



专题：5G

## 5G 移动通信系统的接入网络架构

项弘禹, 张欣然, 朴竹颖, 彭木根  
(北京邮电大学, 北京 100876)

**摘要:** 为了满足巨流量、大链接、超低时延等 5G 组网性能需求, 针对广覆盖和高容量设计的传统无线接入网络架构亟需演进。首先结合 5G 愿景与需求, 阐明了 5G 接入网络架构的特点和重要性; 然后从学术界和产业界两个角度详细介绍了 5G 接入网络架构的设计原理和具体组成, 分析了优点和不足; 最后, 探讨了接入网络架构的挑战和未来的可能发展方向。

**关键词:** 5G; 网络架构; 无线接入网络

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2018230

## Network architecture in the 5G mobile systems

XIANG Hongyu, ZHANG Xinran, PIAO Zhuying, PENG Mugen  
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** In order to meet the performance requirements of 5G networking such as huge traffic, large links, and ultra-low latency, the traditional wireless access network architecture for wide coverage and high capacity design needs to evolve. Firstly, combining the 5G vision and needs, the characteristics and importance of the 5G access network architecture were clarified. Then the design principle and specific composition of the 5G access network architecture was introduced from the perspectives of academia and industry, and the advantages and disadvantages were analyzed. Finally, the challenges of access network architecture and possible future development directions were discussed.

**Key words:** 5G, network architecture, radio access network

### 1 引言

5G 移动网络时代的日益靠近, 使得全球产业界和学术界团体加速对于 5G 网络架构的研究, 尽早推出 5G 第一个商业版本。3GPP (Third Generation Partnership Project) 早在 2016 年就公布了 5G 的两种网络架构<sup>[1]</sup>: 独立组网, 即接入网络仅包括新空口 (new radio) 或 evolved E-UTRA; 非独立组网, 接入网络中新空口与 evolved E-UTRA

共存。并于 2018 年 6 月完成了 5G NR R15 的第二个版本, 同时展开了 R16 版本标准化工作, 这极大地提升了业界对于 5G 的信心, 对 5G 的后续标准推进和产业发展产生了重大影响。

### 2 5G 网络愿景与架构特点

#### 2.1 5G 需求与挑战

随着物联网、车联网等技术的蓬勃发展, 网络中的接入终端种类与数量不断增长, 5G 无线网

收稿日期: 2018-06-03; 修回日期: 2018-08-10

络将实现真正的“万物互联”。预计到2030年,全球移动通信设备总数将达到1 000亿量级,移动数据流量相较2010年增长约20 000倍<sup>[2]</sup>。移动网络中的数据流量呈现分布不均匀,随时间、地点和应用变化多样的特点,为网络传输带来了巨大的压力。另一方面,未来移动通信网络中出现了许多新兴业务,既包含小数据分组服务(如低数据速率的机器通信和实时远程控制),又包含丰富的内容服务(如高清视频、增强现实和在线游戏)。5G划分出了3种业务类型以应对多样化业务服务的差异化性能指标带来的挑战,如下所示<sup>[3]</sup>。

#### (1) eMBB (enhanced mobile broadband)

主要包括车站、体育场等超密集区域的巨大数据流量的热点高容量场景。该类场景下性能需求包括1 Gbit/s用户体验速率、数十Gbit/s峰值速率和数十Tbit/(s·km<sup>2</sup>)的流量密度,网络的流量过载使得现网的流量传输方法面临严峻挑战。此外,eMBB还包括需要保证用户在高移动性情况下的业务连续性的连续广域覆盖场景,挑战在于随时随地为用户提供100 Mbit/s以上的用户体验速率,保证业务的连续性与网络的基本服务能力。

#### (2) uRLLC (ultra-reliable and low latency communication)

主要面向对时延和可靠性具有极高指标需求的应用,例如车联网、工业控制等低时延高可靠场景,需要网络为用户提供毫秒级的端到端时延和接近100%的业务可靠性保证,这与4G网络百毫秒级的端到端时延和业务中断时间相距甚远,要求5G网络针对更高的可靠性与更低的时延要求提出关键的使能技术。

