

第五代移动通信系统 5G 标准化展望与关键技术研究

周一青¹ 潘振岗² 翟国伟¹ 田霖¹

(1. 北京市移动计算与新型终端重点实验室, 中国科学院计算技术研究所, 北京, 100190; 2. 中国移动研究院, 北京, 100053)

摘要: 随着第四代移动通信系统(The fourth generation mobile communication system, 4G)长期演进技术(Long term evolution, LTE)在全球商用的成功展开和移动数据的爆发式增长, 对第五代移动通信系统(The fifth generation mobile communication system, 5G)的研发提上日程。本文首先分析了 5G 发展的两个驱动力, 介绍了国际电联(International telecommunication union, ITU)对 5G 标准化的规划和最新进展, 总结了通信业界与学术界公认的 5G 关键技术, 并对其中的无线网络相关技术, 超密集蜂窝(Ultra dense cellular network, UDN)和集中式蜂窝架构的研究进行了深入的分析介绍。最后总结了 5G 的发展趋势和未来的研究动向。

关键词: 5G; 标准化; 超密集蜂窝; 集中式蜂窝架构; 通信与计算融合

中图分类号: TN915 **文献标志码:** A

Standardization and Key Technologies for Future Fifth Generation of Mobile Communication Systems

Zhou Yiqing¹, Pan Zhengang², Zhai Guowei¹, Tian Lin¹

(1. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. China Mobile Research Institute, Beijing, 100053, China)

Abstract: As the long term evolution (LTE) of the fourth generation mobile communication system (4G) is successfully commercialized globally and mobile data are increased explosively, the research and development on the fifth generation of mobile communication system (5G) become the focus of both industry and academia. Here, the two drivers to develop 5G are firstly analyzed. Then the international telecommunication union (ITU) timeline for global standardization of 5G is presented and the most recent updates are described. Subsequently, widely recognized key technologies for 5G are presented. Specifically, key wireless network technologies, including the ultra dense cellular network (UDN) and the centralized radio access network, are described in detail. Finally, conclusions are drawn and open problems are discussed.

Key words: 5G; standardization; ultra dense cellular network; centralized radio access network; convergence of communication and computing

1 5G 发展背景:两个驱动力

近年来,第五代移动通信系统(The fifth generation mobile communication system,5G)成为通信业界和学术界探讨的热点。5G 的发展主要有两个驱动力。一方面以长期演进技术(Long term evolution,LTE)为代表的第四代移动通信系统(The fourth generation mobile communication system,4G)已全面商用,对下一代技术的讨论提上日程;另一方面,移动数据的需求爆炸式增长,现有移动通信系统难以满足未来需求,亟需研发新一代 5G 系统。

目前 LTE 系统已在全球范围内得到高速的发展,据全球移动供应商联盟(The global mobile supplier association,GSA)统计^[1],截至 2015 年 4 月,全球有 138 个国家 393 个运营商已经提供了 LTE 商用业务,有 39 个国家的 64 个运营商更提供了增强型 LTE(LTE-Advanced,LTE-A)商用业务。LTE 的用户在 2014 年底达到 4.97 亿,增速超过以往任何一代移动通信系统。中国早在 2013 年底就向中国移动、中国联通和中国电信正式颁发了分长期演进技术(Time division duplex-LTE,TD-LTE)经营许可,三大运营商获得的频段如表 1 所示。中国大力支持发展的 TD-LTE 技术在全球范围内也有良好发展,目前共有 34 个国家的 54 个运营商提供了 TD-LTE 商用服务。其中部分运营商由于原来的移动网络就是基于 TDD(分时)技术的,比如全球微波互联接入(Worldwide interoperability for microwave access,Wimax),因此相比分频长期演进技术(Frequency division duplex-LTE,FDD-LTE),更容易升级到 TD-LTE 系统。另外也有部分 FDD-LTE 运营商同时建设了 TD-LTE 网络来进一步增强其移动宽带网络能力。随着 LTE 在全球成功展开商用化,业界和学术界开始考虑下一代 5G 技术的研发。

表 1 LTE 频谱分配

Table 1 Spectrum allocation for LTE

运营商	LTE 频谱/MHz	总带宽/MHz
中国移动	1880~1900,2320~2370,2575~2635	130
中国联通	2300~2320,2555~2575	40
中国电信	2370~2390,2635~2655	40

除了 LTE 成功商用的推动,5G 的发展也来自于对移动数据日益增长的需求。随着移动互联网的发展,越来越多的设备接入到移动网络中,新的服务和应用层出不穷,全球移动宽带用户在 2018 年有望达到 90 亿,到 2020 年,预计移动通信网络的容量需要在当前网络容量的基础上增长 1 000 倍。移动数据流量的暴涨将给网络带来严峻的挑战。首先,如果按照当前移动通信网络发展,容量难以支持千倍流量的增长,网络能耗和比特成本难以承受;其次,流量增长必然带来对频谱的进一步需求,而移动通信频谱稀缺,可用频谱呈大跨度、碎片化分布,难以实现频谱的高效使用;此外,要提升网络容量,必须智能高效利用网络资源,例如针对业务和用户的个性进行智能优化,但目前这方面的能力不足;最后,未来网络必然是一个多网并存的异构移动网络,要提升网络容量,必须解决高效管理各个网络,简化互操作,增强用户体验的问题。为了解决上述挑战,满足日益增长的移动流量需求,亟需发展新一代 5G 移动通信网络。

