

融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络

齐彦丽 周一青 刘 玲 田 霖 石晶林

<sup>1</sup>(中国科学院大学 北京 100049)  
<sup>2</sup>(中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 北京 100190)  
<sup>3</sup>(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 100080)  
(qiyanli@ict.ac.cn)

MEC Coordinated Future 5G Mobile Wireless Networks

Qi Yanli, Zhou Yiqing, Liu Ling, Tian Lin, and Shi Jinglin

<sup>1</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)  
<sup>2</sup>(Wireless Communication Technology Research Center, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)  
<sup>3</sup>(Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device (Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences), Beijing 100080)

**Abstract** Future 5G wireless networks are confronted with various challenges such as exponentially increasing mobile traffic and new services requiring high backhaul bandwidth and low latency. Integrating mobile edge computing (MEC) into 5G network architectures may be a promising solution. First of all, this paper introduces the functional framework of MEC systems. Then the standardization progress of MEC in 5G is presented. Supporting MEC, the functionalities of 5G core network are described in detail. Given MEC deployment strategies and the mobile network architectures of future 5G, a MEC coordinated 5G network architecture is proposed, which demonstrates that 5G will be a network featured by the coordination of communications and multi-level computing. The proposed network architecture can support various communication modes adaptively and enable the resource sharing efficiently with virtualization technologies. Some researches have been carried out on MEC coordinated 5G, such as basic theorems related to the 5G network capacity concerning both the communication and computing resources, and key technologies including the joint optimization of communication and computing resources, multicast based on computing and cache, and bandwidth-saving transmission. It can be seen that much more efforts need to be put on MEC coordinated 5G before the network can be fully understood.

**Key words** fifth generation mobile communication technology (5G); mobile edge computing (MEC); integration of communication and computing; centralized network architecture; multi-level computing

**摘 要** 未来 5G 移动通信网络面临移动流量暴涨,新型业务提出高回传带宽、低时延等挑战,移动边缘计算 MEC 有望解决上述问题.首先介绍 MEC 的网络框架结构及其在 5G 中的标准化进展,然后结合 MEC 的部署策略和未来 5G 网络架构,提出融合 MEC 的未来 5G 移动通信网络架构.从该架构可以看到,未来 5G 将是一个通信与多级计算协同的网络.所提架构可灵活、自适应地支持多种通信模式,同时可采用虚拟化技术实现通信、计算、存储资源的高效共享.面向通信与计算协同,融合 MEC 的 5G 网络

在基础理论方面面临的主要挑战是网络容量分析,关键技术方面则包括通信与计算资源的协同优化、计算存储多播、节带化传输等.相关理论与技术亟需进一步的深入研究探讨,推动通信与计算融合发展.

**关键词** 第 5 代移动通信技术;移动边缘计算;通信与计算融合;集中式架构;多级计算

**中图法分类号** TP393;TN929.5

近年来,全球移动数据流量爆炸式增长,预计到 2021 年移动数据流量将达到 49 EB,相比 2016 年增长 7 倍,其中视频流量占比 78%.同时,新型业务层出不穷,例如增强/虚拟现实(augmented reality/virtual reality, AR/VR)、工业物联网、车联网等低时延业务的涌现,给现有移动通信网络带来巨大挑战.在现有架构下,业务流量需要流经整个接入网和核心网,通过基站、转发设备等多重关键设备,即使无线侧的传输带宽得到提升,端到端业务仍然存在不可预知的拥塞,时延难以保证,严重影响业务体验.为了有效满足移动互联网、物联网高速发展所需的高回传带宽、低时延的要求,欧洲电信标准化协会(European Telecommunication Standard Institute, ETSI)于 2014 年提出了移动边缘计算(mobile edge computing, MEC).

MEC 通过将网络侧功能和应用部署能力下沉至距离用户设备(user equipment, UE)最近的无线接入网(radio access network, RAN)边缘,为应用开发商和内容供应商提供云计算能力和 IT 服务环

境,使得应用部署更加灵活、网络能力按需编排、业务处理更靠近用户,更好地满足高回传带宽、低时延等应用需求.其中,对于高清、超清视频等高带宽业务,通过将热点内容缓存在网络边缘,可有效节约回传带宽资源,同时降低用户访问时延,有效提升业务体验;对于低时延业务,运营商通过开放网络边缘使得已授权的第三方能够为移动用户、企业及垂直行业灵活、快速地部署应用及服务,有效降低端到端时延.目前工业界和学术界对 MEC 展开了深入广泛的研究.2015 年 ETSI 在全球首先发起了 MEC 标准化工作<sup>[1]</sup>,随后移动通信国际标准化组织 3GPP 也将 MEC 接收为 5G 移动网络架构的关键技术.5G 与边缘计算的协同发展已经成为业界共识.

