

文章编号:1007-5321(2015)05-0001-17

DOI:10.13190/j.jbupt.2015.05.001

超高密度网络关键技术及研究现状

王莹, 缪中宇, 张平

(北京邮电大学 网络与交换国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 在通信系统迅猛发展的今天,为了满足爆炸式增长的移动业务和数据量需求,超高密度网络(UDN)作为有效改善网络吞吐量与资源利用效率的有效手段,已经成为第五代移动通信中的关键技术.网络节点的密集分布在干扰抑制、能量消耗、移动性管理等方面为通信系统带来了新的挑战,更优化的资源分配与网络选择策略、分布式算法设计以及 UDN 建模等研究都取得了长足进展.首先对 UDN 的基本架构和特点进行了简要介绍,重点分类和归纳整理了 UDN 技术研究中的最新成果,最后对该技术的发展趋势进行了展望,试图勾画出一个较为全面和清晰的概貌.

关键词: 超高密度网络;第五代移动通信;无线资源管理;干扰抑制;绿色通信

中图分类号: TN911.4

文献标志码: A

Research Progress and Key Technologies in Ultra Dense Networks

WANG Ying, MIAO Zhong-yu, ZHANG Ping

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Ultra dense networks(UDN) has been dealt as a core technology in the fifth generation of communication for its excellent performance on enhancing the network throughput and spectrum efficiency. Densely deployed nodes have brought new challenges to the communication systems in the aspects of interference suppression, energy consumption, mobility management and so on. The new challenges in turn have promoted a considerable progress in resource allocation, network selection strategy and network modeling techniques in UDN study. We first introduce the basic framework of the UDN and features. Moreover, we focus on classification of the UDN technology research in the latest works, and finally the technology trends were discussed for a more comprehensive and clear out view in this field.

Key words: ultra dense networks; 5G; radio resource management; interference mitigation; green communication

0 引言

随着经济的增长与科技的发展,人们的生活水平日渐提高,对通信的需求从最初的语音通信发展到如今的数据、流媒体等多种实时业务,应用场景涉及人们的生活、工作等各个方面.随着智能手机与平板电脑等各种新型移动终端的广泛普及,移动数

据量呈指数增长,并在城市形成大量热点地区,对现有的通信系统形成了巨大的挑战.尽管长期演进(LTE, long term evolution)系统与 4G 技术成熟发展并成功商用使无线数据传输速率与网络容量相比于 3G 以及全球移动通信(GSM, global system for mobile communications)系统获得了巨大的提升,然而,根据思科公司一年一度的视觉网络指数报告^[1],可

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61421061, 61372113);北京市自然科学基金项目(4132050)

作者简介:王莹(1976—),女,教授,博士生导师, E-mail: wangying@bupt.edu.cn.

以推测对于无线数据流量的需求将会持续呈现爆炸式增长,预测指出,未来的 10 年全球移动通信业务流量将增长 500 ~ 1 000 倍。

通信技术正亟需新一代的演进与变革来满足持续增长的用户需求,关于 5G 标准与关键技术的探究已经成为国内外通信业界的前沿课题。为了提供更好的通信质量,业界提出了“1000x”的网络规划目标^[2]。下一代移动通信需要强有力的技术向“1000x”的目标迈进,其中超高密度网络(UDN, ultra dense networks)、毫米波与大规模多入多出(Massive MIMO, massive multi-input multi-output)被视为 5G 中最具前景的关键技术^[3]。在目前的频率分配中,3 GHz 以下已经很难找到能够满足未来业务需求的频率,毫米波为频率在 30 ~ 300 GHz 之间的电磁波,在这些高频波段上仍有很多空闲频率,是拓展可用频谱的重要资源,并且毫米波波束具有很强的方向性,大大降低了波束之间的干扰。但是,毫米波的高频特性使得它在实际传输中存在诸多问题;毫米波在空间传输中会受到很强的路损,再加上大气吸收及雨衰,使得其传播距离受到限制。Massive MIMO 通过大量的天线增加空间自由度,在相同的时频资源块上服务多个用户。Massive MIMO 通过大量天线,可以将波束能量集中到非常小的区域内,从而能够以较小的发射功率来服务小区内的用户,有效地提升了信道容量与能效。但是,Massive MIMO 在实际部署时需要较高的成本,大量天线之间的相关性也会严重地影响其实际性能。

在全球主要运营商数据业务中,移动语音业务的 60%、数据业务的 90% 发生在室内和热点地区^[4]。因此,解决室内覆盖和热点地区的业务流量激增问题是改善系统容量的重要途径。融合了多种接入技术的异构无线网络更能满足无线通信这种潜在要求,而随着用户数量与密度的急剧上升,多种节点密集部署的 UDN 成为未来移动通信的必然趋势。UDN 允许由用户自主部署低功率、低成本、低能耗的家庭基站或微型基站,基站可以直接部署在室内,覆盖面积小,缩短了终端与基站之间的距离,且不需要经过建筑的穿透损耗,大大降低了信号的衰减,改善了基站与终端之间的链路质量,增强了室内覆盖,使用户的通信质量得到更好的保证。较小的路径损耗也允许终端以更低的功率发送信息,许多小区还能够根据系统内的业务状况自适应地选择休眠与激活,不仅提高了能效,同时也减小了用户之间的干

扰。低功率发射增加了终端电池的续航时间,对于电池电量受限的许多智能设备具有重要意义。不同于 WiFi 使用未经认证的频段,小小区复用宏小区的频率,微型基站发射功率低,覆盖面积小,可以在网络中大量部署,形成很高的频率复用率,有效地利用宝贵的频谱资源。UDN 可以有效缓解热点地区的业务拥堵,分流与平衡全网负载,减少拥塞与掉话的发生。可以看出,UDN 技术在增强室内覆盖方面有着显著优势,同时大大提升了频率与能量利用率,分流与均衡网络负载,使得网络性能得到显著改善。表 1 列举了各种技术带来的网络容量增益,UDN 以 10 ~ 100 倍的增益高居榜首。

表 1 5G 通信系统几种主要技术的增益倍数对比

通信技术	增益倍数
UDN	10 ~ 100 ^[5]
Massive MIMO	5 ~ 20 ^[6]
协作多点传输	1.5 ^[7]
端到端通信(D2D)	3 ^[2]
更多频谱	2 ~ 10 ^[2]

但是,若要完全发挥 UDN 的优良性能,仍有诸多技术挑战亟待解决。UDN 中微型基站复用宏小区的频段,这种频率复用模式不论在宏小区用户与小小区之间还是小小区用户内部都带来了不可忽略的同频干扰,成为 UDN 技术发展的一大障碍;传统通信过程消耗大量能源,不符合当今绿色理念,而 UDN 中小区数量巨大,更为迫切地需要高效、节能的信息传输技术;多层网络与不同服务接入点的存在给用户带来了更丰富的选择,同时也造成了更多的困扰;如何在多个可用网络中选出最佳的接入点也是 UDN 中的重要研究课题。除此之外,私有小区开放的商业模式设计、用户服务质量(QoS, quality of service)、自组织与自适应以及同步等也是 UDN 研究中不可忽略的重要问题。而与其他通信技术的结合将给 UDN 带来更大的生机与活力。

笔者着眼于 UDN 中存在的各种挑战,归纳总结了 UDN 最新的研究方向与研究成果,并对未来 UDN 的发展趋势做出了展望。

1 UDN 概述

1.1 UDN 的网络架构

UDN 技术在网络在宏引进了低功耗的非传统节点,即小小区基站(SBS, small cell base station),

包括微微蜂窝基站、家庭小区基站 (FBS, femtocell base station) 以及中继节点等. 这些微型基站的发射功率在 10 ~ 100 mW 之间, 一般能够支持 4 ~ 6 个用户, 允许用户的最大移动速度为 10 km/h. 微微蜂窝基站可以针对高移动用户密度的区域进行覆盖, 在高业务密度的区域对宏小区的频率资源进行补偿, 保证热点地区的 QoS. 家庭基站具有低成本、低功率、接入简单、即插即用的特点, 可以部署在社区、办公室等室内场景, 减少宏小区到室内的穿墙损耗, 提高室内覆盖. 在传统蜂窝网络与异构网络的发展基础之上, 为了应对移动设备数量以及用户业务的急速增长, 小区的半径不断缩小, 从最初的几千米的区域到不足 1 km, 在日本, 小小区的半径已缩减到 200 m 左右, 有些家庭基站的覆盖范围甚至已和 WiFi 设备相当. 小区半径的缩小意味着基站间隔的缩小, 在今后的 UDN 中大部分接入节点的覆盖范围将在 50 ~ 200 m, 随着技术的发展甚至可缩小至 10 m 左右^[8], 在城市热点地区形成相当密集的网络部署.

这些低功率节点部署在宏小区内, 与宏小区对室内及热点地区形成重叠覆盖, 通过回程链路直接与核心网相连, 为移动用户进行服务. 回程链路可以使用光纤或数字用户线, 宽带接入运营商网络. 在 TS 36.300^[9] 中, 已明确规定, 现有的无线接口 S1 应能够支持家庭基站与家庭基站网关之间的连接, 最终接入核心网. UDN 网络架构示意图如图 1 所示.