综合未来市场趋势、用户和业务需求,未来 5G 网络面临的性能挑战包括用户永远要求的更高体验速率、接近零时延的传输(如车联网中安全信息的传输)、支持海量设备连接(如无线传感网中大量传感节点的连接)、支持高流量密度的传输(如人流密集的车站场景),以及支持高速移动下的传输(如高铁以及飞机上的移动宽带传输)。另外,从移动通信网络的可持续发展考虑,未来 5G 必须提升频谱、能源与经济多方面的效率。其中更高频谱效率是 5G 提供千倍网络容量所必需的;而近年来随着移动网络能耗增加,能效已经成为继谱效之后,移动通信发展关注的重点性能;此外,5G 必须提供更低的单位比特

成本,为移动运营商创造赢利空间,才能驱动运营商积极部署 5G 网络。

2 5G 标准化展望

随着通信业界和学术界对发展 5G 逐步形成共识,国际电信联盟(International telecommunication union,ITU)自 2012 年起启动对 5G 的标准化工作,具体进程如图 1 所示。沿袭 3G(又称国际移动电话系统-2000,International mobile telecommunication-2000,IMT-2000)和 4G(又称增强型国际移动电话系统,IMT-Advanced)的命名规则,ITU 将 5G 称为 IMT-2020。首先,在 2015 年 6 月之前,通过需求分析明确 5G 的愿景,即通过研究潜在的市场需求、用户需求技术发展的趋势以及未来频谱发展动向等,规划 5G 网络的整体框架,给出其预期的能力。其次,在关键技术方面,2015 年前要明确 5G 的技术发展趋势以及从未来网络关注的重点,包括频谱效率、带宽、业务、用户体验、节能、终端以及安全等,分析得到 5G 技术应具备的能力。目前这方面的工作已经完成,发表了相关报告^[2];从 2015 到 2018 年,完成对关键技术的征集和遴选;2018 到 2020 年,对 5G 技术进行验证和标准化。另外,在频谱方面,在 2015 年世界无线电通信大会(World radio communication conference-15, WRC-15)之前完成对 5G 频谱需求的分析,2018 年确定 5G 核心技术之前,明确 5G 的频谱分配。

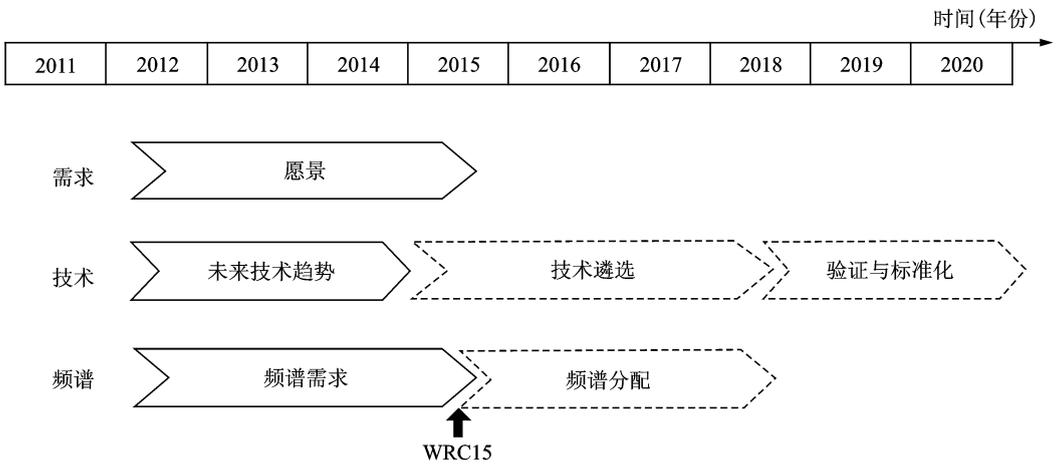


图 1 ITU 的 5G 标准化时间表

Fig. 1 Timeline for 5G standardization in ITU

目前,ITU 已发布 IMT-2020 Vision 报告^[2],这是定义 5G 愿景和关键能力的官方文件,是 5G 研究的基础性文档。面向三类主要的 5G 应用场景,即增强型移动宽带、大规模机器间通信以及高可靠低时延通信,ITU 定义了 8 项 5G 的核心能力指标,如表 2 所示。

表 2 5G 的核心能力指标

Table 2 Key performance indicator for 5G

流量密度 $/(Tb \cdot s^{-1} \cdot km^{-2})$	连接数 $/(M \cdot km^{-2})$	延时 $/ms$	移动性 $/(km \cdot h^{-1})$	能效	用户体验速率 $/(Gb \cdot s^{-1})$	频谱效率	峰值速率 $/(Gb \cdot s^{-1})$
10	1	1	500	相对 4G 提升 100 倍	0.1~1	相对 4G 提升 3 倍	20

针对 ITU 的 5G 标准化规划,国际标准化组织 3GPP 已给出相应的 5G 演进计划。同时,有众多的行业和国家相关组织积极参与 5G 的标准化,比如 5GPPP/METIS 是一个以欧洲企业为主体的行业组

织,对 5G 目标、挑战、场景、关键性能指标以及技术等有着系统的研究;NGMN 是全球运营商为主题的行业组织,它已完成了 5G 需求和关键技术的白皮书,旨在形成运营商统一意见;而 WWRF 是华为牵头,以欧洲的高校和企业为主的国际组织,主要关注标准前的技术储备。此外,全球各大企业和研究机构如爱立信、华为、中移动等纷纷发表企业白皮书,阐述各自对 5G 的观点。