1 MEC 网络架构

MEC 网络框架结构如图 1 所示<sup>[2]</sup>,主要分为 2 层:系统级和主机级.其中系统级结构由 MEC 系

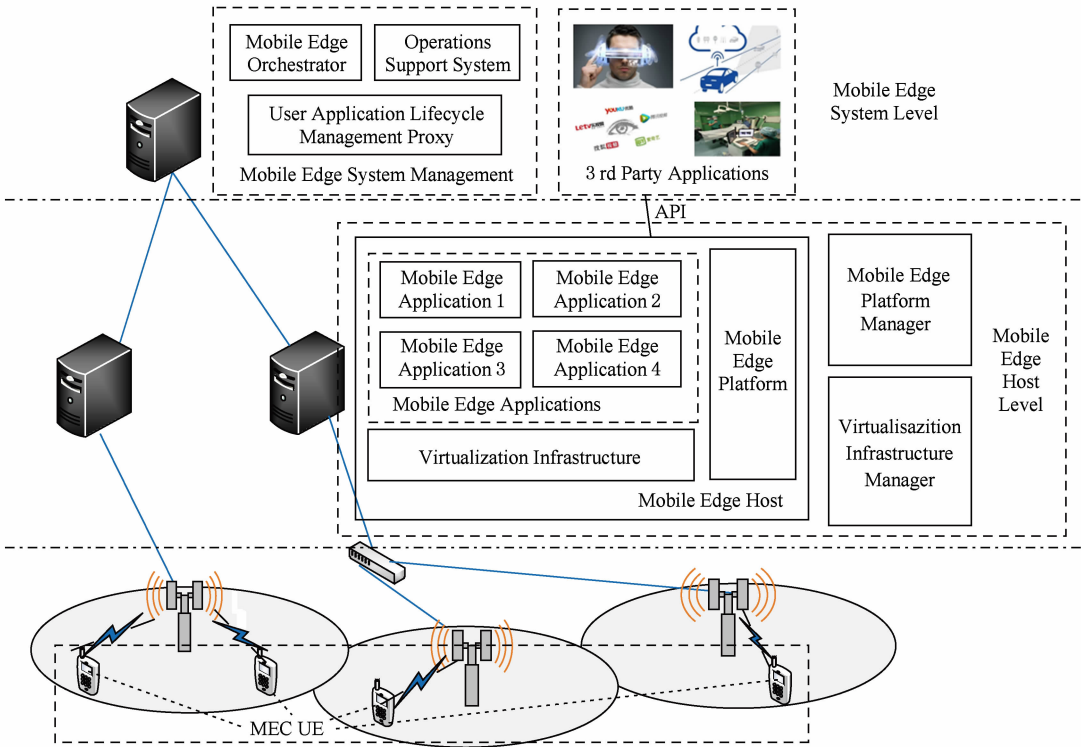


Fig. 1 Architecture of mobile edge computing systems

图 1 MEC 网络架构

统级管理和用户及第三方实体组成. MEC 系统级管理用于对网络中已部署的 MEC 主机、可利用的资源、可利用的 MEC 服务以及网络拓扑进行整体把握;载入用户或第三方应用程序包,包括检查包的完整性和真实性、验证应用程序的规则和需求,必要时对其进行调整以满足运营商策略;记录载入的数据包并为应用程序的进一步处理准备好虚拟基础设施管理器,以便其根据应用程序处理的需求对虚拟化基础设施进行管理,如分配、管理、释放虚拟化基础设施的虚拟化资源;基于时延、可用资源等为应用程序选择或重选合适的 MEC 主机.

主机级结构主要包括 MEC 主机级管理和 MEC 主机,MEC 主机级管理包括移动边缘平台管理器和虚拟化基础设施管理器,而 MEC 主机由移动边缘平台(mobile edge platform)、移动边缘应用(mobile edge application, ME app)及虚拟化基础设施(virtualization infrastructure)三部分组成. MEC 主机级管理主要进行移动边缘平台管理及虚拟化基础设施管理;移动边缘平台和移动边缘应用可以提供或使用彼此的服务,如移动边缘应用发现并使用移动边缘平台所提供的无线网络信息、UE 等相关的位置信息、带宽管理等服务,同时通知平台自身能够提供的服务并为 UE 提供服务;移动边缘

平台则为移动边缘应用提供运行环境,同时接收来自其管理器、应用程序或服务的业务规则并对数据平面进行相应指示,以便进行业务路由;此外还接收来自其管理器的域名解析系统(domain name system, DNS)的记录并配置一个 DNS 代理/服务器,管理移动边缘服务,例如应用程序可在移动边缘平台的服务列表中进行登记,成为平台提供的移动边缘服务之一.另外通过移动边缘平台还可以访问永久存储及时间信息.虚拟化基础设施是采用通用硬件,为运行多个移动边缘应用提供底层硬件的计算、存储、网络资源和硬件虚拟化组件,使得有限处理资源能够灵活、有效地复用共享;移动边缘应用则是基于虚拟化基础设施形成的虚拟应用,通过标准应用程序接口(application program interface, API)与第三方应用实现对接,为用户提供服务.

2 MEC 的 5G 标准化进展

目前,MEC 在 3GPP 5G 的标准化进展如图 2 所示,标志性的工作是 3GPP SA2 工作组(SA 方向负责业务与系统方面的工作)R15(3GPP 移动通信系统标准版本号)于 2016 年 4 月份正式接受 MEC 成为 5G 网络架构的关键议题.