#### (3) mMTC (massive machine type communication)

主要应用于机器间通信,以传感器为主,包括智能城市、森林防火和可穿戴设备等低功率大连接场景,满足接入设备数量巨大且功耗极低的需求,预期达到100万/km<sup>2</sup>的连接数密度的性能

指标。海量的连接数使得网络的控制面负载急剧增加,信令拥塞将是亟待解决的问题。

为了灵活地支撑多样化的业务服务,满足不同应用场景下的性能指标需求,未来移动网络需要具备网络功能和操作管理的多样性,能够智能感知用户需求,对网络功能进行简化、重构和编排,提供高效灵活的网络控制和转发功能,实现不同用户场景、商业模型下各种应用的使用。同时,为方便实现接入网拓扑的部署和维护,5G网络还需要能够提供按需定制服务,开放网络能力以提供灵活的业务部署环境,在满足差异化业务需求的同时,提升网络服务价值,以实现更友好的网络生态。

除了性能需求带来的挑战,网络效率需求,如频谱效率、能量效率和成本效率也将是5G重点关注的效率因素,二者共同定义了5G的关键能力。在5G中,网络需要实现超百倍的能量效率提升和比特成本降低以及5~15倍的频谱效率的提升,以保证5G的可持续发展<sup>[4]</sup>。除了网络性能和效率以外,移动通信网络还面临着感知和开放能力不足的挑战。当前移动通信网络缺乏对用户和业务感知能力,有限的网络开放能力无法实现网络资源与业务需求的友好对接,不利于业务体验的改善和网络运营效率的提升。网络中日益增长的终端设备数量大幅提升了运维成本,降低了运维效率。网络运行过程中会源源不断地产生海量数据,海量数据尚未得到充分利用,造成了数据价值的浪费。5G通信网络需要充分利用网络运行过程中产生的大量数据降低网络建设成本,提升网络运营水平,提供更加智能的网络运营能力。

## 2.2 网络架构特征

和以往的网络不同,5G网络将不只是网络的演进提升,更会带来革命性的改变。5G网络除了各方面性能的提升,网络架构也将引入许多新的特征。

#### (1) 面向虚拟化网络的NFV/SDN

NFV (network function virtualization) <sup>[5]</sup>的引



入将 5G 网络构建成一个虚拟化的网络环境,差异化的软件功能经过虚拟化后运行在相同的硬件设备上,不同网络功能将共享硬件的计算、存储与通信资源。SDN (software-defined networking)<sup>[6]</sup>的引入则使得网络的可编排性得到提升,分离网络的数据与控制面。参考文献[7]在介绍了欧洲电信标准化协会(ETSI)组织关于 NFV 技术的研究以及开放网络基金会(ONF)组织关于 SDN 技术的研究后,以核心网为例,进一步探讨了二者与 5G 核心网络的有效结合。参考文献[8]则研究了 NFV/SDN 在回传网络上的应用,提出了一种光纤与无线网络融合的 5G-Xhaul 架构,并实现灵活的网络功能分割。

### (2) 面向多样化服务的网络切片

针对不同的服务需求和性能指标,网络被划分成网络功能实体的逻辑组合,被切片后的网络,即网络切片<sup>[9]</sup>用于为目标用户和终端提供指定的服务。参考文献[10]在总结现网应对 5G 服务时的不足后,提出一种面向服务的网络用户面编排架构。参考文献[11]则将网络切片的概念进一步提升,加强网络的开放程度,提出“Anything as a Service”,通过快速灵活地调度网络资源,实现服务的动态创建与管理。

### (3) 面向多维度资源融合的云雾协同

以往的分层异构和云无线接入等网络,受限于集中式的云处理网络架构,性能难以满足 5G 多样化的通信需求。利用边缘节点计算存储和信号处理功能,将雾作为云的协同部分,能够实现集中分布自适应的高效组网。参考文献[12]提出云雾协同架构,将不同服务解析成服务功能链,服务功能链由云雾中的网络功能和多维度资源部署实现。类似地,参考文献[13]提出将网络的多维资源虚拟化,通过灵活分层与编排构成云雾,满足 5G 需求。