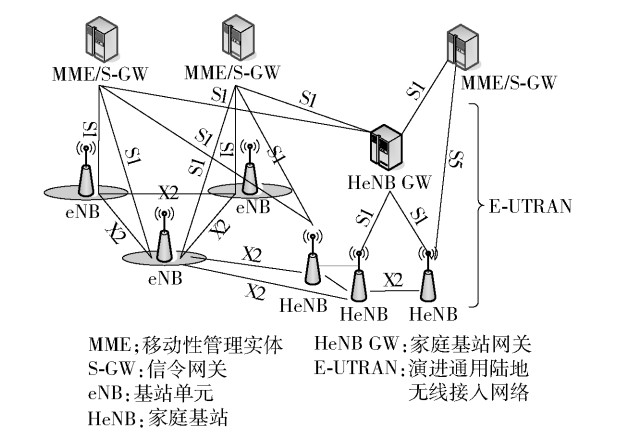


图 1 网络架构示意图^[9]

高密度网络中资源分配采用的网络架构主要分为集中-集中和分布-集中两种. 集中-集中式就是各个小小区将测得的干扰情况上报给本地网关, 本地网关通过某个准则将小小区分成若干个簇, 每个簇内选出一个簇头, 由簇头根据簇内各小区的资源需求进行分配. 分布-集中式是所有的网络节点通过相互之间的信息交互分成若干个簇, 每个簇内选出簇头进行资源分配.

1.2 应用场景

一般地,UDN 有 3 种应用模式:封闭模式、开放模式与混合模式,与之对应的典型应用场景有家庭部署、企业部署与热点部署^[10]. 表 2 所示为将 3 种模式的性能及优缺点对比.

表 2 3 种接入模式性能对比

模式	干扰	系统容量	公平性	安全与隐私	优点	缺点
封闭模式	层间干扰较强	较低	低	高	易于管理;保证小区所有者的隐私利益	存在较为严重的层间干扰;资源利用不充分
开放模式	较低	高	高	低	缓解层间干扰;有利于平衡网络负载与频率资源的公平分配;提高网络吞吐量	可能会降低私有用户安装部署小小区的积极性
混合模式	较低	较高	较高	较低	可通过开放率的调整灵活控制网络性能;平衡小小区与系统的吞吐量;缓解层间干扰	网络选择与切换机制相对复杂

1) 封闭模式. 微型基站的鉴权列表中只有授权用户,只为本地的封闭用户群提供服务,而拒绝其他用户终端的接入请求. 在家庭部署的场景下,用户可能需要向运营商付费部署家庭基站提升自己的通信质量,家庭基站属于用户的私有基站,只为一些特定的授权用户提供服务,其他用户不能从该基站获得服务.

2) 开放模式. 基站通常由运营商安装,部署在地铁站、飞机场或商务中心等人流密集,或远离宏基站的热点区域,平衡与分流宏小区的负载,增强热点地区覆盖. 开放模式下,基站能够为区域中的任何用户提供服务,所有用户具有相同的优先级.

3) 混合模式. 基站为高优先级授权用户提供服务,同时在资源充足的条件下也允许一些非授权

用户的接入. 这类基站通常比工作在封闭模式的基站有更强的服务能力, 支持更多用户. 如在一个企业中, 安装了一个微型基站, 企业的员工可以使用它进行通信, 当有客户来企业洽谈时, 客户也应该能够接入该微型基站, 获得比在宏小区下更高质量的通信服务.

2 研究内容

UDN 技术的关键是妥善处理干扰抑制、移动性管理的各种挑战, 为用户提供可靠、连续的服务. 在密集小小区部署的场景下, 研究解决各种技术壁垒的核心内容与手段在于对资源的合理分配, 包括频率分配与功率分配. 通过在分配时考虑不同的准则, 如能效、干扰、经济效益等, 改善 UDN 的各项性能, 解决 UDN 技术中的各种挑战, 实现网络的优化. 对几乎空白子帧 (ABS, almost blank subframe) 与基站休眠策略的改进可以在有效提升能量利用率, 实现绿色环保通信的同时, 减少对其他小区与用户的干扰, 改善网络性能. 许多小小区都是由用户自主部署的私有小区, 这些私有小区常工作在封闭模式, 若能激励它们开放自己的资源, 为附近的宏小区用户设备 (MUE, macrocelluser equipment) 提供服务, 既可以减少层间干扰又能为宏小区分流部分业务, 平衡网络负载. 在大力提升网络吞吐量的同时, 从全网架构来看, 回程链路的限制、用户的 QoS 也是不得不考虑的问题. 另外, 单一地使用 UDN 技术远远不足以实现网络容量“1000x”的目标, 只有将多种技术如 MIMO、中继等融会贯通, 才能将移动通信推向一个新的高度.

2.1 干扰抑制

干扰管理是移动通信中永恒的话题, 从 GSM 系统中小区间的同频干扰, 到码分多址 (CDMA, code division multiple access) 系统中用户间干扰, 干扰一直是通信系统性能与容量提升的一大阻碍. 在 UDN 场景下, 不同发射频率的小小区与宏小区重叠部署, 而且小小区密度极大, 这种频率复用因子大于 1 的规划使得网络中的干扰问题愈加明显. 在这种双层网络中, 主要存在两大类干扰: 层内干扰和层间干扰, 本质上, 都是因频率复用距离过小而导致的同频干扰. 图 2 显示了 UDN 中的各种干扰.

层内干扰是处于同一层的小小区之间的干扰. 宏小区中所有的小小区复用相同的频带, 而小小区之间的距离却很难保证. 在正交频分多址 (OFD-

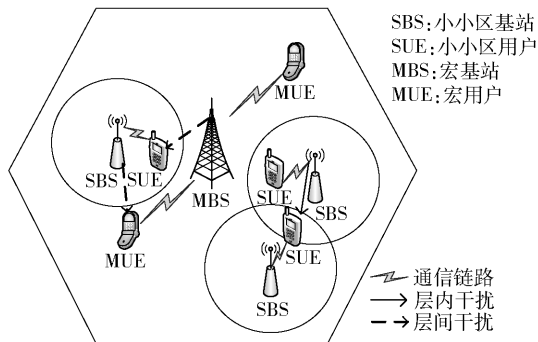


图2 UDN 中层内与层间干扰示意图

MA, orthogonal frequency division multiple access) 系统中, 当距离相近的小小区使用相同的子载波时, 小小区中的用户在上行发射时对邻小区的基站产生上行干扰, 而小小区中的基站也会对邻小区的用户产生下行干扰.

层间干扰位于小小区与宏小区之间. 小小区复用宏小区的频率, 必然会与附近的 MUE 产生强烈的上下行干扰. 这种干扰在宏小区的边缘尤为明显. 处于宏小区边缘的宏用户远离基站, 接收信号所经历的多径与衰减强烈, 信干噪比 (SINR, signal to interference and noise ratio) 难以得到保证. 此时, 若其附近存在小小区在相同的子信道上发射, 很可能造成 MUE 无法正常接收宏基站的信号. 同样地, 由于功率控制机制, 宏小区边缘的用户会以高功率发射, 而小小区用户设备 (SUE, small cell user equipment) 的发射功率却通常很低, 在极端情况下 SUE 发射的信号会湮没在 MUE 的信号中, 因此, 处于小小区附近的 MUE 也会对小小区造成极其强烈的上行干扰, 甚至会阻碍它们的正常通信, 在小小区附近形成盲区^[11].

既然小小区网络架构中的干扰本质仍为同频干扰, 那么通过合理的频率分配与功率控制, 就可以有效地缓解网络中的各种干扰. 在 OFDMA 系统中, 各子载波相互正交, 不存在干扰, 将相互正交的子载波分配给可能存在干扰的用户, 使其工作在不同的频率上, 可以大大提升用户的 SINR, 并提升网络吞吐量. 小小区复用宏小区频率的方式有 3 种: 正交分配、全复用及部分复用, 如表 3 所示. 正交分配方式将宏小区的频率资源分为两部分, 分别作为宏小区与小小区的专用频率, 宏小区与小小区使用相互正交的频率可以有效地消除层间干扰, 只需考虑小小区之间的干扰消除问题. 但是, 这种专用频率的方式会大大降低频谱效率, 影响系统容量的提升. 若

小小区可以使用宏小区的全部频率资源,则为全复用方式. 在这种方式下频率复用率高,小小区这层网络的频率资源充足,可以服务更多用户,提升网络吞吐量,分流宏小区的负载. 但是,采取全复用的频率规划方式时,网络中可能存在大量层内与层间干扰,对具体的频率与功率分配方案提出了更高的要求. 一种折中的方式即为小小区部分复用宏小区频率,同样将宏小区的频率资源分为两部分,一部分为宏小区的专用频率,另一部分为小小区与宏小区共享的频率. Wu 等^[12]提出宏基站负责测量和收集各个宏用户的干扰信息,并建立干扰池,将处于微型基站附近的宏用户列入其中. 宏基站给干扰池之外的宏用户分配共享频率,而给处于干扰池中的用户分配宏小区的专用频率避免 SUE 与 MUE 之间的干扰. 部分复用的方式一定程度上在资源利用率与干扰管理之间进行了平衡.

表 3 3 种复用方式对比

方式	干扰类型	干扰强度	频率利用率
正交分配	层内干扰	弱	低
全复用	层内干扰,	强	高
	层间干扰		
部分复用	层间干扰,	较弱	较高
	层内干扰		

现阶段对小小区网络进行干扰管理的主要手段有子载波分配、分簇、功率控制、网络选择等.