3 5G 关键技术研究

关于 5G 的发展,有两种主要的技术路线。一种是演进型路线,即在当前 LTE 系统的基础上,考虑后向兼容,引入增强型技术,提升系统容量。这个方向上关注的主要技术包括 LTE-Hi^[5] 小型化基站相关技术(如高调制方式 256QAM,上行 OFDM 空口),3D-MIMO^[4],增强型 CoMP,增强型中继,FDD 和 TDD 的融合^[5]。另一种路线是革命型路线,即从网络架构到无线技术进行全面的创新,构建一个全新的移动通信网络。革命型路线的无线接入技术方面,研究人员提出了多种高谱效的技术,包括大规模天线^[6-8],全双工技术^[9],非正交接入(Non-orthogonal multiple access,NOMA)^[10]以及增强型多载波(Filterbank based multi carrier transmission,FBMC)^[11]等。网络方面,未来 5G 可能采用新型网络拓扑和接入网架构,核心网则有望引入新型技术如软件定义网络(Software define network,SDN)^[12],网络功能虚拟化(Network function virtualization,NFV)^[13],移动内容分发网络(Mobile content distributed network, Mobile CDN)^[14]等。本文关注与无线相关的网络拓扑和接入网架构的研究。

3.1 5G 网络拓扑:超密集蜂窝

移动通信网络从最初的第一代模拟蜂窝系统发展到 4G^[15],小区(蜂窝)半径一直在不断地缩小,小区密度在不断地增加。这种小区密集化机制已经为移动通信网络容量带来了 1 000 倍的增益。在未来 5G 网络中,研究人员相信,可以通过小区的进一步密集化,形成超密集蜂窝(Ultra dense cellular network,UDN)网络,带来数十倍网络容量的增益。事实上,目前移动通信网络中,已经存在大量的小型无线接入点(包括各类小蜂窝(Smallcell)如微蜂窝 Microcell、微微蜂窝 Picocell、家庭基站 Femtocell,以及中继(Relay)和分布式天线等),这些接入点可以对商场、体育馆等人流密集地区进行热点覆盖^[16-19],与宏蜂窝一起构成异构网络,提供高速移动数据接入。未来这样需要高速数据接入的热点将会越来越多,呈现出越来越强的致密性,现有的异构网络也将逐步发展成高速超密集异构蜂窝网络^[20],即由基本规则的宏蜂窝以及高密度的非规则小蜂窝构成的异构网络。

与传统异构蜂窝网络相比,超密集蜂窝 UDN 面临的一个重大挑战是异常严重的小区间干扰(Intercell interference,ICI)。首先,UDN 网络拓扑的非规则性导致 ICI 急剧上升,干扰管控至关重要。传统宏蜂窝网络基于网络规划部署,网络拓扑具有较强的规则性,可以采用频谱复用技术降低 ICI。但在 UDN 中,小蜂窝等小型无线接入点的布置是按业务需求展开,它们的地理位置具有无规划性,工作时间随业务需求动态变化。因此,UDN 的小区拓扑结构复杂,呈现出越来越强的非规则性,并具有动态变化的特性。这种情况下,很难高效地利用现有的频谱复用技术。同时,由于密集、无规划的小蜂窝的存在,在邻近区域可能存在很多的基站(Base station,BS)和移动终端(Mobile station,MS),因此 ICI 异常严重,小区边缘的 MS 接收信号质量差,信干比(Signal to interference ratio,SIR)极低。可见,UDN 中,高效多小区干扰管控必不可少,是决定未来 5G 网络基础性能的关键之一。

另一方面,由于 UDN 网络与传统蜂窝网络的小区拓扑结构完全不同,ICI 统计特性存在很大差异,对干扰管控有不同的要求。对于具有规则、固定拓扑的传统蜂窝网络,研究中通常采用 Wyner 型蜂窝^[21]或者六边形蜂窝^[22]模型,其中 BS 的位置是确定的,MS 的位置则在小区中服从均匀分布。基于六边形模型得到的 ICI 集中在 2~3 个主要干扰,功率概率分布曲线形状陡峭。而 UDN 的动态非规则网络拓扑,则需要基于随机几何理论,采用泊松点过程来模拟。这种模型下,ICI 集中效应降低,功率分布

曲线变得平坦,拖尾效应显著。可见,UDN 中 ICI 与传统蜂窝网络中的不同,必须针对 UDN 的干扰特性,对干扰管控技术进行创新研究。

目前针对 UDN 已经展开了大量的研究。美国德克萨斯奥斯汀大学的 J. G. Andrew 教授团队最先将随机几何拓扑引入到蜂窝网络中,针对传统 Wyner 和六边形网络拓扑模型的缺陷和现有蜂窝网络日益异构化的特点,基于随机几何理论对 UDN 展开了系统的研究^[23-24]。图 2 所示的是单层致密网络拓扑,即只考虑密集小蜂窝,未考虑规则宏蜂窝部署的网络。其中红点代表 BS,蓝点代表 MS,MS 和所从属的 BS 之间用蓝虚线表示,小区边缘用红实线表示。在基于随机几何构建的网络拓扑模型中,BS 和 MS 的位置各自服从泊松点随机分布(Poisson point process, PPP)。在这种架构下,可以利用随机几何理论,推导出网络全局信干比的闭式表达式,从理论上得到网络的基本性能。文献[23]分析了基于随机几何拓扑的蜂窝网络性能,并将其与六边形拓扑下得到的性能和实际网络性能进行了比较。分析和仿真结果表明,基于六边形拓扑和随机几何拓扑的性能分别是实际网络性能的上界和下界。随着蜂窝网络拓扑的非规则性日益增强,系统性能将逐渐向着下界靠拢。此外,文献[24]利用随机几何理论分析了由不同类型无线接入点构成的多层致密同构网络的性能,每层具有不同的基站发射功率、数据速率和部署密度,并与实际 LTE 网络性能进行了比较,验证了随机几何理论在多层异构网络性能分析方面的有效性。进一步地,注意到实际蜂窝网络是由基本规则的宏蜂窝以及越来越多的非规则性小蜂窝构成的,文献[25]提出了结合六边形规则拓扑和随机几何拓扑的致密异构混合模型来逼近实际网络拓扑,并通过仿真验证了模型的准确性。近年来国内通信学术界也开始关注致密网络。清华大学生志升教授团队采用随机几何理论分析了异构蜂窝网络中面向能效最优的基站分布密度^[26]。