## 3 5G 网络架构研究现状

### 3.1 5G 网络标准化进展

国际电信联盟(ITU)于 2015 年启动 5G 国

际标准制定的准备工作。首先开展 5G 技术性能需求和评估方法研究,明确候选技术的具体性能需求和评估指标;2017 年正式启动 5G 候选技术征集;2018 年底启动 5G 技术评估及标准化;计划在 2020 年底形成商用能力。在该路线图的指导下,全球范围内的标准化组织和 5G 研究项目组相继开展工作,推动 5G 技术的研发进程。

3GPP 作为 5G 研发的主要标准化组织,自 2015 年 12 月启动 5G 相关议题讨论,制定了 5G 标准化时间表,计划于 2020 年商用。3GPP 5G 的整体研究工作将包含 3 个阶段:研究阶段、工作阶段 1、工作阶段 2,分别对应 R14~R16。2017 年 12 月,3GPP 完成非独立组网的 5G 新空口规范,包含无线接入网络、业务与系统、核心网与终端 3 部分。次年 6 月,完成独立组网的 5G 新空口规范,同时批准 5G 第二阶段新项目,展开 R16 的研究和标准化工作。

5GPPP 作为欧盟框架 7 (FP7) 项目中的 5G 后续项目,以设计 5G 通信网络和服务为终极目标,于 2015 年 7 月开始展开工作。5GPPP 项目共分为 3 个阶段,第一阶段已于 2017 年年底完成,内容包含新型网络架构等 19 个研究项目;第二阶段包含边缘计算等 21 个研究项目;第三阶段自 2018 年 6 月开始,包含基础设施、自动驾驶、垂直行业测试验证 3 个项目,目前正在积极开展技术评估和测试验证工作。

#### 3.1.1 5G 网络整体架构

2015 年年底,3GPP 系统架构工作组(SA2)正式启动 5G 网络架构的研究课题“NexGen”<sup>[14]</sup>,明确了 5G 架构的基本功能愿景。2017 年 12 月,3GPP 冻结“NexGen”阶段 2 的工作,输出第一版的 3GPP 5G 网络架构标准<sup>[15]</sup>,在该标准中,3GPP 定义了 5G 网络整体架构的特点、功能和服务。强调与 4G 系统不同,5G 系统将采用基于服务的架构,并且支持端到端的网络切片功能。

5G 网络架构采用基于服务的架构和通用接

口,传统网元功能基于NFV技术拆分成若干个自包含、自管理、可重用的网络功能服务模块,通过灵活定义服务模块集合,实现定制化的网络功能重构,对外通过统一的服务调用接口组成业务流程。图1给出了非漫游场景下基于服务的5G网络架构示意图。在该架构中,根据特定场景需求,将不同网络功能按需有序组合,实现网络的能力与服务的定制化,为不同业务部署专用网络,实现5G网络切片。网络切片技术使运营商能够更加灵活、快速地响应客户需求,支持网络资源的灵活分配。

5GPPP于2017年12月发布了“5G架构2.0”白皮书<sup>[16]</sup>,描述了5G整体架构设计和评估分析。白皮书进一步地指出,考虑到5G需要支持多样化业务和性能指标,网络切片概念需与5G系统深度融合。为了支持网络切片功能,5G架构分为以下功能层:服务层、管理编排层、控制层、多域网络操作系统工具、数据层,分别负责租户应用服务交互和商业策略决策、切换管理与编排、专用网络功能控制、网络资源虚拟化、数据传输功能。各层通过有效的协作完成切片的生命周期管理和整体网络的控制管理等。在所提5G架构中,网络切片的开放程度可以分为两种:为租户提供可自主控制和运营的虚拟基础设施,即基础设施作为服务;生成服务实例,直接为租户提供网络服务。

### 3.1.2 5G接入网络架构

2017年3月,3GPP无线接入网络工作组正

式开启了5G NR工作项目阶段<sup>[17]</sup>。同年12月,完成非独立组网的5G新空口规范。2018年6月,完成独立组网的5G新空口规范,至此完成了5G标准第一阶段的工作,定义了5G接入网的整体架构与接入节点架构<sup>[18]</sup>。