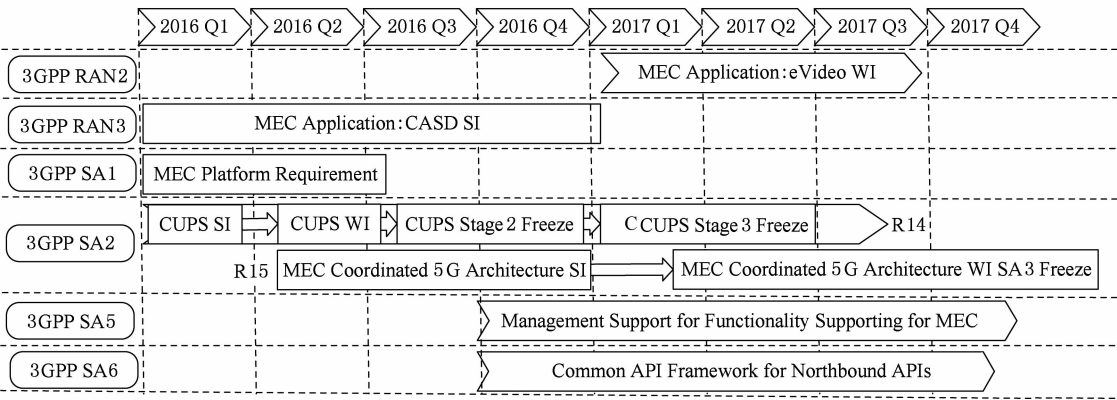


Fig. 2 Standardization of MEC in 3GPP

图 2 3GPP 中 MEC 标准化进展

此外 SA2 工作组在 R14 方向主要进行控制平面(control plane, CP)与用户平面(user plane, UP)分离(user and control plane separation, CUPS)的 5G 核心网架构演进<sup>[3]</sup>工作,目前第 3 阶段已冻结.其中 5G 核心网会将 4G 核心网中固化的同一网元内的不同功能剥离,重组成不同的模块,不同模块专注于特定功能.如图 3 所示,4G 核心网主要由移动管理实体(mobility management entity, MME)、服务网

关(serving gateway, S-GW)及分组数据网网关(packet data network gateway, P-GW)等固化的网元及网关组成.5G 核心网会将 4G 核心网中 MME 的功能分解到会话管理功能(session management function, SMF)、接入和移动性管理功能(access and mobility management function, AMF)等;4G 核心网 S-GW 及 P-GW 的路由功能则经过重组,由 5G 核心网中的用户平面功能(user plane function, UPF)

执行,同时 5G 核心网将增加网络开放功能(network exposure function, NEF),用于将监控、配置、策略及收费等网络能力开放给第三方,以支持 MEC 在 5G 网络中的部署. C/U 分离的架构支持用户平面功能 UPF 及部分控制平面功能模块,如会话管理功能 SMF、策略控制功能 (policy control function,

PCF)、网络开放功能 NEF 等,随 MEC 服务器进行按需灵活部署. 此外,通过增加本地数据网 (local data network, L-DN),在 MEC 实现内容访问. 综上所述,5G 的网络架构如图 3 所示,其中应用程序功能(application function, AF)用于提供应用程序,可以由运营商或第三方管理.

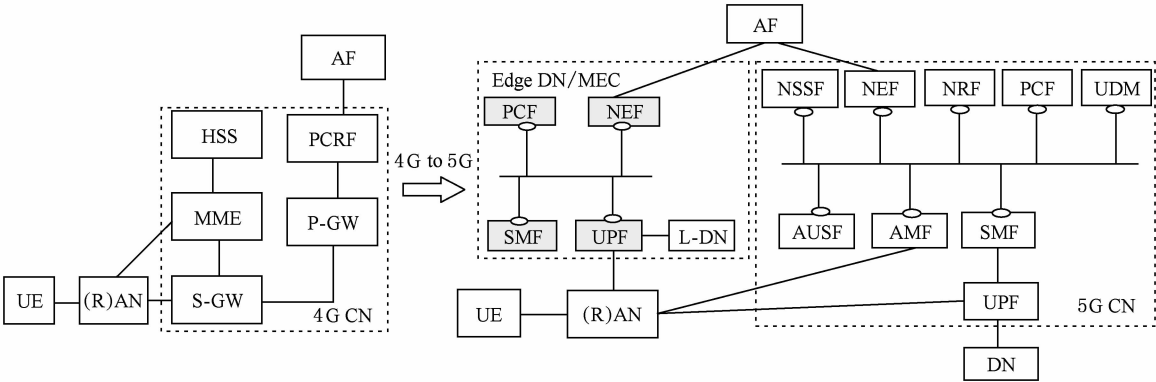


Fig. 3 Evolution of mobile communication core network from 4G to 5G

图3 移动通信核心网从 4G 到 5G 的演进

与此同时,SA1 工作组在 AR 等 Smarter 服务实例中研究了 MEC 开发平台需求<sup>[4]</sup>. SA5 工作组主要开展了业务平台/API 架构、MEC 管理、MEC 相关特性网络功能管理、平台和第三方应用管理等研究<sup>[5]</sup>. SA6 工作组则研究了统一业务平台及北向 API 架构<sup>[6]</sup>.

其他工作组也对 MEC 展开了相应的标准化工作. 3GPP RAN3 工作组负责移动通信系统网络整体结构及 S1(基站与移动性管理实体之间的接口)、X2(基站之间的接口)等接口技术的标准化,2016 年开始无线感知与智能分发(context aware service delivery,CASD)即 MEC 应用方面的研究<sup>[7]</sup>,目前处于技术可行性研究阶段(study item, SI). 同时 RAN2 工作组负责移动通信系统协议架构第 2 层及第 3 层的工作,从 2017 年开始研究视频增强(enhancements on video, eVideo)<sup>[8]</sup>,目前处于具体技术规范撰写阶段(work item, WI).