2.1.1 资源分配

资源分配是移动通信中的重要课题,无线通信系统中最核心的资源即为频率与功率,通过合理地分配频率资源及进行功率控制,可以有效利用有限的通信资源,为用户提供更优质的服务.

在频率分配方面,正交频分复用是新一代无线通信中采用的关键技术,可以保证小区内各用户之间的正交性,从而有效地避免用户间干扰,使 OFDMA 系统可以实现很高的小区容量;还可以通过灵活选择合适的子载波进行传输,来实现动态的频域资源分配. 在对各微型基站进行子信道分配时,要保证 SUE 不能影响宏小区原有用户的正常通信,其对 MUE 造成的干扰必须满足一定的 SINR 门限. 同时,在考虑层内干扰的场景下,同层小小区之间的干扰也要满足一定门限. 在无线通信系统中,由于无线链路的多径与阴影衰落,在分配子信道时,还可以考虑用户在每个子信道上的 SINR,根据用户在收到

的信号质量分配子信道,为用户分配增益最高的子信道,使得系统容量最大化.

假设集合 $U = \{1, 2, \dots, u\}$ 为系统中的用户集合, $I = \{1, 2, \dots, i\}$ 为子载波集合. 在子载波分配中,通常会有一个二元变量 $x_{i,u} \in \{0, 1\}$, $x_{i,u} = 1$ 表示为用户 u 分配子信道 i ,反之表示用户 u 不能使用子信道 i ,且满足 $\sum_{u=1}^U x_{i,u} = 1$,即一个子信道在一个时刻只能分配给一个用户. 则系统容量可以表示为

$$R = \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^I x_{i,u} \lg(1 + \gamma_{i,u}) \tag{1}$$

其中 $\gamma_{i,u}$ 为用户 u 在子信道 i 上进行发射时的 SINR.

由此便形成了子信道分配问题中最基本的优化模型. 将干扰作为约束条件,求解分配向量 \mathbf{x} ,使得式(1)所表示的系统容量最大. 也可以将时延、功率限制、能效、小小区的分流流量作为约束条件,在抑制干扰的同时优化系统其他方面的性能.

Abdelnasser 等^[13]基于优化的方法提出了一种混合整数非线性规划模型进行子信道分配与功率控制联合优化. 在一个分簇的网络中,以最大化每一簇的吞吐量之和为目标,将每个簇中的用户总容量、微型基站在各个信道上的发射总功率、层间干扰以及层内干扰水平作为约束条件,求解资源与功率分配.

使用优化策略求解资源调度方案,寻求系统性能最大化是优化系统性能最直接的思路. 这类优化问题可以用传统的凸优化工具,如内点法、分支定界法、拉格朗日乘子法等求解. 但是,由于问题的非线性、求解变量的不连续性等使得这类优化问题为 NP-hard^[14],给计算求解带来很大困难,加之网络的密集化大大增加了求解的计算复杂度,一些低复杂度的资源调度策略应运而生.

Wu 等^[15]提出的自适应频率分配方案中,小小区的可用频率分为专用部分与共享部分. 根据小小区的个数,将专用频率分为几个频带,用于保证小小区的基本通信连接. 每个微型基站通过用户上报测量和记录与本小区产生干扰的小区 ID,并根据历史信息记录用户在各子信道上的增益. 定义与本小区有干扰的小区个数为干扰度,各个小区按干扰度排序,干扰度最大的具有最高优先级,从资源池中选择增益最高的频率. 共享频带则根据小区的业务需要由各小区竞争获得,用于提高 QoS. 这种低复杂度

的资源分配策略需要很少的计算量,但是系统性能与最优解有一定的差距。

在高密度部署的趋势下,分布式算法或许是一种在性能与复杂度之间的有效平衡。Bennis 等^[16]利用博弈论与增强学习算法设计了一个微型基站根据历史收益进行频率与功率选择的分布式算法。他们设计了两个博弈,第 1 个为非合作博弈,每个小小区将自己的吞吐量作为收益;第 2 个为合作博弈,所有小小区的收益都为系统中所有小小区的吞吐量之和。所有微型基站作为博弈者进行博弈,它们根据历史收益选择自己的策略使得收益最大。这个算法不需要中心控制节点负责网络中的资源调度,每个微型基站只需要通过历史收益独立对所使用的频率与功率进行决策,优化自身收益,甚至不需要与其他小区交互信息的开销。

功率分配方面,对于 MUE,所有 SUE 都是干扰源,用户发送的功率越大,产生的干扰便越大,对于小小区亦然,因此功率控制也是抑制高密度网络中干扰的重要手段。减小不必要的发送功率在保证用户性能的基础上同时也降低了能耗,更加符合绿色通信的理念。功率控制的建模方式主要有两种:一种是注水算法,基本思想是给链路质量高的用户多分配功率,链路质量差的用户分配较少的功率甚至不分配功率,充分利用高增益的链路寻求系统容量的最大化;另一种基于优化思想,如式(2)所示,吞吐量与功率有各自的权重 α 与 β ,将使用的功率看作通信成本,将系统吞吐量作为收益,以净收益,即吞吐量与所消耗的功率之差作为优化目标,求解最优的功率分配。

$$\max \alpha \ln(1 + \gamma) - \beta p \quad (2)$$

其中: γ 为用户的 SINR, p 为用户发射功率。

Shen 等^[17]使用注水算法的思想,着眼于 UDN 中的下行层间干扰,建立了小小区间的博弈模型。每个宏小区用户测量周围 SBS 对其产生的干扰并进行反馈,SBS 将自己对 MUE 产生的干扰作为约束条件,利用反馈信息采用注水算法进行功率分配,并用变分法求得最优解,均衡系统容量与 MUE 受到的干扰。

注水算法能有效地利用高质量的信道,充分利用可用功率提高系统容量。但是,注水算法也使用户之间丧失了公平性,信道质量较差的用户在极端情况下甚至得不到正常的服务。另外,注水算法将一个固定功率分配给各个用户,基站的发射总功率

并未减少,在很多文献的设定中基站仍是以最大功率发射信号,无法充分降低网络中的干扰水平。在这个方面,基于优化思想的第 2 种功率控制策略有更大的优势,它允许基站或用户根据需要决策功率的大小,能够真正降低网络中的功率消耗。

Al-Zahrani 等^[18]针对上行干扰,以类似于式(2)的优化目标作为各用户的收益建立了博弈模型,确定每个用户的发送功率。在求解中,利用平均场近似将干扰项中各小区间的增益 h_{nk} 与用户发射功率 p_n 简化为平均值 \bar{h}, \bar{p} ,以方便求解。基站首先根据训练数据估计出其他小小区干扰信号的平均增益 \bar{h} ,并根据干扰信号的功率 \bar{p} 动态地确定功率的权重因子 β ,最终根据各系统参数求解每个用户的发射功率 p_n 。

在实际通信系统中,由于回程链路的容量及时延限制,小小区与宏小区之间无法实现信息的时时反馈与交互。在 R10 版本的空口标准中,家庭基站与宏基站之间并未通过空中接口直接相连,对小小区的自治性提出了严格要求。Galindo-Serrano 等^[19]利用增强学习与马氏过程提出了一种小小区高度自治的功率控制方案。SBS 在完全自治场景下,不从宏小区接收信道及干扰的反馈信息,利用马氏过程和 Q-learning 估计干扰,根据干扰情况调整功率。

表 4 所示为几种资源分配算法的比较。

2.1.2 分簇

在高密度的场景下,各种无线接入节点数量众多,集中式的控制模式已经很难驾驭规模庞大的运算量。首先将网络拓扑进行分簇处理,再以簇为单位进行资源分配,成为提高网络性能的重要手段。通过分簇,整个网络的拓扑结构得到降级,大大减小了处理时延。分簇能够在空间重用带宽,有效地使用多条信道,大大提高系统容量;同时还能够降低为数据通信服务的控制包的开销,增强对节点的管理。分簇使网络的局部同步也更为容易实现,并且可以有效地为多媒体业务提供 QoS 保证,支持具有更多节点的无线高密度网络。

目前对于分簇算法的研究大多集中在图论,将微型基站抽象为点,家庭小区的干扰抽象为节点之间的边,干扰值抽象为权重。使用 MAX-K-CUT、K-means 等算法将图分解为多个子图,每个子图中的节点为一簇,选取某一节点为簇头,令簇头基站作为控制节点负责本簇资源调度以及其他控制信令发送。通过分簇,每个控制节点(簇头)只需处理本簇

表 4 几种资源分配算法性能对比

资源分配算法	适用场景	优点	缺点
优化算法 ^[13]	已分好簇的网络	支持全复用方式,资源利用率高. 使用优化算法能够得到较优的网络性能	复杂度较高,很难在高密度网络中实际应用,且很难解得最优解
自适应频率分配 ^[15]	使用正交频率分配,无层间干扰	复杂度很低,不需要过多运算,降低了各个节点的负担	性能较优化算法差;需要节点间交互大量信息,网络中需要集中控制节点
博弈算法 ^[16,18]	对网络无特殊要求,具有较强普适性	分布式算法,各小区可根据本地信息自主做出决策,不需要大量的信息交互,开销较小	使用博弈算法需注意平衡的存在性;由于缺乏充分的网络信息,难以使网络性能达到最优
注水算法 ^[17]	适用于各用户信道质量差别不大时	能够充分利用高质量的子信道增加网络容量	难以充分降低网络中的干扰水平且用户信道质量差异较大时将丧失公平性
增强学习算法 ^[19]	回程链路受限或小小小区无法与宏小区通信的网络	考虑了回程链路以及时延等实际问题,使小小小区在缺乏控制节点调度的情况下能够高度自治,根据网络情况自适应地做出反应	SBS 需估计附近宏用户的位置并据此估算自己到该用户的 SINR,增加 SBS 的负担同时估算的误差会影响算法的性能

内的调度问题,大大缩小了网络规模与需处理的运算量,提高了网络运行的效率与性能. 也有的分簇算法基于相似度,将 SBS 之间的距离^[20]或者信道增益^[21]定义为两个 SBS 之间的相似度,通过分簇使每一簇内所有节点之间的相似度最大,而后再进行簇内的资源调度与簇间的干扰协调.

