 北京交通大学电子信息工程学院博士在读; 主要研究方向为 5G 通信系统、异构网络、移动性管理等。