总体而言,为支持 MEC,5G 网络需支持的功能主要包括 7 个方面<sup>[9]</sup>:

1) 用户平面选择(重选)功能. 5G 核心网应具有选择或者重选用户平面功能 UPF 的能力,以便将用户业务路由到本地数据网. 即 5G 核心网的接入和移动性管理功能 AMF 根据各用户平面功能 UPF 的部署场景(如集中部署、靠近或直接在接入网站点分布部署)来选择和重选用户平面功能 UPF,以便将用户业务路由到本地数据网,在 MEC 实现内容

访问.

2) 本地路由和业务定向功能. 5G 核心网选择业务,将其路由给本地数据网中的应用程序. 即当应用程序服务器有请求时,5G 核心网触发 UE 中的特定应用,后者通过 5G 核心网的 SMF、AMF 及统一数据管理(unified data management, UDM)等选择与特定的本地数据网建立会话,将业务路由到本地数据网中的应用程序,在 MEC 实现内容访问.

3) 支持会话及服务连续性,可以满足 UE 和应用程序的移动性需求.

4) 应用程序功能 AF 可能通过 PCF 或 NEF 来影响用户平面功能的选择(重选)及业务路由. 即当 AF 由第三方管理,运营商允许 AF 直接接入网络时,AF 可能会通过发送请求来影响 5G 核心网 SMF 对会话业务的路由决策,影响用户平面功能的选择(重选)进而将业务路由到本地数据网. 当不能直接接入网络时,AF 将通过 NEF 来影响 UPF 的选择(重选)及业务路由.

5) 网络能力开放功能. 5G 核心网和 AF 可以直接或通过 NEF 为彼此提供信息. 即当 AF 由运营商管理时,AF 可以与 5G 核心网直接交互;当 AF 由第三方管理时,AF 可以通过 NEF 实现与核心网的交互.

6) QoS 和计费功能. 定义策略控制功能 PCF,为路由到本地数据网、在 MEC 实现内容访问的业务提供 QoS(quality of service)控制和计费规则.

7) 支持局部区域数据网(local area data network, LADN). 5G 核心网为连接到局部区域数据网 LADN 提供支持. 其中 LADN 是部署在某些特殊区域, 为用户提供某些特殊的数据网域名(data network name, DNN)接入的数据网. 5G 核心网的 AMF 为 UE 提供 LADN 的可用性信息, SMF 追踪 UE 是否位于 LADN 服务区域, 进而决策 UE 是否连接到局部区域数据网.

### 3 融合 MEC 的 5G 网络架构

#### 3.1 MEC 在网络中的部署

在移动通信网络中, MEC 的部署方式主要有 2 种: 1) 将 MEC 功能集成到基站, 通过软件升级或增加板块, 将 MEC 作为基站的增强功能; 2) 将 MEC 作为独立的网元进行部署, 同时实现与核心网的协同与统一管理.

此外, MEC 的部署位置可以根据性能、开销、已有网络部署等因素, 结合业务的时延需求, 采取不同层级的网络部署策略. 一种策略是 MEC 可部署在无线接入点, 由于其靠近基站基带单元(baseband unit, BBU), 没有传输时延, 适用于时延要求高的业务及应用, 但由于覆盖范围小, 只能提供小范围、本地化的服务, 节点使用效率较低. 另一种策略是 MEC 可部署在汇聚点, 能够提供大范围、较近距离的服务及云端业务支持, 但由于基站 BBU 到 MEC 存在传输时延, 适用于较低时延的业务及应用.

值得注意的是, 当 MEC 部署在无线接入点时, 传统核心网整个网元/网关功能需要随 MEC 分布部署于网络边缘<sup>[10]</sup>, 这将导致大量的接口配置、信令交互设计等, 对现有网络架构改动较大. 但如果核心网采用控制平面与用户平面分离的架构, 则只需将部分模块化的网元/网关功能, 如接入和移动性管理功能、网络开放功能等, 与用户平面一起部署到 MEC, 实现随 MEC 按需灵活部署, 使业务处理更加快速, 有效降低时延; 同时其他控制平面网元/网关功能仍集中部署, 减轻接口配置负担.

#### 3.2 未来 5G 网络中 MEC 的部署

未来的 5G 网络与传统移动通信网络的架构有所不同, 因此 5G 中 MEC 的部署有其独特性. 未来 5G 将采用超密集小区的技术来提升网络容量, 即将小区覆盖半径进一步缩小, 用更多的小区实现某一区域的覆盖, 以便进一步提高频谱利用的效率. 移动通信系统从 1G 发展到 5G, 一直在采用这种缩小半

径、增加小区数的网络扩容技术. 目前为止, 这种技术已经给移动通信网络带来了 1 000 倍的容量增长, 未来 5G 将继续采用超密集小区的技术改善网络容量<sup>[11-12]</sup>.