一般分簇的思想可以分为两类. 一类是最大化簇内的干扰,使不同簇的节点之间尽可能零干扰,每簇的簇头负责协调本簇内的干扰,合理调度可用的频率资源,优化成员基站在各个子信道上的发送功率,最大程度地保证簇内成员的通信质量. 最后再进行簇间干扰的抑制,进一步降低层内干扰. 另一类分簇思想与之相反,是将相互之间干扰非常小的节点分为一簇,在资源调度时同一簇内的小区即使使用相同的子信道也不会发生强烈的干扰,而干扰较大的 FBS 对必须处于不同的簇中. 分簇之后只需给每一簇分配一个子信道即可.

Kianoush 等^[22]使用第 1 类思想提出了一种基于相似度的分簇策略,将两个基站之间路损的倒数定义为两小区的相似度,通过 max-sum 算法^[23]选出簇头,再进行分簇,使簇内相似度最大. 先假设每一簇都可以使用全部频率资源,每个簇头独立求解式(1)的优化问题,进行簇内的资源分配. 根据每簇的分配结果各个簇头协商簇间的频率分配,确定每簇实际可用资源,缓解簇间干扰.

使用分簇算法对网络进行分割,利用簇头进行资源分配,能够有效消除簇内干扰,但是簇间干扰仍为分簇技术中的一个难题. 簇间干扰的产生在于一

些小区可能与多个簇中的成员都存在干扰,但是在传统的分簇体系中,每个小区只允许参与到一个簇中,因此不可避免地与其他簇产生干扰. Zhang 等^[24]提出了允许一个小区参与多个簇,协调簇间与簇内干扰的分簇思想,使用合作博弈论建立了一个联盟形成博弈模型^[25],如图 3 所示. 每个小区允许加入多个簇,每个簇中的博弈者将自己的资源贡献出来形成资源池,博弈者按贡献度从簇中获取资源进行通信. 参与多个簇的小区将自己的频率分成几部分,分别贡献给不同的簇并同时从每个簇中获取一定的资源. 利用这种允许各个簇有交叉的分簇思想可以更有效地在簇间分配资源,避免簇间干扰.

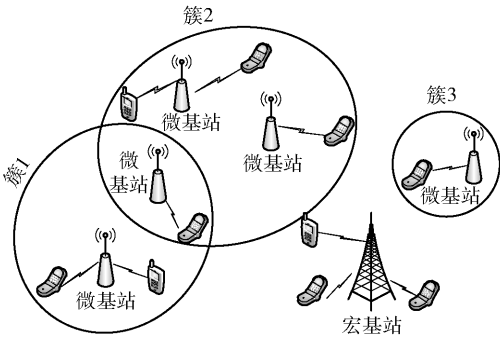


图 3 有重叠分簇系统示意图^[25]

Li 等^[20]使用第 2 类思想提出了一种以距离作为相似度的分簇算法,使簇内成员间距最大,保证簇内无干扰. 首先根据 SINR 门限计算出两个小区之间的门限距离,距离小于门限的两个小小小区被认为存在干扰,相互干扰的两小区之间有一条边,由此将网络拓扑抽象成一张图. 随后不断移除图中度最大

的点,直至图中只剩下一些孤立点,这些点之间不存在干扰,成为一簇. 将已分簇的点从原图中去掉,重复上述过程,直到将所有的节点都分好簇. 该算法可以有效消除盲区,保证大部分用户的正常通信.

随着业务种类越来越丰富,用户对于业务质量的要求也越来越高,QoS 成为网络调度中不可忽略的关键问题. 在文献[26]中,将需要 QoS 保证的用户纳入考虑范围,网络提供有 QoS 保证的业务与尽力交付(BE, best effort)业务两种级别的服务,用不同的资源约束条件为两类用户建立了优化模型. 首先尽量满足需要 QoS 保证的用户的资源分配,剩余

的资源用来优化 BE 用户的性能.

多数涉及分簇思想的资源调度方案都是以小小区为单位,对微型基站进行分簇. 与前面几篇文献不同,Pateromichelakis 等^[27]提出了对所有 SUE 进行分簇的算法. 每两个用户之间有一条边,边的权重由该边连接的两用户间的干扰决定. 该算法利用图论进行分簇,使每簇中的干扰之和最小,保证簇内的用户不存在较强干扰. 与大多数优化问题不同,每个用户的吞吐量都带有一个权重,可以通过调节每个用户的权重兼顾 QoS、用户优先级或公平性.

表 5 所示为几种干扰抑制主要策略的比较.

表 5 各种干扰抑制技术性能比较

主要策略	与宏基站协作	支持的小小区工作模式	复杂度	干扰种类	优点	缺点
资源分配	需要	封闭模式	较高	层内干扰、层间干扰	能够有效避免干扰,容易实现动态规划	在小小区高密度部署的场景下很难避免同频干扰的出现,基于优化算法的复杂度较高
功率控制	不需要	封闭模式、开放模式	较高	层内干扰、层间干扰	降低干扰同时提高能效	需要对信道干扰状况进行测量与信息交互,可能会恶化小小区用户性能
分簇	需要	封闭模式	较低	层内干扰	集中-分布式架构,有效平衡复杂度与性能	簇间干扰仍然是限制系统性能的重要因素

2.2 绿色通信

当今网络和网络业务的迅速扩展带来了巨大的能量和频谱消耗,日益严重的温室效应也成为了人类未来可持续发展的重要威胁,绿色越来越成为通信发展的追求. 目前对于绿色通信的研究,目标多为提高能效和降低干扰,最常用的手段有基站休眠以及 ABS 等.

2.2.1 基站休眠

在 IEEE 802. 16m 标准中,定义了一种家庭基站的低负载运行(LDO, low duty operation)模式,当在基站的覆盖范围内没有用户需要服务时,基站可以进入 LDO 模式. 在 LDO 模式中,基站交替性地处于休眠与探测状态. 在休眠状态中,基站的空口不可用;而在探测状态中,基站会探测在自己的覆盖区域内是否有激活用户出现,若有需要提供服务的用户,基站进入激活状态与用户取得连接. 类似于话音激活技术,在没有用户需要服务的时期,使基站进入休眠状态,减少不必要的功率损耗.

按照 IEEE 802. 16m 标准规定,即使在 LDO 模式中,基站也仍然有一定的时间处于探测状态,在没

有任何业务与用户的情况下消耗能量,为了压缩这一部分能量,文献[28]假设网络的拓扑结构为已知信息,基于地理位置对微型基站进行分簇并选出簇头,在 LDO 期间,只有簇头需要间歇性地进行新用户的探测,使得进入服务区的用户可以检测到这一簇基站的存在. 当簇头发现新用户时,根据用户的位置判断用户属于哪一个基站的覆盖范围,唤醒相应的基站. 经过改进,在业务很少时,只有簇头需要进行探测,而其他成员则节约了周期性探测所消耗的能量.

在后续的算法研究中,借用休眠与激活状态的概念,设计基站的 ON/OFF 策略,可以实现更灵活的基站控制. Luo 等^[29]在分簇网络中针对 burst 业务,利用 Stackelberg 博弈模型设计了一个基站休眠的动态决策方案,采取了类似于式(2)的思想,将基站 i 所服务的用户 u_i 的数据包传输时延 b_{in} 作为吞吐量的权重,意为传输的时延越大,被调度的优先级越高. 类似于资源分配中的二元变量,引入了一个二元向量 $\mathbf{x} = (x_i \in \{0, 1\})$ 表示基站 i 是否激活. 簇头作为博弈中的领导者,其收益函数为全网的吞吐量:

$$R_L = \sum_{i=1}^M b_{vi} \lg(1 + \gamma_{i,vi}) - \beta p x_i \quad (3)$$

而簇中的其他基站只用考虑本小区的吞吐量与能效:

$$R_L = b_{vi} \lg(1 + \gamma_{i,vi}) - \varphi \beta p x_i \quad (4)$$

其中: β 为成员基站能效系数, p 为发射功率, φ 为成员基站能效系数,由簇头决定,增大能效系数意味着小小区激活的概率减小,簇头可以根据网络的业务与干扰状况通过 φ 的选择来控制簇内小区的激活概率. Stackelberg 模型中所有博弈者分为两步行行动,首先簇头决策自己是否激活、进行用户选择以及确定能效系数;然后簇中其他小区根据簇头的决策决定自己的工作状态与服务用户.

2.2.2 ABS

在3GPP标准中,ABS是一个降低功率消耗,减少网络中干扰的重要手段.ABS通过配置广播/多播帧或者数据传输帧来实现,在广播/多播帧中,ABS只需要传输参考信号,而在几乎空白数据子帧中,除参考信号外还需传输同步、广播信息以保持基站与用户的基本连接^[30].无论在何种空白子帧中,都无需传输数据与控制信息,大大减少了基站消耗的能量,在空白子帧期间,对其他小区与用户的干扰也会大大降低.