3GPP定义了新型无线接入网络NG-RAN,包含两种接入节点:gNB,即提供5G控制面和用户面服务的5G基站;ng-eNB,为用户提供LTE/E-UTRAN服务的基站。gNB和ng-eNB间通过Xn接口进行连接,gNB和ng-eNB通过NG接口与核心网(5GC)连接。5G gNB可进一步划分为CU(central unit)和DU(distributed unit),提供低成本部署,支持负载管理、实时性能优化在内的协作。NG RAN的一个显著特点是可以运行独立组网和非独立组网,运营商可根据网络需求和成本灵活选择5G部署方式。在独立组网方式下,gNB连接到5G核心网络(5GC);在非独立组网方式中,利用双连接技术将NR和LTE紧密集成,连接到现有的4G核心网(EPC)。在双连接架构中,主节点和辅助节点同时为用户提供无线资源,提高用户的体验速率。5G无线协议栈包含两部分:传输用户数据(IP分组)的用户面和控制信令交互的控制面。用户面引入了服务数据自适应协议层(SDAP),用以支持5G核心网基于流的新QoS模型。SDAP层可将带有QoS需求的IP流映射到特定配置的无线电承载上,在无RRC信令辅助的情况下进行动态的配置、重配置。

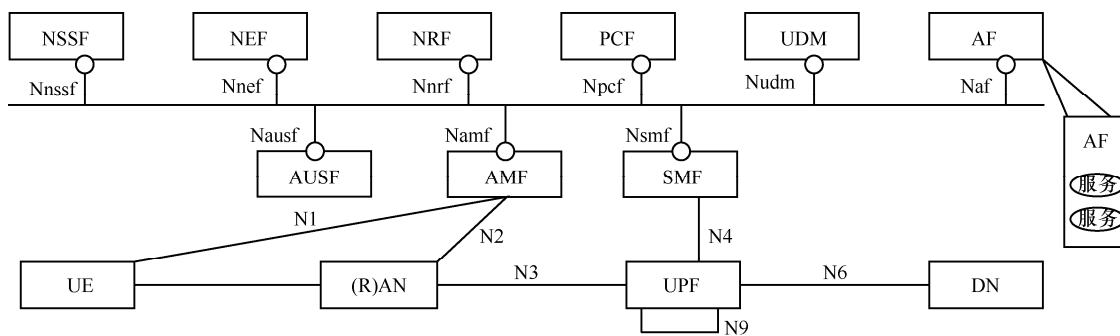


图1 5G网络架构与网络功能服务模块化



控制面引入了 RRC inactive 状态, 该状态下用户在省电的同时, 可更快与 connected 状态切换。

类似地, 5GPPP 也对 5G 接入网架构及其关键技术展开了研究<sup>[23]</sup>。根据部署场景, 网络部署将选择合适的用户面和数据面切分方案。包括数据面/控制面完全集中、数据面/控制面部分集中、控制面完全集中、数据面部分集中、数据面/控制面完全分离的 5 种切分选项, 其中, 完全分离的方案对时延、速率没有要求, 各节点通过 X2 接口进行分布式协作。完全集中式方案在多个节点间进行集中式调度, 可获得更高的自由度。节点间的协议栈聚合方法将依据网络状况和业务需求而定: 无线接入技术 (RAT) 的聚合点默认选择时间无关的协议栈层 (即非时间同步的 RRC/PDCP 层), 然而需时间同步的 MAC 层切分方案可实现更高的 RAT 协作。具体地, 在 PDCP 层聚合方案中, CU/DU 选择在 PDCP/RLC 层切换, DU 可支持一种和多种空口技术; 在 MAC 层聚合方案中, 引入了扩展动态频谱访问 MAC 框架, 将 MAC 层进一步划分为高/低层 MAC, 低层 MAC 对应特定的空口技术。

### 3.2 网络架构理论研究

面向不同的应用场景与性能需求, 无线接入网络需要由传统的以基站为中心, 基站—用户式孤立管道传输数据的结构, 转变为以用户和业务为中心, 异构节点共存与协作的网络结构。5G 网络架构中, 有线和无线连接将被有效利用完成回传, 提升用户体验速率并降低业务传输时延, 满足未来多样化业务的性能需求。