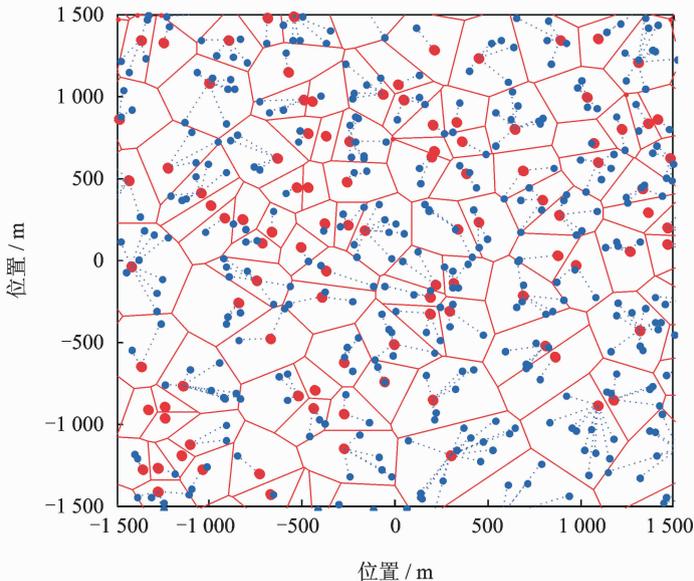


图 2 服从泊松分布的 BS 和 MS 构成的致密蜂窝网络架构模型

Fig. 2 Topology of ultra dense cellular networks

由于 CoMP^[27]是一种有效的小区间干扰控制技术,学术界已经对单层致密网络中的 CoMP 进行了一定的研究。这些研究都采用随机几何 PPP 模型来建模 BS 的分布,并采用高性能的 CoMP 机制如迫零波束赋形(Zero forcing beamforming, ZFBF)、小区间干扰置零(Inter-cell interference nulling, ICIN)等将协作簇内的小区间干扰进行完美抵消。其中文献[28]中的 CoMP 机制采用规则六边形网格来建模

CoMP 协作基站簇中心位置。在协作簇内,通过多天线波束赋形实现完美的干扰避免。对于簇边缘的用户,分配不同的频率资源,以避免簇间干扰。该文重点分析了随着单个簇内平均基站个数的增加,单个用户服务中断概率的变化情况。文献[29]则将 CoMP 协作基站簇的簇头建模成泊松分布。在协作簇内,采用 ICIN 技术实现完美干扰抵消,但是簇间的小区干扰仍然存在。由于 ICIN 需要准确的信道信息,该文研究了 CoMP 基站之间能够共享完美信道和有限信道信息两种情况,得到了在完美信道信息下单个用户的平均吞吐量的下界,以及由于有限信道信息反馈导致的平均吞吐量损失的上界。同时,考虑到 CoMP 带来的信令开销,文献[30]仅关注一个 CoMP 簇的场景,利用 ZFBF 抵消簇内小区干扰,同时将信道信息变化的时间建模成 gamma 分布,探讨了 CoMP 信令开销对系统吞吐量的影响。

中科院计算所无线中心则基于随机几何理论对 CoMP 干扰管控下单层 UDN 网络的全网络覆盖性能进行了探讨^[31]。基本思想是针对 MD-CoMP^[32],定义对协作小区个数归一化的 goodput^[33-34] 作为性能指标

$$C_i(B_i) = \frac{G_i(B_i)}{|B_i|} \tag{1}$$

式中: $|B_i|$ 代表用户 i 所在 CoMP 协作小区集中小区的个数, $G_i(B_i)$ 是用户 i 的可解码平均信道容量, 表示为

$$G_i(B_i) = \log_2(1 + \gamma^*) (1 - p_i^o(\gamma^*, B_i)) \tag{2}$$

式中: γ^* 是目标 SINR 门限,接收 SINR 只有高过 γ^* 信号才能被成功解码接收; $p_i^o(\gamma^*, B_i) = P\{\gamma_i(B_i) < \gamma^*\}$ 是用户 i 的中断概率,取值依赖于协作小区的分簇情况和接收 SINR 的分布。因此,为了计算出网络中的每个用户的归一化 goodput,必须先求 $p_i^o(\gamma^*, B_i)$ 。基于随机几何理论,可推导出单个用户 i 的 SINR 中断概率为^[35]

$$p_i^o(\gamma^*, B_i) = 1 - \sum_{b \in B_i} \left(e^{-\frac{\gamma^*}{r_{b,i}}} \prod_{\substack{j \in B_i \\ j \neq b}} \frac{P_b l_{b,i}}{P_b l_{b,i} - P_j l_{j,i}} \prod_{k \in B_{-B_i}} \frac{P_k l_{k,i}}{P_k l_{k,i} \gamma^* + P_b l_{b,i}} \right) \tag{3}$$