对于ABS的研究目前多集中在数据子帧上,对于广播帧的研究较少.在ABS技术中,研究点主要集中在优化空白时间在整个子帧中所占的比例,得到最优的系统容量.Gao等^[31]针对标准中的ABS方案提出改进,设计了一种动态的ABS比例调整方案,在保证不过分恶化小小区用户性能的基础上改善宏小区边缘用户的性能.在该方案中,空白子帧的比例 δ 以步长 Δ 作为调整单位.微型基站首先从用户测量报告中收集信息,包括附近受到干扰的宏小区用户数量、SUE接收到的宏基站信号强度等,计算公平因子,若不满足门限,则按步长增减 δ ,搜索满足要求的空白帧比例.

在混合模式中,小小区附近的非授权宏小区用户允许接入小小区,使得一些原本接收到宏小区的参考信号强度(RSRP, reference signal receive power)优于附近微型基站的用户选择微型基站作为服务基站,扩大了微型基站的服务范围,但是这部分用户的SINR较差,在宏基站中配置ABS能够使这一部分脆弱用户在一定时间资源内获得较好的信道质量,有效提高混合模式下小小区分流负载的能力.

宏基站的ABS期间小小区为脆弱用户提供服务,而在宏基站传输正常帧时,小小区对本小区原有用户进行服务.

Vasudevan等^[32]研究了混合模式下的ABS空白时间优化问题,考虑了full buffer和burst两种业务,对于full buffer业务以最大化吞吐量和公平性为目标,对于burst业务以最小化发送数据所用的时间为目标,分别优化宏基站ABS的空白时间.Jin等^[33]将对数吞吐量作为优化目标,对系统进行了分析,并得出了ABS比例 δ 等于脆弱用户占得比例的结论.

2.3 网络选择

网络选择问题主要发生在混合与开放模式下,针对部分宏用户,选择最优的服务基站,使网络性能达到最优.网络选择也是解决UDN中用户移动性管理问题的重要手段.在非封闭模式中,允许非授权用户接入家庭基站进行通信,在高密度部署场景下,一个MUE可以从多个基站接收信号,用户可以自主地选择自己接入到哪层网络或哪个基站下,使自身获得最好的性能.在网络选择问题中,研究的重点通常在于网络选择或者切换的准则,使网络性能最优.在传统的研究中,用户多以接收信号的强度以及移动轨迹预测作为切换标准,但即使用户从某基站接收到的信号强度大,其也有可能因为该基站服务的用户数量过多而导致业务阻塞与性能损失,因此目前的研究转向直接以系统或用户吞吐量为目标,制定网络选择策略.

Fooladivanda等^[34]采用优化的思想,以比例公平,即对数吞吐量为优化目标,以二元变量 Γ_{ij} (表示用户 i 是否接入基站 j)与基站为用户提供服务的时间作为优化变量建立网络连接的优化问题.在全复用、部分复用及正交分配3种资源分配场景下,针对各场景不同的资源约束条件求解MUE的最佳基站选择方案,并证明了在服务时间的分配方面,基站在所服务用户之间平均分配服务时间是使网络性能最优的选择.

Lin等^[35]对小小区的3种工作模式(封闭、混合、开放)进行了对比与分析,并将问题建模为博弈模型.采用混合模式,将所有MUE按从宏基站与家庭基站接收到的RSRP分为两类:接收到宏基站的信号更强的用户直接接入宏基站,不参与博弈;从微型基站接收到的信号比宏基站强的用户根据接入不同网络的性能决定接入宏基站或微型基站.接入宏

小区时所有宏小区服务的用户均分时域资源,接入小小区的宏用户,根据小小区的开放度 $o \in [0, 1]$ (0 表示封闭模式, 1 表示开放模式), 均分小小区中 $(1 - o)$ 的时域资源. 所有博弈者根据不同策略所得到的吞吐量进行博弈, 对服务基站进行选择. 经过仿真对比, 得出了小小区容量在混合模式下达到最大而非封闭模式; 在开放模式下系统总容量最大, 且有更高的公平性.

但在文献[35]的算法中, MUE 在做出选择前必须知道各个基站拥有的资源以及所服务的用户数量才能计算对比接入不同的基站获得的吞吐量, 用户需要从各个基站收集用户与资源信息, 无疑增加了用户终端的负担及复杂度. Tseng 等^[36]利用非合作博弈与随机学习的方法提出了一个几乎不需要用户或基站收集与测量网络信息的网络选择算法, 使得每个用户可以完全独立地进行切换决策. 用户求解得到一个混合策略向量, 向量中的每个元素代表用户选择对应基站的概率. 在每一时刻, 用户根据当前的混合策略按概率选择下一时刻的服务基站. 利用随机学习算法, 用户只需要根据当前的决策与历史收益信息增加或减少选择当前基站的概率, 更新决策向量.

2.4 开放私有小区

微型基站存在 3 种工作模式, 即封闭、混合和开放. 在当前的网络部署中, 存在着相当数量的私有小区, 这些小区的所有者通常将基站设置为封闭模式. 在非开放模式下, 小小区与宏小区在某种程度上是相互冲突相互干扰的. 同时, 小小区拒绝或限制附近 MUE 的接入, 也会影响小小区为宏小区负载分流的功能. 给小小区适当的激励, 促使小小区将自己的一部分资源共享出来, 也是减少层间干扰, 提高资源利用率和提高负载分流的重要方案.

最传统的思路是私有小区利用自己的资源为附近的宏小区用户提供服务, 宏用户或运营商根据小小区贡献出的资源或提供的服务以付费或者提供授权更多资源的形式向小小区的所有者进行补偿, 激励小小区将自己的资源贡献出来. 小小区根据运营商或宏用户的付费以及本小区中的业务量与干扰情况, 决定资源贡献量, 即决策本小区的开放率. 收费的标准一般有按频率收费、按吞吐量收费以及按服务的 MUE 数量收费等. 在这个过程中宏基站与小小区的决策相互影响, 二者各自追求利益的最大化, 是一个天然的博弈过程, 很适合用博弈论对这类问

题进行建模.

Yang 等^[37]使用 Stackelberg 博弈模型, 建立了运营商与小小区之间的博弈, 运营商对每个小小区共享的资源 s_i 进行相应的补偿 r_i , 并引入了经济学弹性的概念, 将各小小区的弹性 $(\frac{s_i}{r_i})$ 之和作为运营商的收益函数模型. 运营商的目标是以最小的成本激励各微型基站共享更多的资源, 而小小区博弈的目标为确定合适的共享资源比例, 使自己的收益最大. 可以使用后向推断与最优反应函数求解该问题.

与文献[37]不同的是, 文献[38]除了在基站侧 (包括微型基站与宏基站) 进行博弈和决策外, 还允许用户自主选择接入哪个小小区, 将网络选择过程建立成了一个演化博弈. 博弈模型分为两阶段: 首先所有用户进行演化博弈, 选择接入的基站, 得到用户的状态分布; 然后进行高阶博弈, 建立了 Stackelberg 微分博弈模型, 讨论宏基站和微型基站决策的动态过程. 宏基站决定提供的补偿费用, 小小区据此进行开放率的决策.

但是, 上述两个算法忽略了在小小区由封闭模式转变为混合模式的过程中, 网络中的干扰控制问题. 另外, 除了单纯以价格因素作为激励之外, 宏小区可以授权微型基站更多的资源, 供其为 MUE 提供服务使用, 同时还可以使微型基站获得额外的资源传输本小区用户的信息, 降低其在为 MUE 服务时所付出的性能成本. Hamouda 等^[39]设计了一种综合考虑层间干扰与负载分流的激励模式. 在该场景下小小区需要向宏小区租用频率来服务自己的用户, 因为频率的复用, 小小区对附近的宏用户产生干扰, 将小小区租用的资源数量作为反映干扰的一个参量. 宏小区把一部分受干扰的 MUE 切换到微型基站下, 提升 MUE 的性能. 在价格方面, 微型基站租用频率的单价与其所用的频率成正比, 与服务的 MUE 数量成反比, 来激励小小区为更多的 MUE 提供服务.

文献[40]中除了限制网络干扰外, 还支持为宏小区用户提供不同 QoS 级别的业务, 针对不同的服务设计了不同的收费方式. 小小区在保证本小区原有用户性能的基础上, 为 MUE 提供有 QoS 保障的服务与 BE 服务. 对有 QoS 保证的用户, 以接入的 MUE 数量为单位进行收费; 而对 BE 用户, 微型基站以为 MUE 提供的吞吐量为单位进行收费.