#### (1) 云无线接入网络 (C-RAN)

集中式云无线接入网络 (cloud RAN, C-RAN) 是未来无线接入网演进的重要方向。C-RAN 中, 基于通用硬件平台的云计算承载基站的上层基带处理功能, 池化的基带处理中心 (base band unit pool, BBU 池) 提供协作信号处理、集中的资源管理、多 RAT 管理等功能; 基站剩余的射频等底

层功能被分配给远端无线处理单元 (remote radio unit, RRU), 汇聚小范围内的 RRU 信号, 经部分基带处理后进行前端数据传输。在满足一定的前传和回传网络的条件下, C-RAN 可以有效提升网络容量, 降低网络能耗和部署成本。

传统 C-RAN 架构<sup>[19]</sup>中, BBU 池汇聚了基站大部分功能, RRU 仅负责射频信号处理, 这不仅要求网络前传链路能够提供低时延高速率的理想条件, 还使得网络架构僵化固定。参考文献[20]提出一种前传资源灵活分配的方法, 实现面向业务流量和网络环境的 BBU-RRU 灵活适配。借助 SDN, BBU 池由原有的硬件基础设施变为软件定义的环境, 参考文献[21]提出 BBU-RRU 功能可编排, BBU 池不仅能够灵活扩容, 还能面向业务的灵活扩展与拆分功能, 平衡了实时性和传输网络性能要求。进一步地, 参考文献[22]搭建了基于通用处理器的 C-RAN, 验证了 C-RAN 在不同环境和传输策略下的性能。

C-RAN 与 5G 关键技术的结合能够进一步提升网络性能。参考文献[23]研究了大规模 MIMO 对 C-RAN 容量的提升, 并通过构建部分集中的 BBU 池减少前传链路开销。参考文献[24]提出在 RRU 配备射频感知功能下, C-RAN 能够实现基于小区站址的射频资源分配, 完成干扰消除提升网络容量。参考文献[25]研究了 C-RAN 与边缘缓存的结合, 并比较分析了缓存配置对 C-RAN 性能的影响, 包括前传链路负载与能量开销。

#### (2) 雾无线接入网络 (F-RAN)

相较于云计算, 雾计算更靠近终端与用户。雾计算泛指网络边缘设备所提供的分布式计算能力, 最早由 Cisco 公司<sup>[26]</sup>和普林斯顿大学著名学者 Mung Chiang 提出。为解决传统无线接入网络性能瓶颈, 参考文献[27]将“雾计算”引入无线接入网络, 提出了借助用户和边缘设备的计算及缓存潜能, 缓解前传/回传链路压力的雾无线接入网络 (fog RAN, F-RAN), C-RAN 和 F-RAN 对比

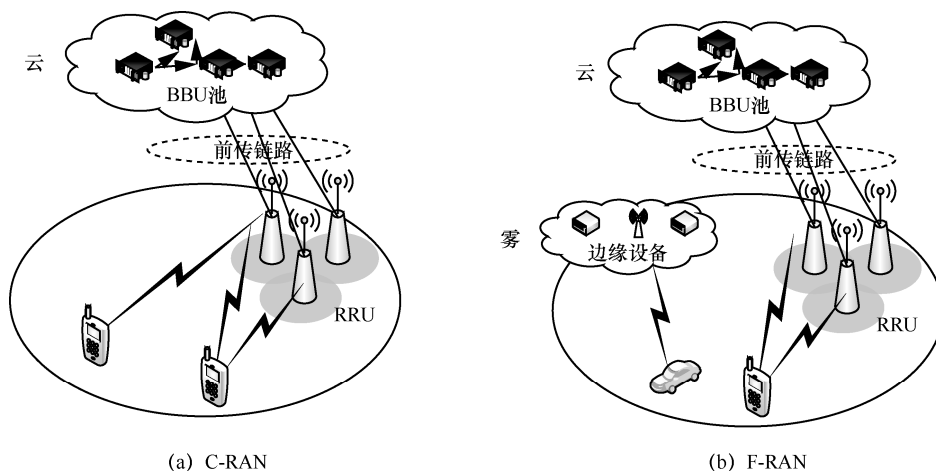


图2 5G接入网络架构: C-RAN与F-RAN

如图2所示。在该网络架构中,网络边缘分散的计算和缓存能力能够通过协作进行有效整合,增强了本地实时处理、传输和管控能力,并通过承载下沉网络功能和边缘应用,实现本地信息处理和业务分发,提供更小的端到端时延性能。