式中: σ_b^2 是高斯白噪声的方差; P_b 是第 b 个基站的发送功率; $l_{b,i}$ 是第 b 个基站到用户 i 的路径损耗。基于 $p_i^o(\gamma^*, B_i)$,可以推导出整个致密网络的中断概率。当基站服从密度参数为 λ_B 的 PPP 分布时,假定 MD-CoMP 采用 $|B|$ 个相邻小区的分簇,则整个网络的中断概率可表示为

$$P\{\gamma(B) < \gamma^*\} = 1 - (2\pi\lambda_B)^{-|B|} \int_{r_{|B|}=0}^{\infty} \dots \int_{r_2=0}^{r_1} \int_{r_1=0}^{r_2} \sum_{b=1}^{|B|} \left(\frac{L_{I_{r_{|B|}}}(\mu\gamma^* r_b^c) e^{-\mu\gamma^* r_b^c}}{\prod_{\substack{j=1, |B| \\ j \neq b}} \left(1 - \frac{r_j^c}{r_b^c}\right)} \right) e^{-\pi\lambda_B r_{|B|}^2} \prod_{b=1}^{|B|} (r_b) dr_1 \dots dr_{|B|} \tag{4}$$

式中: $\mu = \frac{1}{p_b c}$, c 是路径损耗常数, $L_{I_{r_{|B|}}}$ 是接收到的干扰量 $I_{r_{|B|}}$ 的 Laplace 转换。 $P(\gamma(B) < \gamma^*)$ 可以用来评估整个网络的性能。基于 $p_i^o(r^*, B_i)$ 可以对每个用户遍历所有可能的分簇方式,计算归一化 goodput,选择使 goodput 最大的分簇方式,获得用户为中心的自适应分簇方法。

在上述分析的基础上,文献[31]对比了 CoMP 在非规则拓扑的 UDN 中和在规则六边形蜂窝拓扑网络中的性能。研究表明,由于 UDN 中多小区干扰与规则六边形网络中的特性完全不同,以用户为中心的自适应 CoMP 分簇结果也呈现很大的差异。在规则六边形网络中,自适应 CoMP 的性能可以用下述简单的方法逼近,即将蜂窝分为小区中心和小区边缘,小区中心用户不采用 CoMP,而小区边缘用户利用相邻 3 个基站(簇的大小为 3)进行 CoMP 协作传输;而在非规则拓扑的 UDN 中,不存在这样的简单机制,以用户为中心的自适应分簇 CoMP 性能优于所有固定分簇的性能。

从现有研究可以看到,基于随机几何理论,国内外已经逐步展开了对 UDN 网络的性能研究,但多数研究考虑的是全部由非规则拓扑蜂窝组成的 UDN 同构网络,对结合规则宏蜂窝拓扑的异构 UDN 网

络研究较少,尚未能从理论上系统地分析干扰管控对 UDN 的影响,因此在 UDN 方向亟需进一步的深入研究。

3.2 5G 无线接入网:集中式蜂窝网络架构

虽然 UDN 能够有效地提升网络容量,是公认的 5G 关键技术之一,但实现 UDN 存在众多挑战,除了前述小区间干扰的挑战,还有实际网络部署时面临的挑战。目前的移动蜂窝网络采用分布式基站架构,即每个小区基站是互相独立的,基站的建立和维护都是分开独立进行的。在这样的网络架构下,要实现 UDN,即大量增加基站数目,将带来多方面的困难。首先,目前基站的站址已经成为稀缺的资源,如果未来要部署更多更密集的基站,获得合适的站址将成为一个巨大的问题。再者,目前移动网络的能源消耗和维护费用已经非常高,这些费用主要是用于每个基站的降温和日常维护,如果未来要进一步增加基站密度,能耗和维护成本将进一步提升,运营商难以承受。

为了降低未来网络的能耗,降低网络部署和维护的费用,研究人员提出了集中式蜂窝网络架构^[36-37]。基本思想如图 3 所示,先对传统分布式基站的功能进行划分,分为射频接发模块和信号处理模块。然后将所有基站的射频模块留在原站址上,信号处理模块集中到一个中央处理中心。通过这样的射频拉远和集中式处理,可以解决未来网络部署大量基站面临的众多困难。一方面,由于无线接入从传统的基站缩减为一个射频天线,更易获得合适的站址,另一方面,将所有传统基站的信号集中处理,有利于降低能耗,降低网络建设和维护成本。集中式网络架构也为多种先进无线技术提供了更好的实现平台,例如 CoMP 技术将不再受制于传统基站之间有限的信息交互,因为所有基站信息都集中在中央处理中心,可以高速灵活地进行共享。