2.5 系统性能分析

传统通信系统最经典的网络模型就是描述宏小区结构的六边形蜂窝模型。蜂窝模型大大简化了单层网络的仿真与计算分析。但在 UDN 异构组网中, 每一层网络的基站有不同发射功率、不同天线高度、不同的密度以及不同的数据速率等, 发射节点的多样化、网络层次与架构的复杂化以及部署不规则化为 UDN 建模与性能分析带来了极大的挑战。基于网络拓扑的不规则化, 随机几何成为模拟与分析小小区网络的有效工具。Dhillon 等^[41]利用随机几何对 K 层网络进行了精确建模。随机几何理论将基站与用户建模为泊松随机点过程 (SPPP, stochastic Poisson point process); 假设小小区密度为 λ , 则在面积为 A 的区域中基站数量为 k 的概率为

$$P(N(A) = k) = \frac{e^{-\lambda|A|}(\lambda|A|)^k}{k!} \quad (5)$$

在该区域中, 基站的分布服从均匀分布, 如图 4 所示。

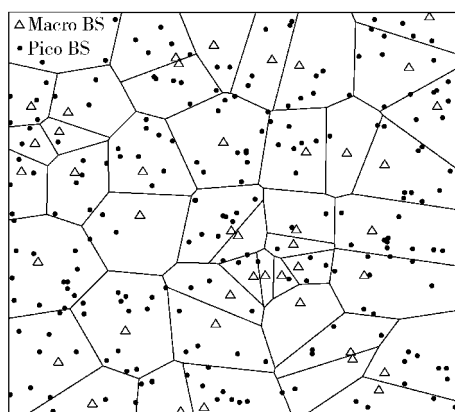


图4 服从 SPPP 的网络分布

基站与用户都可以建模为 SPPP 模型, 再借助 Slivnyak 定理、Campbell 定理、拉普拉斯变换等数学工具, 将几何积分与泊松过程相结合, 可以简单而精确地对网络的接入控制、频谱效率、系统吞吐量、能耗、平均比特率等进行分析。

目前大多数基于 SPPP 的性能分析假设小小区在区域内均匀分布, 但事实上, 在宏基站附近的中心区域内, 由于宏基站发射功率大, 信号衰减小, 用户能够获得较好的性能; 且当小小区位于宏基站附近时, 其覆盖面积也会有所减小, 提供的 QoS 与负载分流性能并不好^[42]。相对于中心区域, 宏小区的边缘更需要小小区对宏基站的服务进行补充, 在实际的部署中, 小小区在宏小区中的分布很可能是不均

匀的。Wang 等^[43]对这种小小区非均匀部署的网络性能进行了分析。假设宏小区的分布密度为 λ_1 , 在以宏基站为中心, 半径为 D 的内部区域中没有小小区部署, 只在外部区域使用家庭基站, 其密度为 λ_2 , 用户处于外部区域的概率为 P_{outer} , 基于随机几何理论, 家庭基站服从泊松过程, 则在整个区域中小小区的等效密度为

$$\lambda'_2 = \lambda_2 P_{\text{outer}} \quad (6)$$

利用各层网络基站与用户数量的分布密度, 作者对两层网络以及小小区层内部与外部区域的覆盖率、以及单用户吞吐量等性能进行了推导分析。使用这种小小区非均匀分布的部署方案, 网络的能耗与部署成本大大降低, 而系统的吞吐量尤其是低速率用户的性能却不会受到损害。

除了网络拓扑, 多址接入、双工方式、混合自动重传请求 (HARQ, hybrid automatic repeat request) 等许多因素对小小区网络性能的影响都有待于深入的研究。目前大多数文献仍直接基于香农公式对网络吞吐量进行建模, 但香农公式是在理想情况下达到的最大容量, 忽略了系统中用户由于多址接入只能获得部分时频资源以及由于传输失败而进行的 HARQ 重传过程等因素, 对实际异构网络的建模分析还有很长的路要走。

Stefanatos 等^[44]考虑了多址接入等因素的影响, 在时分多址 (TDMA, time division multiple access) 与 TDMA/FDMA 多址接入系统中提出了单用户的容量修正公式。假设系统有 N 个子带, 在 TDMA 方式下, 用户时分复用系统中的资源。在 TDMA/FDMA 方式下, 每 N 个用户分成一组, 每组中的用户分配不同的子带。若有多个用户分配到相同的子带, 则这些用户进行时分复用, 否则用户可以在全时域上进行通信, 如图 5 所示。再考虑用户传输失败的情况, 修正后用户单位时间单位频率上的吞吐量为

$$R_n = \mathbf{1}\{\gamma > \theta_0\} \frac{\bar{R}_n}{L_n} \quad (7)$$

其中: \bar{R}_n 为单位频带上用户的吞吐量, 即用香农公式计算得到的吞吐量; L_n 为与用户进行时分复用的用户数量, 即在时域分得的资源比例; $\mathbf{1}\{\gamma > \theta_0\}$ 表示若用户的 SINR 满足门限则表达式的值为 1, 否则表达式的值为 0 (表示会发生丢包或误码, 并未进行有效传输)。

2.6 其他技术与小小区的结合

从表 1 中可看出单纯依靠某一种技术给网络带

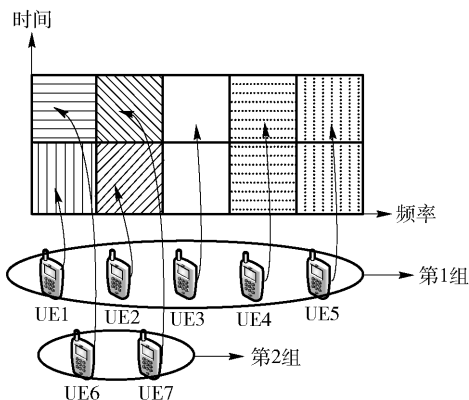


图5 TDMA/FDMA 多址接入示意图

来的性能提升还远远达不到“1000x”的目标,只有与多种技术结合,优势互补,才能获得性能的倍增。

2.6.1 MIMO

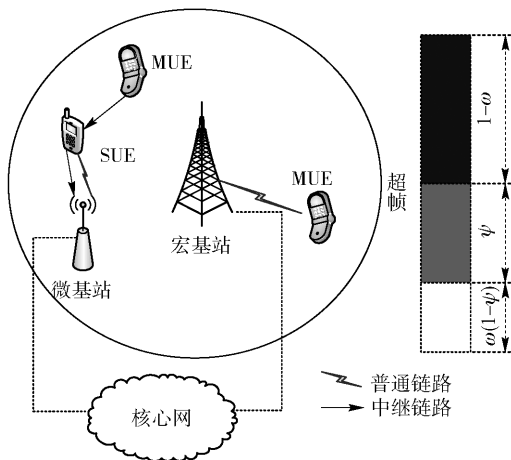
MIMO 是一种利用多根发送与接收天线,引入空间自由度,利用空时编码、传输分集、波束赋形来提高系统容量,增强传输可靠性的技术。目前大多数研究中的家庭基站仍为传统的单天线基站,若将微型基站配置为多天线,则系统可以更灵活地利用空间与时间自由度进行资源调度,对抗干扰,优化网络性能。Pantisano 等^[45]将 UDN 与 MIMO 系统结合,联合利用频域与空域上的自由度,使用干扰对齐 (IA, interference alignment) 技术,在限制层间干扰水平的基础上解决层内干扰的问题。IA 利用合适的码本把干扰转移到相互正交的子空间上,使接收信号与干扰正交,从而减少干扰信号对有用信号的影响。Guruacharya 等^[46]则基于 MIMO 基站协作的思想将网络 MIMO 技术引入到了 UDN 中。在网络 MIMO 技术中,多个 MIMO 基站形成协作簇,共同为簇中的用户提供服务。两个相邻的微型基站进行协作,簇中的用户联合利用与两个基站之间的两条链路信息计算出信道时延指标与信道质量指标,反馈给其服务基站,服务基站将该信息与其他协作基站共享,各基站根据用户的反馈选择合适的码本。网络 MIMO 技术可以将相邻小区对本小区用户的干扰转化为有用信息,有效抑制层内干扰。

2.6.2 中继

UDN 中中继的基本思想有两种:将 SUE 作为 MUE 的中继,通过微型基站将 MUE 的信息转发到核心网,这种技术也叫速率分割;或者在几个 SUE 之间选择一个作为这一簇用户的中继向基站发送信息。使用中继技术可以减少系统中向基站发送信息

的用户,既节能又减少了系统中的干扰和资源需求量,在网络业务量较少时具有更显著的优势。

Pantisano 等^[47]提出了一种以额外资源激励 SUE 为 MUE 提供中继服务,抑制上行层间干扰的方案。为了抑制 MUE 与 SUE 的干扰,MUE 选择与其有干扰的 SUE 进行协商,将自己超帧中一部分传输时间作为回报允许 SUE 传输自己的数据。如图 6 所示,SUE 为 MUE 转发数据时, $(1-\omega)$ 的时间用于接收 MUE 的数据,剩下 ω 的帧长由 SUE 发送数据,其中的 ψ 部分 SUE 向 FBS 转发 MUE 的重传数据,而其余 $(1-\psi)$ 部分作为从 MUE 处获得的回报,SUE 可以传输自己的数据。当 MUE 发生重传时,信道质量较差,在该方案中,MUE 与附近有干扰的 SUE 建立 D2D 链路。MUE 与 SUE 相距很近,D2D 链路的质量远好于 MUE 与宏基站之间的链路,同时也消除了小小区对 MUE 的干扰,大大提高了传输成功率。

图6 小小区用户中继示意图^[47]