传统的分布式移动通信网络架构下, 即一个小区由一个基站管理且各基站基本互相独立的架构下, 小区的密集化将给 5G 网络带来众多挑战. 由于基站需要进行大量的信号处理, 要有复杂的硬件设备进行支撑, 需要一个专门的机房放置这些设备, 并配置散热设施对机房进行降温. 这样, 小区密集化就带来了难以寻求基站站址、网络能耗与维护费用直线上升等问题. 此外, 传统架构下各小区基站物理上是互相独立的, 因此各基站的计算存储资源难以共享. 5G 网络将采用集中式网络架构来解决这些问题. 与传统的架构不同, 集中式网络架构将所有小区基站的天线与信号处理设备分离, 天线部分留在基站站址, 信号处理设备集中到一个控制中心. 一方面, 相比整个小区基站, 天线所需位置空间大大减少, 容易寻址. 另一方面, 所有基站的信号处理设备集中管理, 有利于降低网络能耗与维护费用, 而且可以共享各基站的计算资源, 带来资源的统计复用增益. 目前已有多种集中式移动通信网络架构, 例如中国移动提出的 CRAN 架构<sup>[13]</sup>、IBM 提出的 Wireless Network Cloud 架构<sup>[14]</sup>和中国科学院计算技术研究所提出的超级基站架构<sup>[15]</sup>等.

图 4 所示是中国科学院计算技术研究所的超级基站功能框图, 主要由硬件资源层、资源管理层和虚拟基站层组成. 其中硬件资源是硬件架构基础, 包括多模基带处理 DSP 池、协议处理 CPU 池等, 支持大规模移动通信基带运算与协议处理; 资源管理层是逻辑功能创新关键, 包括基带处理管理和协议处理管理软件, 主要采用虚拟化技术分配、管理硬件资源, 在此之上虚拟出基站功能, 构成虚拟基站层. 由于超级基站采用了资源池化和虚拟化技术, 通过定制不同模式的基带和协议处理软件即可实现不同模式的通信系统, 实现硬件资源的高效复用, 同时有利于网络的快速升级, 节约成本. 此外, 超级基站采用资源水平共享及集中管控的方式, 能够从全局角度对硬件资源进行实时的动态调度, 有效提升通信、计算、存储资源的利用率, 实现负载均衡, 解决潮汐效应带来的资源浪费问题. 此外, 由于超级基站采用物理集中、逻辑分布的组网方式, 射频单元与基带处理单元实现解耦, 有利于运营商根据实际需求灵活部署远端射频单元.

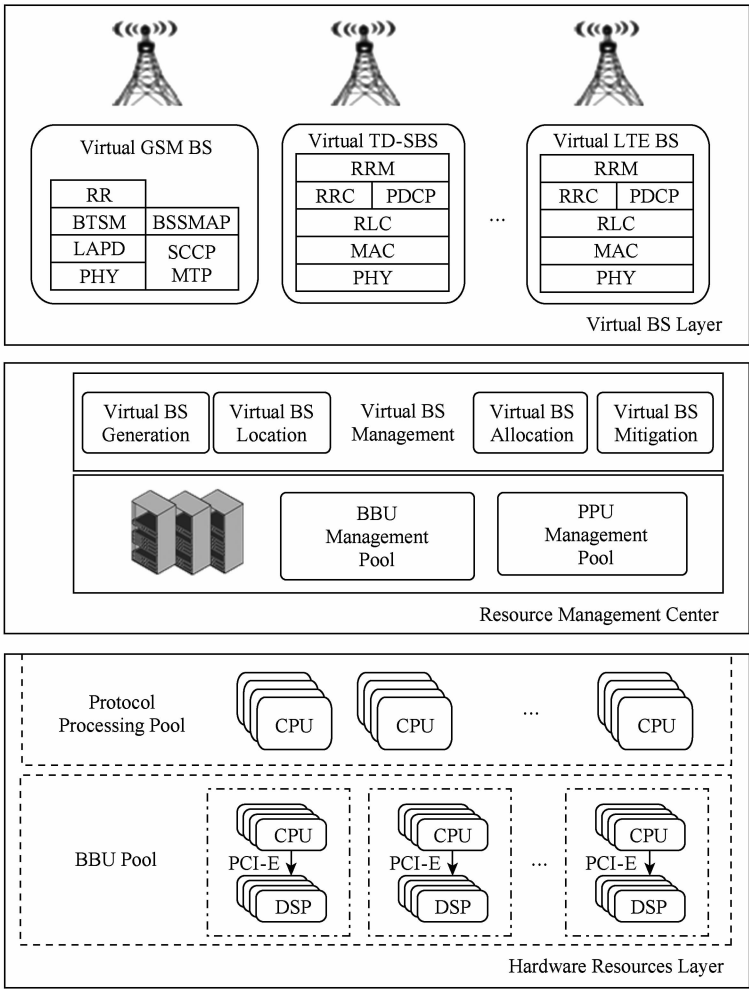


Fig. 4 Framework for super base station

图 4 超级基站基本功能框图

对比超级基站与图 1 中的 MEC 主机可见, 两者的结构和核心功能类似. 因此, 在 5G 集中式网络架构下, 架构的中心控制单元例如超级基站, 完全有能力利用其计算、存储资源池, 虚拟出 MEC 所需功能, 将 MEC 无缝地融合到移动通信网络架构中, 提供边缘计算与存储能力, 满足业务低时延、密集计算的需求. 但相比传统分布式基站, 超级基站由于覆盖范围大, 其到用户最远距离在 20~40 km 之间, 按照光纤中传输速度  $2 \times 10^8$  m/s 计算, 会产生  $100 \mu\text{s} \sim 200 \mu\text{s}$  的时延. 因此, 对于小范围、超低时延业务及应用场景, 可以选择将 MEC 部署在传统分布式基站侧; 而其他大范围、较低时延业务及应用场景, 可以选择将 MEC 嵌入到集中式超级基站中.