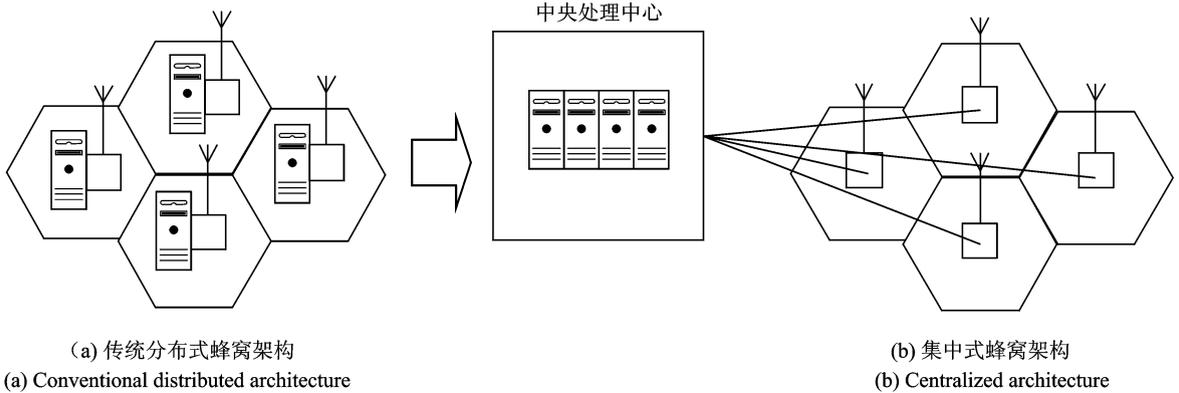


图 3 移动通信网络架构演进

Fig. 3 Evolvement of mobile communication network architectures

目前国内外已经为移动通信网络提出了多种集中式架构,如中移动提出的 CRAN(Centralized radio access networks)架构^[38],中科院计算所提出的超级基站架构^[39]以及 IBM 提出的无线云网架构等。基于超级基站架构,中科院计算所展开了通信与计算融合的研究。针对超级基站中通信协议由一个计算资源池(CPU 池)集中处理的特点,研究计算资源 CPU 的高效利用。每个小区协议处理所需的计算资源与小区的负载成正比,而小区的负载是随时间变化的,为了确保完成协议处理任务,分配给每个小区协议处理的计算资源应该按其负载最大值计算。研究注意到,移动通信网络相邻小区由于地理位置接近,其负载往往具有相似的变化趋势。如果将相邻小区的协议处理映射到一个 CPU 上,由于计算资源按最大负载分配,而最大负载出现的时间段接近,该 CPU 只有在小区都达到最大负载时可以得到高效利用,其他时间利用率不足。为了提升计算资源利用率,文献[40]利用移动通信网络负载的潮汐效应,

即商业地区高负载出现在白天,而住宅地区高负载出现在晚上,提出将同一时间段具有不同负载变化特性的小区的协议处理映射到一个 CPU,利用同一时段不同小区通信负载的差异,提升计算资源的利用率。为了对计算资源的分配进行建模,首先需要分析在 CPU 池中执行通信协议处理的多种功能所需的计算资源,主要分为三部分。最主要的计算资源是用于实际通信网络负载对应的协议处理,比如上行和下行的数据处理,控制面无线资源控制(Radio resource control, RRC)过程,无线资源管理和用户及数据通道调度等,这部分的计算资源可以表示为

$$W_{\text{load}}[i, j] = \sum_{k=1}^{\text{vbs_num}[i]} \text{vbs_load}_{k, j} \quad (5)$$

式中: $W_{\text{load}}[i, j]$ 表示在时间段 j , CPU i 上映射的各个小区对应的协议负载处理所需资源, $\text{vbs_num}[i]$ 表示 CPU i 上映射的小区的个数, $\text{vbs_load}_{k, j}$ 表示编号为 k 的小区在时间段 j 的协议负载处理所需资源。

除了 $W_{\text{load}}[i, j]$, 还要考虑 CPU 内部调度不同小区协议任务所需的资源。当多个小区的协议处理映射到同一个 CPU 后, 这些协议对应的数据处理进程和控制相关进程会在 CPU 中调度执行, 这些调度本身也需要计算资源, 如多个小区协议进程切换时的进程激活, 数据保存和同步过程所需要的计算资源, 以及同一小区协议处理内部进程间调度时所需要的资源。这部分资源量可表示为

$$W_{\text{sched}}[i] = \left(\frac{\text{stage_duration}}{\text{sched_period}} \right) * T_num[i] * \text{atom_sched_load} \quad (6)$$

式中: $W_{\text{sched}}[i]$ 表示 CPU i 内部调度所需资源, sched_period 是 CPU 进行协议处理进程调度的间隔, 该值由小区对应的协议处理系统(即所使用的协议栈软件)的进程模型, 以及具体操作系统中的进程调度方法(如完全公平调度器(Completely fair scheduler, CFS)^[41])共同决定; stage_duration 表示进行时间段划分时每个时间段的长度; $T_num[i] = \text{vbs_num}[i] * \text{tasks_per_vbs}$ 表示映射到 CPU i 的对应的处理进程个数, tasks_per_vbs 为每个小区协议处理所包含的处理进程个数, atom_sched_load 表示每次进行进程调度时所需的计算资源, 该值可通过对实际 LTE 基站协议栈软件的开发和测试等过程来确定。

最后还需要考虑各个小区协议处理资源调整时所需的计算资源。由于潮汐效应等原因, 各个小区对应的负载处于时刻变化之中, 相应地, 小区协议处理所需的计算资源也是动态变化的。因此在系统运行过程中, CPU 内部分配给每个小区协议处理的资源需要进行动态调整, 可能出现将某些小区协议处理向其他 CPU 迁移的情况, 对此必须进行充分的资源预留。由于该调整所需资源与协议运行过程密切相关, 难以精确预测, 因此文献[40]采用了粗粒度的预测值

$$W_{\text{adj}}[i, j] = \sum_{k=1}^{\text{vbs_num}[i]} \left(\frac{\text{vbs_adj}_{k, j}}{W_{\text{reserve}}[i]} \right) * \text{atom_adj_load} \quad (7)$$

式中: $W_{\text{max}}[i, j]$ 表示 CPU i 在时间段 j 的协议处理资源动态调整所需的计算资源, $\text{vbs_adj}_{k, j}$ 表示在时间段 j 编号为 k 的小区所增加的协议处理负载。 atom_adj_load 表示每次进行小区协议栈的 CPU 间迁移所需的计算资源。 $W_{\text{reserve}}[i]$ 表示 CPU i 上的平均剩余计算资源, 表示为

$$W_{\text{reserve}}[i] = \frac{W_{\text{max}}[i] - W_{\text{load}}[i, j]}{\text{processor_num}[i]} \quad (8)$$