在第 1 种中继方式下,MUE 的数据经 SBS 通过回程链路传递给宏基站或核心网,文献[47]只考虑了用户 u 到服务基站 s 之间的链路容量 $R_{u,s}$,却忽略了回程链路的容量限制。文献[48]综合考虑了回程链路与空口容量,对整个中继链路的容量模型进行了改进。设宏基站编号为 0,系统中共有 N 个子信道,SBS 将 MUE 的数据直接通过无线回程链路转发给宏基站,家庭基站与宏基站间的回程链路容量为

$$R_{s,0} = \sum_{n=1}^N \lg(1 + \gamma_{s,0}^n) \quad (8)$$

其中 $\gamma_{s,0}^n$ 为家庭基站 s 与宏基站在子信道 n 上的 SINR。那么中继链路的容量为

$$R = \min \{ R_{u,s}, R_{s,0} \} \quad (9)$$

随着感知技术以及物联网的发展,今后的通信

不止局限在人与人(H2H, human to human)之间,各种机器以及感知节点之间的通信会在通信系统中占据越来越重要的地位。大部分文献中的研究对象都是H2H之间的通信,而Niyato等^[49]以机器与机器(M2M, machine to machine)设备作为对象,研究了在异构网络下的中继问题。在小小区中,存在H2H与M2M两类用户,H2H设备采用非竞争的随机接入,可以周期性地获得时频资源,而M2M设备采取竞争性随机接入方式,使用H2H设备空闲的前导进行通信。安装有短距离发射机的M2M设备可以形成协作簇,从中选出一个设备充当中继,负责存储与发送协作簇中用户的数据,中继把接收到的其他用户的数据包连同自己产生的数据包一起储存在自己的队列中。每个簇只有中继需要向基站发起随机接入,大大减少了随机接入过程中的碰撞率,同时节约了能源。

2.6.3 认知技术

认知无线电技术赋予了基站或用户探测周围环境的能力,将认知技术应用到Small Cell网络UDN中,使得家庭基站可以探测与交换链路信息以及干扰状况,通过感知相邻小区^[50]或宏用户^[51]所使用的频率,在资源调度时避开与它们冲突的频率,避免层内或层间干扰的产生。基站还可以通过感知上行链路的能量探测到附近的激活用户情况,从而决定是否进入休眠状态^[52]。

通过感知基站可以获得附近的干扰以及网络拓扑信息,基于已知的网络信息,基站可以采取相应的对策,减少网络中的干扰。但是传统的感知策略感知范围有限,基站没有能力处理与感知范围以外小区之间的干扰。Liang等^[53]提出了一种传统感知+移动感知的策略,扩大基站的感知范围。移动感知的核心思想是当移动台在移动的过程中发生小区切换后,周期性地将上一小区的网络连接信息(如基站的MAC地址、IP地址、ID等)进行广播,收到广播的小区可以根据其中的小区信息构建与更新自己感知到的网络拓扑,借助用户的移动性使基站能够获得更广阔空间内的网络拓扑。

3 技术挑战与发展方向

3.1 分布式与自适应的网络架构

对于高密度网络,由于多种异构节点的密集分布,大量基站节点与业务连接要求中心控制节点收集海量信息,进行复杂的运算,在高密度部署的网络

结构下,集中式控制的可行性大大降低。高密度网络中存在许多由家庭或企业用户自行添加的基站,有相当数量的小区无规划地自由分布在网络中,它们的部署并未将网络需求和相邻小区干扰统筹考虑,很可能会降低整个网络的性能。同时,由于家庭小区热插拔的性质,网络中的微型基站可以随时根据用户的需要安装或关闭,或者小小区的故障与修复都会引起网络拓扑的改变。这些即插即用的低功率发射节点,位置部署灵活,随意性强,也给运营商的指挥与管控带来了更大的压力。

集中式算法的运算量与复杂度使得控制节点的处理时间超出可行范围,由各个家庭基站或用户自主收集所需网络信息进行资源调度或者进行连接决策的完全分布式网络架构应当是今后UDN技术发展的重要方向之一。

降低集中式算法复杂度的手法比较多见的有各种启发式算法以及博弈论等。启发式算法相对于集中式算法可以大大降低处理的复杂度,但是启发式算法通常需要多次迭代,其收敛性不一定能得到保证,而且容易陷入局部最优解。网络中的基站或用户竞争有限的资源,期望使自己获得最优的性能,博弈论的思想非常适合模拟各个基站的这种相互作用。在博弈论中,博弈者们自主收集所需信息,综合自己的各种性能指标确定收益,根据网络状况采取最优的策略,最大化自身收益。使用博弈论很易于在网络中形成分布式的算法,同时也赋予了各个小小区自适应地根据网络环境做出相应决策的能力。

3.2 回程链路的限制

现有的大部分研究是在用户设备到基站这段链路上,没有考虑基站到核心网之间的回程链路。回程链路可以是无线的,也可以是有线的,但是其容量都是有限的。目前,回程链路的容量已经成为了网络的瓶颈^[54]。同时,回程链路也是有时延的,这就影响了各小区之间信息交互的实时性,导致了每个小区无法及时获取到相邻小区的决策与信息。而许多技术如感知、中继以及分布式架构中的信息交互都需要通过回程链路实现基站与基站或基站与核心网之间的协作。基站对于网络信息的不完全或不准确收集将会导致决策失误,恶化系统性能,而信息的延时意味着在任意时刻,基站或用户只能根据历史信息进行决策,无法及时地适应当前的网络状况,严重影响了系统的性能。

解决回程问题,其中一种思想是允许数据通过

多种网络,如利用 WiFi 和蜂窝传输,使流量分流道多个回程链路上,或者将数据发给多个中继,接收成功的中继继续进行转发来对抗回程的衰落^[54]。

目前从根本上解决回程链路时延限制问题的研究不多,减小回程链路时延对网络带来不利影响的一种思路是对算法进行合适的设计,减少小小区之间的相互依赖,使每个节点能够只根据自身的历史或历史信息做出决策。一些学习算法(如 reinforcement learning、regret based learning 等)在这方面有着很大的优势。学习算法可以使各个节点只根据自己的历史决策与历史收益判断与更新自己的决策向量,减少了对外部信息,尤其是外部实时信息的依赖,既减少了网络开销,又弱化了回程链路对网络性能的限制。

3.3 能量捕获通信

在当今温室效应成为全球的关注点与能源短缺、能源价格不断攀升的背景下,减少通信过程中的能量消耗,提高能源利用率成为了通信中的重要课题。大多数研究的着眼点在减小数据发送的功率与提高能效上。在提倡新能源的背景下,绿色通信应该跳出传统能源的圈子,更多地思考如何将新能源的使用建模到通信背景当中。同时,绿色通信的研究指标也应由能效转变为能量的可持续利用。

能量捕获^[55]作为近年来新兴的技术,能够将空间中蕴含的能量收集起来,经过处理变为可以再次使用的电能。能量捕获使基站可以从空间无处不在的电磁信号中提取与积累可用的能量,实现自充电,大大降低了对传统能源的供电依赖,是实现绿色通信,提高网络能效最具有前景的技术手段之一。

3.4 移动性管理

随着网络中发射节点功率与覆盖半径的降低,用户的移动将会使移动台在短时间内移出微型基站的服务区域,在半径小于 100 m 的小小区中,移动速度为 30km/h 的用户将会在几秒中内移出该小区,在 UDN 中用户面临着频繁的切换。同时,由于微型基站的密集分布,用户附近同时存在多个覆盖范围以及接入模式各异的服务节点,用户的选择更为复杂与多样化。在这种场景下,怎样使用户或服务基站快速准确地做出最优的选择,成为移动性管理中的核心问题。

研究的关键在于切换准则的设计,使吞吐量、掉话率、公平性等网络性能尽可能最优。传统的切换策略以 RSRP 作为参考指标,但考虑到用户数量、业

务类型等多种因素,单纯的 RSRP 已不能良好地反映用户接入基站下的性能,应当把视角转向综合考虑用户 QoS、时延、能耗、数据速率以及网络密度等参数的切换准则。

各种网络选择算法是解决 UDN 下用户在移动状态中进行切换与基站选择的有力工具。在网络选择中使用学习算法可以降低信息收集量及运算复杂度,但是在学习过程中需要对各种策略进行试验,不断进行网络选择,从而频繁地触发切换事件。对学习过程进行改进使其快速收敛,可以更好地发挥学习算法的优势。

3.5 QoS 向体验质量的演进

当今移动通信的服务对象趋于多样化,面临各式各样的业务需求,用户与业务都呈现出多样化与异构化的特征。各种服务提供商必须保证能够提供高质量的服务才能在对市场与用户占有率的激烈竞争中取得优势。目前应用最广的指标为 QoS 指标,包括吞吐量、丢包率、时延、掉话率、抖动等硬性参数,QoS 指标可以客观反映服务质量,但是却无法表征每个用户对服务的主观感受与需求。用户体验质量(QoE, quality of experience)概念的提出是对 QoS 研究的深化与改进,它综合考虑了用户所处的环境状况、设备条件以及用户的个人偏好,以用户为着眼点提供个性化与人性化服务^[56]。

目前将 QoE 概念应用到 UDN 中的研究还不成熟,大部分关于 UDN 的研究仍基于 QoS 指标进行。QoE 的引入对 UDN 有何性能影响,如何在以 QoE 为目标的服务场景下优化网络的资源调度都是待解决的基本问题。UDN 环境复杂,用户所处环境及所持设备不同,其需求也更加多样化。对于信道状况好但对资源需求低以及信道质量差但对资源需求高的用户,传统的资源分配无法满足用户不同的 QoE 需求,同时造成资源浪费。问题的关键在于收集用户的环境、设备、网络、位置等信息,定义用户的 QoE 评价指标并据此估计用户的无线资源需求,作为 QoE 的需求因子,再综合用户的信道质量等网络客观情况,对系统性能进行建模。