F-RAN 由于其网络架构特征能很好地满足5G多样化的性能要求,一经提出就引起了业界的广泛关注,业界对F-RAN的各个方面开展了大量的跟踪研究。考虑到5G对时延的特殊需求,参考文献[28]在前传/回传链路容量受限情况下,分析了F-RAN中边缘缓存和前传容量对传输时延的影响,借助信息论揭示了网络性能与资源开销间存在的权衡关系,并设计了一种联合编码缓存和信号压缩方法。参考文献[29]对F-RAN移动性管理和资源管理进行了研究,设计与提出F-RAN自适应接入节点选择机制和干扰消除方法,能够减少异常切换发生概率和信令开销,提高网络资源利用率,验证了F-RAN作为5G无线接入网络架构的优越性。参考文献[30]调研了边缘缓存对网络性能,包括谱效、能效、时延的影响,提出一种F-RAN的自适应接入模式选择机制,在提供低传输时延的前提下,提高网络频谱和能量效率。

除了F-RAN本身的架构优势之外,F-RAN能够很好地和5G关键技术相兼容,如大规模MIMO、正交多址技术可以直接应用于F-RAN中。

F-RAN通过SDN实现了接入网络层面的NFV。参考文献[31]提出了基于NFV/SDN的F-RAN架构,缓解了集中SDN控制器和骨干传输网的压力,实现了高效的编排管理。参考文献[32]提出了基于网络切片的F-RAN架构,将接入网络切片成多个逻辑独立网络,以满足不同业务差异化的性能需求。参考文献[33]提出了一种面向5G增强现实(AR)的F-RAN架构,将AR业务分解成多个可并行执行的子任务,并交由网络边缘节点进行分布式计算。参考文献[34]提出了一种面向差异化时延要求的F-RAN架构,借助通用处理器设备组建的仿真平台,实现并验证了对不同优先级业务的分级响应和处理,能够适配不同时延和速率要求的业务。

### (3) 接入网络切片(RAN slicing)

网络切片通过网络虚拟化技术,将网络中的各类物理资源抽象成虚拟资源,并基于指定的网络功能和特定的接入网技术,按需构建端到端的逻辑网络,提供一种或多种网络服务。由于核心网虚拟化程度较高,现有网络切片大部分都针对核心网。但是,探索研究接入网络中进行切片依旧存在必要性:考虑到5G的低时延、高容量与大连接的需求,接入网络中进行切片能够更好地提供差异化性能;网络切片作为端到端的逻辑网络,接入网络切片有助于补充完整现有的基于核心网



络的切片方法。参考文献[35]总结接入网络切片存在的挑战,并提出一种基于LTE的接入网络切片架构,在该架构中,接入网络被模块化,物理资源被抽象化,以实现灵活的服务编排与生命周期管理。参考文献[36]提出一种基于3GPP eDECOR的接入网络切片架构,并进一步地以eMBB、uRRLC和mMTC为例,借助Open Air Interface平台验证所提架构的有效性。

考虑到5G新特性,参考文献[37]研究5G RAN中,服务可解析成不同层空口协议栈的描述信息,并根据各层描述信息选择合适的协议栈配置,完成接入网络切片实例化。在C-RAN架构中,参考文献[38]研究了面向多租户环境的网络切片方法,并针对网络中多维度资源联合分配问题,提出分层的求解算法,保证用户传输速率需求的前提下最大化租户总收益。F-RAN架构下,参考文献[39]探索了网络切片和边缘计算的融合,提出了基于边缘计算的接入网络切片架构,并指出资源管理和信息感知在该架构中的关键作用。

## 4 挑战和待研究内容

为了实现5G的“增强宽带,万物物联”,业界提出许多关键技术,5G技术在提升网络性能的同时,也给5G系统架构带来了额外的挑战。例如,5G性能需求的维度增加,5G空口设计时需要在不同的性能指标之间进行权衡折中与联合优化,而为了应对多种业务共存而引入的网络切片技术将系统设计的复杂性进一步增加。可以预见的是,随着5G技术应用范围的扩展,5G系统的复杂度也将呈指数型增长,系统设计和优化需要联合考虑不同域的技术的协同融合。