式中: $W_{\text{max}}[i]$ 表示 CPU i 上计算资源总数, $\text{processor_num}[i]$ 表示 CPU i 上的处理器(核心)个数。

在上述分析的基础上, 可将超级基站的计算资源分配最优化问题建模如下

$$\text{Max Efficiency} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_{\text{load}}[i, j]}{N * \sum_{i=1}^M W_{\text{max}}[i]} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } W_{\text{load}}[i, j] + W_{\text{sched}}[i] + W_{\text{adj}}[i, j] < W_{\text{max}}[i, j] \quad (\text{对于任意 } i, j)$$

式中: M 表示一个 CPU 中映射的小区协议栈个数, N 代表时间段的个数。假设共有 K 个小区, 那么优化问题(9)理论上共有 M^K 种映射可能, 这可以用动态规划解决多维装箱问题的思想^[42-43], 通过递归的方式来找到最优解。研究表明, 相比根据平均负载分配计算资源的方法, 文献[40]提出的利用负载差异性进行计算资源分配的机制利用率提升达到 70%。

通信与计算的一个重要差异是通信任务的处理往往有严格的实时性要求, 而目前计算任务的处理遵循完全公平准则, 不确保实时性。因此用 CPU 处理通信系统任务时, 实时性保障是一个关注的重点。在超级基站中, 多个小区的协议可能映射到一个 CPU 上处理, 协议处理的实时性难以保证。比如在 TDD-LTE 协议处理中, 下行发送时隙到来前, 必须将该时隙相应的协议数据处理好, 否则, 该时隙没有数据可传, 资源就会浪费。另一方面, 上行接收时隙之后, 除非是在 HARQ (Hybrid automatic repeat request) 等特殊情形下, 上行数据的处理可以推迟几个时隙, 没有严格的实时性要求。而在 CPU 上处理多个小区的上下行协议数据时, 对上下行的处理调度完全公平, 无法确保下行数据的实时性。针对这个问题, 文献[44]提出下行帧处理动态提前策略, 根据每个移动通信空口传输帧的模式获得上下行传输子帧比例, 并计算出相应的下帧处理提前量, 同时要求下行帧连续处理, 避免计算资源空闲。研究表明, 相比下行帧处理固定提前方法, 该算法可确保下行处理实时性, 并有效提升计算资源的利用率。

上述研究一方面利用了移动通信网络负载变化的特点, 通过统计复用提升了计算资源的利用率, 另一方面从通信处理的实时性需求出发, 提出了动态的计算资源调度策略, 两者都较好地体现了通信与计算的融合。针对超级基站等集中式架构, 目前还有很多开放的问题尚未解决, 比如基带处理的虚拟化、全局无线资源管理、Fronthaul 的影响等, 都有待进一步的深入研究。

4 结束语

下一代移动通信系统 5G 将在 2020 年完成标准化。面向增强型移动宽带、大规模机器间通信以及高可靠、低时延通信等应用场景, 5G 将提供高达 10 Tbps/km² 流量密度、1 M/km² 海量连接数、1 ms 超低时延、支持超过 500 km/h 移动性和降低能耗 100 倍等 8 项核心能力。为了实现这些性能目标, 需要深入研究 5G 网络和无线接入的关键技术。本文着重介绍了 5G 无线网络拓扑和架构方面的关键技术, 即超密集蜂窝网络和集中式网络架构, 有望为 5G 系统提升网络容量, 降低能耗, 并有效融合通信和计算技术, 以提高资源利用率。

参考文献:

- [1] GSA. [EB/OL]. <http://www.gsacom.com/>, 2015-07-01.
- [2] ITU. [EB/OL]. <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2320-2014>, 2015-07-01.
- [3] 林言超, 高月红, 张欣, 等. LTE-Hi 系统关键技术及发展方向[J]. 现代电信科技, 2013(1):49-52.
Lin Yanchao, Gao Yuehong, Zhang Xin, et al. Key technologies and development of LTE-Hi systems[J]. Modern Science and Technology of Telecommunications, 2013(1):49-52.
- [4] Auer G. 3D MIMO-OFDM channel estimation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(4):972-985.
- [5] GTI TDD/FDD Convergence, White Paper VI.1 [EB/OL]. <http://lte-tdd.org/>, 2015-07-06.
- [6] Lu Lu, Li Ye, Swindlehurst A, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5):742-758.
- [7] 戚晨皓, 黄永明, 金石. 大规模 MIMO 系统研究进展[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3):544-551.
Qi Chenhao, Huang Yongming, Jin Shi. Research development in massive MIMO [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3):544-551.
- [8] Xing Chengwen, Ma Shaodan, Zhou Yiqing. Matrix-Monotonic optimization for MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(2):334-348.
- [9] Laughlin L, Beach M A, Morris K A, et al. Electrical balance duplexing for small form factor realization of in-band full duplex [J]. IEEE Communication Magazine, 2015, 53(5):102-110.
- [10] Saito Y, Kishiyama Y, Benjebbour A, et al. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access [C]//

2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Dresden, Germany; IEEE,2013;1-5.