综合上述分析, 如图 5 所示, 未来 5G 移动通信网络将是一个融合了集中式架构和传统分布式基站架构的异构通信网络, 同时又是一个能够从移动终端、传统基站、中心控制单元、核心网等不同层级提

供边缘计算或者云计算功能的多级计算网络, 是一个通信与计算协同的网络.

#### 4 融合 MEC 的 5G 网络基础理论与关键技术

由图 5 可见, 融合 MEC 的 5G 网络具备多级计算与通信协同的架构, 在传统移动通信网络中引入多级计算协同, 有可能利用计算和存储资源降低对通信资源的需求, 提升整体网络性能<sup>[16]</sup>. 面向通信与计算协同, 融合 MEC 的 5G 网络在基础理论与关键技术研究方面仍面临众多挑战.

基础理论方面, 如何获取通信与计算融合的 5G 网络容量是一个核心问题. 只考虑通信资源, 如频带和发送功率, 无线通信的容量已由香农给出<sup>[17]</sup>; 但考虑 MEC 等引入的计算与存储资源后, 给出容量与通信资源关系的香农理论并不能直接扩展到计算与存储资源; 文献[18]的研究表明: 对比通信资源带



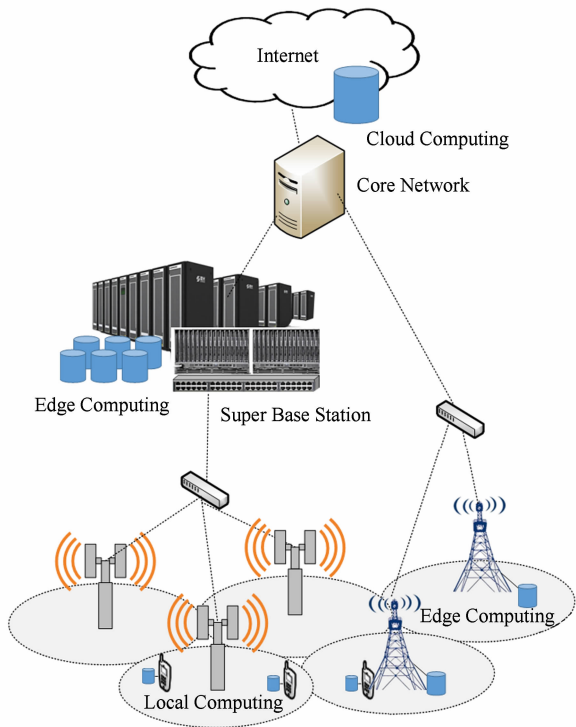


Fig. 5 A MEC coordinated 5G mobile communication network architecture

图5 融合 MEC 的未来 5G 移动通信网络架构

来的增益呈对数关系,计算维度带来的容量增益与计算和存储维度的能力近似呈线性关系.因此,若能有效融合计算与通信,有望推动未来通信网络的可持续性发展;对此,研究人员进行了一系列相关工作:文献[19]总结了通信与计算融合的基础理论研究方向,即如何定义并建模网络效用容量、网络效用容量与计算能力之间如何转换以及如何利用虚拟化及网络化技术实现资源的有效分配;文献[20]中研究了通信、计算、存储 3 维资源的协同,并将计算能力用“计算度”来衡量,表征操作中涉及的信息流的数量.但如何规范通信、计算和存储资源的定义,面向未来通信与计算融合的 5G 网络,给出一个统一的容量分析,仍是需要解决的一大挑战.

关键技术方面,对融合 MEC 的 5G 网络而言,通信与计算资源的协同优化是关注的焦点之一.例如,引入 MEC 后,5G 网络具备了多级计算的能力,那么对每一个业务而言,如何在具有不同计算能力的节点分配其计算任务,即计算任务卸载,是需要解决的一个重要问题.与传统的计算任务卸载主要考虑计算资源不同,MEC 协同的 5G 移动网络是一个无线传输网络,无线资源如带宽和发送功率等是严格受限的,在设计计算任务卸载机制时必须考虑在

内,进行联合优化.在这个方向上,文献[21]以最小化时延为目标,研究了功率约束下的单用户计算卸载决策问题;对于多用户场景,文献[22]则以最小化用户终端功耗为目标,研究了时延约束下传输功率、通信与计算资源的联合优化问题;文献[23]则对卸载决策、物理频谱资源分配、MEC 计算资源分配和内容缓存策略进行建模及联合优化;文献[24]将计算卸载决策问题建模为 MEC 服务器的选择问题,提出一种多用户多 MEC 服务器场景下计算与通信资源联合分配模型;面向 5G 业务需求,文献[25]则从细粒度任务卸载算法、高可靠任务卸载与预测算法以及服务器联合资源管理策略 3 个方面介绍了现有移动边缘计算技术的工作进展.另外一方面,考虑融合了 MEC 的集中式架构单元(如超级基站),可参考现有集中式架构计算资源管理机制<sup>[26]</sup>,根据移动通信网络不同小区内用户流量的不同以及对 MEC 需求的不同,将小区进行分组,每组小区总流量需求或对 MEC 的总需求近似相等,再将计算资源映射到每组小区,就可以有效避免计算资源浪费,降低总体计算资源需求,降低能耗.