在传统方法无法对5G系统中存在的问题进行建模求解的场景下,人工智能技术的引入能够提供有效的帮助。例如,根据业务种类与网络环境,在为用户分配无线资源块时,网络资源调度

器灵活选择合适的带宽与符号长度;基于用户和终端的上下文与位置信息,网络提供差异化的移动性管理;利用强化学习方法优化网络功能部署位置,完成网络的智能优化与管理。2017年11月,ITU成立了“机器学习”焦点组,重点研究机器学习、人工智能在包含5G系统的未来网络中的应用。随后,ETSI发布了《自动化下一代网络中的网络和服务操作的必要性和益处》白皮书,强调5G网络中服务管理、运营自动化的目标。学术界也对5G和人工智能的结合展示了极大的研究热情。参考文献[40]首先总结了现有5G技术在网络资源、管理移动性管理等方面所透露的初步人工智能特性,探讨了人工智能在5G中进一步发展的必要性。

尽管人工智能在5G网络中的应用已经得到初步的探讨,神经网络与深度学习方法更是得到了仿真的初步验证,但5G网络与人工智能的结合依然处于初步阶段,未来仍旧需要进一步深化该方面的研究,包括但不限于人工智能算法中数据的获取与模型的选择以及5G网络在传输、存储和处理大数据时,网络成本和性能的折中。

## 5 结束语

本文对5G网络架构的研究与标准化进行了调研。在阐述5G愿景与需求、总结5G接入网络架构特征的基础上,从学术界和产业界分别介绍了5G接入网络架构的设计原理和具体组成,并根据现有工作,探讨了接入网络架构当前存在的挑战和对网络发展前景的展望,指出未来网络智能化的需求。

## 参考文献:

- [1] 3GPP. Study on new radio access technology: radio access architecture and interfaces: TR38.801[S]. 2016.
- [2] 董爱先, 王学军. 第5代移动通信技术及发展趋势[J]. 通信技术, 2014, 47(3): 235-240.