- [11] Schaich F. Filterbank based multi carrier transmission (FBMC)-evolving OFDM [C]//2010 European Wireless Conference. Lucca, Italy; IEEE, 2010;1051-1058.
- [12] Shin M K, Nam K H, Kim H J. Software-defined networking (SDN): A reference architecture and open APIs [C]//2012 International Conference on ICT Convergence. Jeju Island, Korea; IEEE, 2012;360-361.
- [13] Paglierani P. High performance computing and network function virtualization: A major challenge towards network programmability [C]//3rd International Black Sea Conference on Communications and Networking. Constanta, Romania; IEEE, 2015;1-5.
- [14] Boscovic D, Vakil F, Dautovic S, et al. Pervasive wireless CDN for greening video streaming to mobile devices [C]//2011 Proceedings of the 34th International Convention MIRPO. Opatija, Croatia; IEEE, 2011;629-636.
- [15] Zhou Yiqing, Wang Jiangzhou, Ng Tung-Sang, et al. OFCDM: A promising broadband wireless access technique [J]. IEEE Communications Magazine, 2008,46:39-49.
- [16] Huang Liang, Zhou Yiqing, Hu Jinlong, et al. Coverage optimization for femtocell clusters using modified particle swarm optimization [C]// 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, Canada; IEEE,2012;1-5.
- [17] Huang Liang, Zhou Yiqing, Han Xue, et al. Distributed coverage optimization for small cell clusters using game theory [C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, China; IEEE,2013;1-5.
- [18] Du Hongyan, Zhou Yiqing, Tian Lin, et al. A load fairness aware cell association for centralized heterogeneous networks [C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, United Kingdom; [s. n.], 2015;1-5.
- [19] Wang Yuanyuan, Qian Manli, Han Xue, et al. Game-theoretic power control for interference mitigation in two-tier small cell networks [C]// 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Seoul, Korea; IEEE,2014;1-5.
- [20] Andrews J G. Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift [J]. IEEE Communication Magazine,2013,51(3):136-144.
- [21] Wyner A. D. Shannon-theoretic approach to a gaussian cellular multiple-access channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1994,40(6):1713-1727.
- [22] Park J, Song E, Sung W. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Comm, 2009,8(2):586-592.
- [23] Andrews J G, Baccelli F, Ganti R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011,59(11):3112-3134.
- [24] 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 of Communications, 2012,30(3):550-560.
- [25] Jr Heath R W, Kountouris M. Modeling heterogeneous network interference with using poisson point processes [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(16):4114-4126.
- [26] Cao Dongxu, Zhou Sheng, Niu Zhisheng. Optimal base station density for energy efficient heterogeneous cellular networks [C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, Canada;IEEE,2012;1-5.
- [27] Irmer R, Droste H, Marsch P, et al. Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results [J]. IEEE Communication Magazine, 2011,49.(2):102-111.
- [28] Huang Kaibin, Andrews J G. A stochastic-geometry approach to coverage in cellular networks with multi-cell cooperation [C]//2011 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM2011). Houston, USA; IEEE,2011;1-5.
- [29] Akoum S, Heath R W Jr. Multi-cell coordination: A stochastic geometry approach [C]//2012 IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Cesme, Turkey; IEEE,2012;16-20.
- [30] Xia P, Liu C H, Andrews J G. Downlink coordinated multi-point with overhead modeling in heterogeneous cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(8):4025-4037.
- [31] Garcia V, Zhou Yiqing, Shi Jinglin. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014,13(8):4297-4308.
- [32] Park J, Song E, Sung W. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,8(2):586-592.
- [33] Goldsmith A. Wireless communications [M]. Cambridge University Press (CUP), U K, 2005.
- [34] Lopez-Perez D, Guvenc I, De La Roche G, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2011,18(3):22-30.
- [35] Garcia V, Lebedev N, Gorce J M. Capacity outage probability for multi-cell processing under rayleigh fading [J]. IEEE Communications Letters, 2011,15(8):801-803.

- [36] Checko A, Chirstiansen H L, Yan Y, et al. Cloud RAN for mobile networks—a technology overview [J]. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2015,17(1):405-426.
- [37] Chih-Lin I, Rowell C, Han Shuangfeng, et al. Toward green and soft: A 5G perspective [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2014,52(2):66-73.
- [38] China Mobile Research Institute. C-RAN the road towards green RAN [EB/OL]. White Paper V2. 5, <http://labs.chinamobile.com/cran/>, 2011.
- [39] Qian Manli, Wang Yuanyuan, Zhou Yiqing, et al. A super base station based centralized network architecture for 5 G mobile communication systems [J]. *Digital Communications and Networks*, 2015,1:152-159.
- [40] Zhai Guowei, Tian Lin, Zhou Yiqing, et al. Load diversity based optimal processing resource allocation for super base stations in centralized radio access networks [J]. *Science China Information Sciences*, 2014,57(4):1-12.
- [41] Jones M T. Inside the linux 2.6 completely fair scheduler [J]. IBM Developer Works Technical Report, 2009.
- [42] Kosta S, Aucinas A, Hui P, et al. Thinkair: Dynamic resource allocation and parallel execution in the cloud for mobile code offloading [C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. Orlando, USA; IEEE, 2012:945-953.
- [43] Denardo E V. Dynamic programming: Models and applications [M]. Courier Corporation NJ, USA; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 2012.
- [44] Zhai Guowei, Tian Lin, Zhou Yiqing, et al. Real-time guaranteed TDD protocol processing for centralized super base station architecture [C]//2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). New Orleans, USA; IEEE, 2015:1-5.

作者简介:



周一青(1975-),女,研究员,研究方向:异构无线网络,E-mail:zhouyiqing@ict.ac.cn。



潘振岗(1975-),男,主任研究员,研究方向:移动通信,E-mail:panzhengang@chinamobile.com。



翟国伟(1983-),男,博士研究生,研究方向:通信系统资源管理,E-mail:zhaiguowei@ict.ac.cn。



田霖(1980-),女,副研究员,研究方向:通信系统资源管理,E-mail:tianlindd@ict.ac.cn。