此外,正如第 1 节介绍的,未来视频业务将占有所有移动流量的 70% 以上,是最重要的一种移动业务.考虑时延不敏感的大容量流媒体业务,目前研究的一个热点是如何利用 MEC 协同的 5G 网络的计算存储能力来降低无线接入端的拥塞.主要有 2 个方向:

1) 计算存储多播.广播多播是无线传输的本质是一种高谱效和高能效的传输方式<sup>[27-29]</sup>.计算存储多播将网络的计算存储能力与无线通信的广播多播能力结合,变单播为广播多播,保证多个用户接收到所需内容的同时,大幅降低对无线资源的需求.该方向的经典论文是文献[30],其中提出的计算存储多播机制主要思想如下.首先分别将各文件的一部分缓存到不同用户终端,当用户请求完整文件时,网络将各文件剩余部分进行异或运算,然后通过广播多播方式传递给各用户,用户终端利用已缓存的文件内容与广播多播接收内容进行异或运算,就能得到想要的完整文件.该方式可有效降低通信传输需求,提升传输效率.

2) 挖掘视频业务本身的特点,提出创新的压缩机制,实现无线带宽的节带化传输.针对视频中存在大量重复背景画面的特点,文献[31]提出背景识别机制,将背景从视频画面中抠出,剩余的画面用传统压缩方法压缩后传输,背景部分则用语义描述的方式

传输,可有效降低传输带宽,节约无线通信资源。但目前相关机制只在背景相对固定不变视频监控中加以了验证,要应用到一般的视频业务中仍存在挑战。

## 5 总 结

融合 MEC 的未来 5G 移动通信网络有望满足视频业务及新型业务带来的高回传带宽、低时延需求。本文介绍了 MEC 框架结构及其在 5G 中的标准化进展,并总结了 MEC 的部署方式和策略。然后结合 5G 移动通信网络架构的发展,提出了融合 MEC 的、通信与计算协同的未来 5G 移动通信网络架构。最后介绍了面向通信与计算协同,融合 MEC 的 5G 网络在基础理论与关键技术研究方面的挑战和当前的研究进展。可以看到:目前融合 MEC 的 5G 网络仍然面临众多挑战,亟需进一步的深入研究探讨,推动通信与计算协同的发展。未来,我们将针对融合 MEC 的 5G 网络中通信与计算协同理论进行研究,期望得出统一的容量分析;同时将开展多级计算模型研究,以得出通信与计算资源的协同优化解决方案。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Yunchao, Patel M, Sabella D, et al. Mobile edge computing: A key technology towards 5G [S/OL]. Valbonne, France: European Telecommunications Standards Institute (ETSD), 2015. [2017-10-01]. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/white-papers-and-brochures/etsi-white-papers>
- [2] Mobile Edge Computing (MEC) ETSI Industry Specification Group (ISG). Mobile edge computing (MEC): framework and reference architecture, version 1.1.1 [S/OL]. Valbonne, France: European Telecommunications Standards Institute (ETSD), 2016. [2017-10-01]. [http://www.etsi.org/standards-search#page=1&search=Mobile Edge Computing](http://www.etsi.org/standards-search#page=1&search=Mobile+Edge+Computing)
- [3] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 23. 007: Restoration procedures, version 14. 3. 0 [S/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/23-series.htm>
- [4] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TR 22.891: Feasibility study on new services and markets technology enablers, version 14. 2. 0 [R/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2016. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/22-series.htm>
- [5] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TR28.802: Study on management aspects of next generation network architecture and features, version 0. 7. 0 [R/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/28-series.htm>
- [6] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TR 23. 722: Study on common API framework for 3GPP northbound APIs, version 1. 0. 0 [R/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/23-series.htm>
- [7] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TR 36. 933: Study on context aware service delivery in RAN for LTE, version 14. 0. 0 [R/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/36-series.htm>
- [8] China Mobile Communications Corporation (CMCC), Huawei and Intel. R2-1705789: Work plan on further enhancements on video for LTE [R/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/Meetings-R2.htm>
- [9] 3rd Generation Partnership Project. 3GPP TS 23. 501: System architecture for the 5G system, version 1. 2. 0 [S/OL]. Valbonne, France: 3rd Generation Partnership Project Organizational Partners, 2017. [2017-10-01]. <http://www.3gpp.org/DynaReport/23-series.htm>
- [10] IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G network technology architecture [R/OL]. Beijing: IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2015. [2017-10-01]. [http://www.cttl.cn/data/bps/201606/t20160602\\_2171598.htm](http://www.cttl.cn/data/bps/201606/t20160602_2171598.htm)  
(IMT-2020(5G)推进组. 5G 网络技术架构[R/OL]. 北京: IMT-2020(5G)推进组, 2015. [2017-10-01]. [http://www.cttl.cn/data/bps/201606/t20160602\\_2171598.htm](http://www.cttl.cn/data/bps/201606/t20160602_2171598.htm))
- [11] Liu Ling, Zhou Yiqing, Tian Lin, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks [OL]. [2017-10-01]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8110665/>
- [12] Garcia V, Zhou Yiqing, Shi Jinglin. Coordinated multipoint transmission in dense cellular networks with user-centric adaptive clustering [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4297-4308
- [13] China Mobile Research Institute. C-RAN: The road towards green RAN, version 2. 5 [R/OL]. Beijing: China Mobile Research Institute, 2011. [2017-10-01]. <https://wenku.baidu.com/view/0cf7c66c227916888486d7a1.html>  
(中国移动通信研究院. C-RAN: 无线接入网绿色演进, 版本号 2.5 [R/OL]. 北京: 中国移动通信研究院, 2011. [2017-10-01]. <https://wenku.baidu.com/view/0cf7c66c227916888486d7a1.html>)
- [14] Lin Yonghua, Shao Ling, Zhu Zhenbo, et al. Wireless network cloud: Architecture and system requirements [J]. IBM Journal of Research & Development, 2010, 54(1): 38-49
- [15] Qian Manli, Wang Yuanyuan, Zhou Yiqing, et al. A super base station based centralized network architecture for 5G mobile communication systems [J]. Digital Communications and Networks, 2015, 1(2): 152-159