- DONG A X, WANG X J. Technologies and future development trend of 5G mobile communication system[J]. *Communications Technology*, 2014, 47(3): 235-240.
- [3] ITU-R. IMT-vision-framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[R]. 2015.
- [4] ANDREWS J G. What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [5] ETSI. Network functions virtualisation (NFV): architecture framework, document GS NFV002 v1.1.1[R]. 2013.
- [6] 3GPP. Study on architecture for next generation system: TR23.799[S]. 2016.
- [7] YOUSAF F, BREDEL M, SCHALLER S, et al. NFV and SDN—key technology enablers for 5G networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, PP(99): 1.
- [8] TZANAKAKI A. Wireless-optical network convergence: enabling the 5G architecture to support operational and end-user services[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(10): 184-192.
- [9] NGMN Alliance. 5G white paper[R]. 2015.
- [10] PATEROMICHELAKIS E. Service-tailored user-plane design framework and architecture considerations in 5G radio access networks[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 17089-17105.
- [11] TALEB T, KSENTINI A, JÄNTTI R. Anything as a service for 5G mobile systems[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(6): 84-91.
- [12] VILALTA R. TelcoFog: a unified flexible fog and cloud computing architecture for 5G networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(8): 36-43.
- [13] MARKAKIS E. Computing, caching, and communication at the edge: the cornerstone for building a versatile 5G ecosystem[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(11): 152-157.
- [14] 3GPP. Proposal for study on a next generation system architecture: S2-153703[S]. 2015.
- [15] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS23.501[S]. 2018.
- [16] 5GPPP. View on 5G architecture[R]. 2017.
- [17] 3GPP. Way forward on the overall 5G NR work plan[S]. 2017.
- [18] 3GPP. NG-RAN; architecture description: TS38.401[S]. 2018.
- [19] LIN Y, SHAO L, ZHU Z, et al. Wireless network cloud: architecture and system requirements[J]. *IBM Journal of Research & Development*, 2010, 54(1): 1-12.
- [20] SUNDARESAN K. FluidNet: a flexible cloud-based radio access network for small cells[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 2(2): 915-928.
- [21] TANG J, WEN R, QUEK T, et al. Fully exploiting cloud computing to achieve a green and flexible C-RAN[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(11): 40-46.
- [22] BEYENE Y D, JANTTI R, RUTTIK K. Cloud-RAN architecture for indoor DAS[J]. *IEEE Access*, 2014(2): 1205-1212.
- [23] PARK S, CHAE C, BAHK S. Large-scale antenna operation in heterogeneous cloud radio access networks: a partial centralization approach[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(3): 32-40.
- [24] MEERJAK, SHAMI A, REFAEY A. Hailing cloud empowered radio access networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(1): 122-129.
- [25] CHEN M, SAAD W, YIN C, et al. Echo state networks for proactive caching in cloud-based radio access networks with mobile users[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3520-3535.
- [26] BONOMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//Workshop on Mobile Cloud Computing, MCC'12, August 17, 2012, Helsinki, Finland. New York: ACM Press, 2012: 13-16.
- [27] PENG M, YAN S, ZHANG K, et al. Fog-computing-based radio access networks: issues and challenges[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 46-53.
- [28] TANDON R, SIMEONE O. Harnessing cloud and edge synergies: toward an information theory of fog radio access networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2016, 54(8): 44-50.
- [29] ZHANG H, QIU Y, CHU X, et al. Fog radio access networks: mobility management, interference mitigation, and resource optimization[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 24(6): 120-127.
- [30] PENG M, ZHANG K. Recent advances in fog radio access networks: performance analysis and radio resource allocation[J]. *IEEE Access*, 2016(4): 5003-5009.
- [31] LIANG K, ZHAO L, CHU X, et al. An integrated architecture for software defined and virtualized radio access networks with fog computing[J]. *IEEE Network*, 2017, 3(1): 80-87.
- [32] XIANG H, ZHOU W, DANESHMAND M, et al. Network slicing in fog radio access networks: issues and challenges[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(12): 110-116.
- [33] SHIH Y, CHUNG W, PANG A, et al. Enabling low-latency applications in fog-radio access networks[J]. *IEEE Network*, 2017, 31(1): 52-58.
- [34] KU Y, LIN D, LEE C, et al. 5G radio access network design with the fog paradigm: confluence of communications and computing[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 55(4): 46-52.
- [35] CHANG C, NIKAEIN N. RAN runtime slicing system for flexible and dynamic service execution environment[J]. *IEEE Access*, 2018(6): 34018-34042.
- [36] KSENTINI A, NIKAEIN N. Toward enforcing network slicing on RAN: flexibility and resources abstraction[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2017, 5(6): 102-108.
- [37] FERRUS R. On 5G radio access network slicing: radio interface



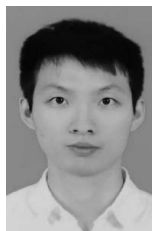


- protocol features and configuration[J]. IEEE Communication Magazine, 2018, 56(5): 184-192.
- [38] HA V, LE L. End-to-end network slicing in virtualized OFDMA-based cloud radio access networks[J]. IEEE Access, 2017(5): 18675-18691.
- [39] 项弘禹, 肖扬文, 张贤, 等. 5G 边缘计算和网络切片技术[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 54-63.
- XIANG H Y, XIAO Y W, ZHANG X, et al. Edge computing and network slicing technology in 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(6): 54-63.
- [40] LI R. Intelligent 5G: when cellular networks meet artificial intelligence[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 175-183.

## [作者简介]



项弘禹（1993-），男，北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室博士生，主要研究方向为雾无线接入网中切片架构及理论性能。



张欣然（1992-），男，北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室博士生，主要研究方向为车联网和 5G 系统级仿真。



朴竹颖（1994-），女，北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室硕士生，主要研究方向为无线接入网中的边缘缓存管理和优化。



彭木根（1978-），男，北京邮电大学网络技术研究院副院长、教授、博士生导师，主要研究方向为雾无线接入网络、后 5G 组网理论和关键技术、空间信息网络等。