QoE 的兴起与发展将对 QoS 的研究又向前推进一步,在服务提供的过程中更多地考虑用户的主观感受,提供更加人性化的服务,为 UDN 技术的研究带来了新的挑战与发展前景。

4 结束语

通信系统以及智能终端的迅速发展使用户对于

通信网络容量的需求呈现爆炸式增长,UDN 以其在提升网络吞吐量与资源利用率方面的优良性能成为未来 5G 通信中不可或缺的关键技术。笔者系统地介绍了 UDN 的网络架构及其技术挑战,整理与总结了 UDN 技术各种挑战的解决思路以及最新的研究成果,并对 UDN 领域中的进一步研究做了展望。

参考文献:

- [1] Cisco Incorporated. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019 White Paper [EB/OL]. the United States: Cisco Inc, 2015 [Mar, 2015]. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html.
- [2] Qualcomm Incorporated. The 1000x data Challenge[EB/OL]. the United States: Qualcomm Inc, 2013 [Mar, 2015]. <http://www.qualcomm.com/1000x/>.
- [3] Andrews J G, Buzzi S, Choi W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065 - 1082.
- [4] Mansfield G. Femtocells in the US market-business drivers and consumer propositions [J]. FemtoCells Europe, 2008: 1927-1948.
- [5] Hwang I, Song B, Soliman S S. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 20-27.
- [6] Ngo H Q, Larsson E G, Marzetta T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [7] Duarte M. Full-duplex wireless: design, implementation and characterization [D]. Huston: Rice University, 2012.
- [8] Baldemair R, Dahlman E, Parkvall S, et al. Future wireless communications [C] // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden: IEEE, 2013: 1-5.
- [9] 3GPP, TS 36. 300-2012. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 11) [S]. France: 3GPP, 2012: 1-183.
- [10] Xu Jing, Wang Jiang, Zhu Yuanping, et al. Cooperative distributed optimization for the hyper-dense small cell deployment[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 61-67.
- [11] Saquib N, Hossain E, Le L B, et al. Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches [J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 86-95.
- [12] Wu Yi, Zhang Dongmei, Jiang Hai, et al. A novel spectrum arrangement scheme for femtocell deployment in LTE macro cells [C] // 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Tokyo: IEEE, 2009: 6-11.
- [13] Abdelnasser A, Hossain E. Subchannel and power allocation schemes for clustered femtocells in two-tier OFDMA HetNets [C] // 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Sydney: IEEE, 2013: 1129-1133.
- [14] Yan Ruya, Zhang Guomei, Li Bin, et al. An effective semi-static interference coordination scheme for wireless cellular systems [C] // 2013 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). [S. l.]: IEEE, 2013: 1-6.
- [15] Wu Yi, Jiang Hai, Zhang Dongmei. A novel coordinated spectrum assignment scheme for densely deployed enterprise LTE femtocells [C] // 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama: IEEE, 2012: 1-6.
- [16] Bennis M, Perlaza S M, Blasco P, et al. Self-organization in small cell networks: a reinforcement learning approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3202-3212.
- [17] Shen Siduo, Lok T M. Dynamic power allocation for downlink interference management in a two-tier OFDMA network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(8): 4120-4125.
- [18] Al-Zahrani A Y, F. R Yu, Huang Minyi. A distributed interference control scheme in large cellular networks using mean-field game theory [C] // 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). London: IEEE, 2013: 3339-3343.
- [19] Galindo-Serrano A, Giupponi L. Self-organized femto-to-macro interference coordination with partial information [C] // 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops). London: IEEE, 2013: 111-116.
- [20] Li Hongjia, Xu Xiaodong, Hu Dan, et al. Graph method based clustering strategy for femtocell interference management and spectrum efficiency improvement [C] // 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). Chengdu: IEEE, 2010: 1-5.

- [21] JuangRong-Terng, Ting Pangan, Lin Hsin-Piao, et al. Interference management of femtocell in macro-cellular networks [C] // Proceedings of the 9th conference on Wireless Telecommunications Symposium. [S. 1.]: IEEE, 2010: 132-135.
- [22] Hosseini K, Dahrouj H, Adve R. Distributed clustering and interference management in two-tier networks [C] // 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). California: IEEE, 2012: 4267-4272.
- [23] Kschischang F R, Frey B J, Loeliger H A. Factor graphs and the sum-product algorithm [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 498-519.
- [24] Zhang Zengfeng, Song Lingyang, Han Zhu, et al. Coalitional games with overlapping coalitions for interference management in small cell networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2659 - 2669.
- [25] Saad W, Han Zhu, Debbah M, et al. Coalitional game theory for communication networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(5): 77-97.
- [26] Hatoum A, Langar R, Aitsaadi N, et al. QoS-based power control and resource allocation in OFDMA femto-cell networks [C] // 2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). California: IEEE, 2012: 5116-5122.
- [27] Pateromichelakis E, Shariat M, Quddus A, et al. Dynamic clustering framework for multi-cell scheduling in dense small cell networks [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1802-1805.
- [28] Widiarti H, Pyun S, Cho D. Interference mitigation based on femtocellsgrouping in low duty operation [C] // 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Ottawa: IEEE, 2010: 1 - 5.
- [29] Luo Zhe, Ding Ming, Luo Hanwen. Dynamic small cell on/off scheduling using stackelberg game [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1615 - 1618.
- [30] Tsolkas D, Passas N I, Merakos L F. Alleviating control channel interference in femto-overlaid LTE-advanced networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(10): 192-200.
- [31] Gao Liqi, Tian Hui, Tian Peng, et al. A distributed dynamic ABS ratio setting scheme for macro-femto heterogeneous networks [C] // 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Budapest: IEEE, 2013: 1221 - 1225.
- [32] Vasudevan S, Pupala R N, Sivanesan K. Dynamic eICIC-aproactive strategy for improving spectral efficiencies of heterogeneous LTE cellular networks by leveraging user mobility and traffic dynamics [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 4956-4969.
- [33] JinYinghao, Qiu Ling. Joint user association and interference coordination in heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 2296-2299.
- [34] Fooladivanda D, Rosenberg C. Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 248-257.
- [35] Lin Jia-Shi, Feng Kai-Ten. Femtocell access strategies in heterogeneous networks using a game theoretical framework [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1208-1221.
- [36] Tseng L. C, Chien F. T, Zhang Daqiang, et al. Network selection in cognitive heterogeneous networks using stochastic learning [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(12): 2304-2307.
- [37] Yang Yufei, Quek T Q S. Optimal subsidies for shared small cell networks-asocial network perspective [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(4): 690-702.
- [38] Zhu Kun, Hossain E, Niyato D. Pricing, spectrum sharing, and service selection in two-tier small cell networks: a hierarchical dynamic game approach [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(8): 1843-1856.
- [39] Hamouda S, Zitoun M, Tabbane S. Win-win relationship between macrocell and femtocells for spectrum sharing in LTE-A [J]. IET Communications, 2014, 8(7): 1109-1116.
- [40] Yang Yufei, Quek T. Q. S, DuanLingjie. Backhaul-constrained small cell networks: refunding and QoS provisioning [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(9): 5148 - 5161.
- [41] Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of k -tier downlink heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550-560.
- [42] Jo H. S, Sang Y. J, Xia Ping, et al. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3484-3495.
- [43] Wang He, Zhou Xiangyun, Reed M C. Coverage and

- throughput analysis with a non-uniform small cell deployment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 13(4): 2047 - 2059.
- [44] Stefanatos S, Alexiou A. Access point density and bandwidth partitioning in ultra-dense wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 62(9): 3376 - 3384.
- [45] Pantisano F, Bennis M, Saad W, et al. Improving macrocell-small cell coexistence through adaptive interference draining[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 942-955.
- [46] Guruacharya S, Niyato D, Bennis M, et al. Dynamic coalition formation for network MIMO in small cell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 5360-5372.
- [47] Pantisano F, Bennis M, Saad W, et al. Spectrum leasing as an incentive towards uplink macrocell and femto-cell cooperation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 617-630.
- [48] Samarakoon S, Bennis M, Saad W, et al. Backhaul-aware interference management in the uplink of wireless small cell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(11): 5813-5825.
- [49] Niyato D, Wang Ping, Kim D I. Performance modeling and analysis of heterogeneous machine type communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2836 - 2849.
- [50] Zhang Lu, Yang Lin, Yang Tao. Cognitive interference management for LTE-A femtocells with distributed carrier selection[C]//2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall). Ottawa: IEEE, 2010: 1-5.
- [51] Ning Gang, Yang Qinghai, Kwak K. S, et al. Macro-and femtocell interference mitigation in OFDMA wireless systems[C]//2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). California: IEEE, 2012: 5068-5073.
- [52] Wildemeersch M, Quek T Q S, Slump C H, et al. Cognitive small cell networks: energy efficiency and trade-offs[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(9): 4016-4029.
- [53] Liang Huiguang, Kim H S, Yeow W L, et al. So near, and yet so far: managing far-away interferers in dense femtocell networks[C]//2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). California: IEEE, 2012: 5110-5115.
- [54] Liu Yongkang, Cai L. X, Shen Xuemin, et al. Deploying cognitive cellular networks under dynamic resource management [J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 82 - 88.
- [55] He Yejun, Cheng Xudong, Peng Wei, et al. A survey of energy harvesting communications: models and offline optimal policies [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 2-8.
- [56] Wang Ying, Li Peilong, Jiao Lei, et al. A data-driven architecture for personalized QoE management in 5G wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, accepted.