- [16] Maddah-Ali M, Niesen U. Fundamental limits of caching [J]. IEEE International Symposium on Information Theory, 2013, 60(5): 1077-1081
- [17] Shannon C E. Communication in the presence of noise [J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1949, 37(1): 10-21
- [18] Liu Hui, Chen Zhiyong, Qian Liang. The three primary colors of mobile systems [J]. IEEE Communication Magazine, 2016, 54(9): 15-21
- [19] Wang Xinbing, Tao Meixia, Liu Hui. Computing communications: Wireless transmission of mass information [J]. ZTE Technology Journal, 2013, 19(2): 40-43 (in Chinese)  
(王新兵, 陶梅霞, 刘辉. 计算通信: 超量信息无线传输的深度探索[J]. 中兴通讯技术, 2013, 19(2): 40-43)
- [20] Liu Hui, Chen Zhiyong, Tian Xiaohua, et al. On content-centric wireless delivery networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2014, 21(6): 118-125
- [21] Liu Juan, Mao Yuyi, Zhang Jun, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems [C] //Proc of the IEEE Int Symp on Information Theory. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1451-1455
- [22] Barbarossa S, Sardellitti S, Lorenzo P D. Joint allocation of computation and communication resources in multiuser mobile cloud computing [C] //Proc of the 14th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 26-30
- [23] Wang Chenmeng, Liang Chengchao, Yu F R, et al. Computation offloading and resource allocation in wireless cellular networks with mobile edge computing [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2017, 16(8): 4924-4938
- [24] Lin Xiaopeng, Zhang Heli, Ji Hong, et al. Joint computation and communication resource allocation in mobile-edge cloud computing networks [C] //Proc of the IEEE Int Conf on Network Infrastructure and Digital Content. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 166-171
- [25] Tian Hui, Fan Shaoshuai, Lü Xinchun, et al. Mobile edge computing for 5G requirements [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(2): 1-10 (in Chinese)  
(田辉, 范绍帅, 吕昕晨, 等. 面向 5G 需求的移动边缘计算[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(2): 1-10)
- [26] 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): 042303
- [27] Zhou Yiqing, Liu Hang, Pan Zhengang, et al. Spectral and energy efficient two-stage cooperative multicast for LTE-A and beyond [J]. IEEE Wireless Magazine, 2014, 21(2): 34-41
- [28] Zhou Yiqing, Liu Hang, Pan Zhengang, et al. Cooperative multicast with location aware distributed mobile relay selection: Performance analysis and optimized design [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8291-8302
- [29] Zhou Yiqing, Liu Hang, Pan Zhengang, et al. Energy efficient two-stage cooperative multicast based on device to device transmissions: Effect of user density [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7297-7307
- [30] Maddah-Ali M A, Niesen U. Fundamental limits of caching [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2014, 60(5): 2856-2867
- [31] Liu Chang, Tian Lin, Zhou Yiqing, et al. Video content redundancy elimination based on the convergence of computing, communication and cache [C] //Proc of the IEEE Global Communications Conf. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 16654755



**Qi Yanli**, born in 1991. PhD candidate. Her main research interests include mobile edge computing, convergence of communication, computation and cache, radio resource management, etc.



**Zhou Yiqing**, born in 1975. Professor and PhD supervisor. Her main research interests include convergence of communication and computing, cooperative communication, interference management, broadcast/multicast transmission, etc.



**Liu Ling**, born in 1990. PhD candidate. Her main research interests include cognitive radio, interference and resource management in ultra-dense networks and heterogeneous networks, etc.



**Tian Lin**, born in 1980. Associate professor. Her main research interests include wireless resource management and multimedia multicast schemes in next-generation mobile communication systems.



**Shi Jinglin**, born in 1972. Professor and PhD supervisor. His main research interests include wireless communications system architecture and management, wireless signal processing theory, and wireless communications baseband processor design.