

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.05.002

未来移动通信网络中移动边缘计算技术

虞湘宾 王光英 许方铖

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要:未来移动通信网络将面临移动数据业务和流量急剧增加,需要低时延和低能耗的高效技术。移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)在网络边缘侧进行计算卸载和资源存储,能极大地降低处理时延和能耗,提高用户服务体验。本文首先概述了 MEC 的基本原理和技术特点;然后通过具体的 MEC 的应用场景,进一步总结了 MEC 技术的优势;最后在现有工作的基础上,给出了 MEC 可能面临的挑战,并对未来的发展方向进行了论述与展望。MEC 将会进一步推动计算和通信的融合,助力 5G 进入新场景多需求下的多技术融合新阶段。

关键词:移动通信系统; 移动边缘计算; 5G; 物联网

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)05-0586-09

Mobile Edge Computing Technique in Future Mobile Communication Network

YU Xiangbin, WANG Guangying, XU Fangcheng

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The future mobile communication network will face the challenges of high mobile data traffic and more terminal data types, and the resulting effective technology with low latency and low energy consumption is required. Mobile edge computing (MEC) arises as an emergent technology for meeting the above requirements. MEC can run the computing offloading and resources storage on the edge of the network, which can greatly reduce the processing time delay and energy consumption, and contribute to a better quality of user experience. Firstly, the paper summarizes the fundamental principles and technical characteristics of MEC. Then, through specific MEC application scenarios, the paper further summarizes the advantages of MEC. Finally, on the basis of the existing work, the challenges and prospects of MEC are discussed. MEC will promote the integration of computing and communications, and power 5G towards new stage with the multiple technology fusion.

Key words: mobile communication systems; mobile edge computing; 5G; Internet of Things

物联网和大数据时代的快速发展,带来了指数式增长的终端连接种类和移动数据流量以及更加多样化的服务场景,超低时延、超高能效、超高可靠性和超高密度连接成为了未来移动通信系统的必要要

求^[1],也加速了第五代移动通信(The fifth generation of mobile technology, 5G)系统的发展和实现。随着移动通信技术的快速发展,对于高质量无线服务需求呈现指数增长趋势,在 5G 时代,移动网络服务的

收稿日期: 2018-05-22; **修订日期:** 2018-08-22

作者简介: 虞湘宾,男,教授,博士生导师,中国电子学会通信分会专家委员,中国电子学会信息论分会委员,主要从事未来宽带移动通信关键技术研究。以第一作者身份在国内外学术期刊如 IEEE Transactions on Communications, IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, IET Communications 等发表学术论文 100 余篇,其中 SCI 检索 60 余篇。

通信作者: 虞湘宾, E-mail: yxbxwy@nuaa.edu.cn.

引用格式: 虞湘宾,王光英,许方铖. 未来移动通信网络中移动边缘计算技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(5): 586-594. YU Xiangbin, WANG Guangying, XU Fangcheng. Mobile edge computing technique in future mobile communication network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(5): 586-594.

对象除了手机、平板电脑外,增加了许多新型的业务场景,如自动驾驶、虚拟现实、增强现实以及云桌面等,更有贴近生活的物联网业务场景,如智能电网、智能农业、智慧城市以及环境监测等^[2]。这些新型服务场景的出现,对时延、能效和可靠性等 5 G 的关键技术指标提出了更高的要求。根据思科 2016 年的可视化网络指数(Visual networking index, VNI)预测报告可知,在 2015—2020 年,全球移动数据流量将会增长近 8 倍,并且截至 2020 年,网络连接速度将会增长 3 倍以上。然而面对这些不断增长的需求,即使现有的 4G/5G 通信技术,也依旧存在着很大的缺陷和不足。现有的移动网络架构与终端设备处理已经不能满足上述低时延、高效能与高可靠性的应用需求,越来越紧张的频谱资源对 5G 超低功耗的实现带来新的挑战^[3]。

在上述应用背景下,学术界和工业界提出了相应的解决方法,例如使用云计算、雾计算和移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)进行数据的计算与存储。传统的集中式处理模式以云计算为核心进行大数据的计算与存储,这种处理方式不占用其他计算资源和存储资源,所有的处理过程均在数据的云中心实现,大大节省了资源开销。然而,随着万物互联时代的到来,传统的云计算模式中数据回传链路带来的较高时延、较高损耗,已不能满足海量设备与海量数据的处理需求,需要新的计算模式对云计算所暴露出的问题进行解决,于是催生了新型的计算模式,例如雾计算和移动边缘计算^[4]。这两种新型的计算模式,将数据的处理、分析与存储集中在网络边缘侧进行。雾计算作为云计算概念的延伸,是一种在地理位置上分布广泛的计算架构,比云更贴近地面,与边缘计算不同的是,雾计算更强调用户与处理中心的连续统一,而移动边缘计算更加强调用户与处理中心的距离,两者本质上均是云计算将处理中心全部或部分扩展到网络边缘。通过将海量数据在网络边缘进行计算与分析,并将部分或全部原始云计算模型的计算任务迁移到网络边缘设备上,这样的处理方式使得云中心的数据加载减少,带宽压力得到缓解,数据处理效率大大提高^[5,6],迅速发展为 5G 的一项关键技术。传统云计算技术与移动边缘计算技术相关特征对比如表 1 所示。

表 1 云计算与移动边缘计算对比

Tab. 1 Comparison between cloud computing and MEC

特征	云计算	移动边缘计算
网络部署	集中式:数据处理中心位于云端	分布式:服务器位于数据中心与终端之间
用户距离	远离终端用户	靠近终端用户
时延	较高时延	低时延
可扩展性	仅数据中心	中心和网路边缘
存储容量	高	低
功率损耗	高	低

1 MEC 基本原理

与传统云计算需将计算任务卸载到云服务器不同的是,移动边缘计算卸载和存储资源都在靠近用户的边缘侧进行,不仅减少了传统云计算回传链路的资源浪费,而且大大降低了时延,满足了终端设备计算能力的扩展需求,保证了任务处理的高可靠性。

1.1 系统模型

欧洲电信标准化协会(European telecommunication standard institute, ETSI)于 2014 年率先提出了 MEC 的概念,定义为:在移动网络的边缘提供 IT 服务环境和云计算能力^[7]。更进一步地,MEC 是一种区别于集中式云计算的新型计算模式,这种计算模式将数据的计算、存储、缓存等部署在终端设备的网络边缘^[8],这里的网络边缘与数据中心相对,无论是地理距离或是网络距离上都更靠近用户。在研究初期 MEC 中的“M”是 mobile 之意,特指移动网络环境,ETSI 现在将“M”的定义扩展为 Multi-access,旨在将边缘计算的概念扩展到多接入边缘计算^[9,10](Multi-access edge computing, MEC)。MEC 中的“边缘”表示任务靠近或远离网络的节点,也是用于传输数据可以改变基础协议的点。

MEC 通过在网络边缘侧部署大量具有计算和存储功能的边缘服务器,将一些计算要求高或时延要求低的任务卸载到边缘服务器上,这样极大降低了相关硬件设施的能源消耗,大大提高了用户体验。MEC 计算卸载问题主要是设计有效的卸载策略,以能耗或时延为约束条件,建立用户设备和边缘服务器的系统能效最大化的优化问题。移动边缘计算的系统模型包括通信模型和计算卸载模型两个部分^[11,12],系统模型如图 1 所示。



图 1 Cloudlet 与 MEC 网络架构

Fig. 1 Architecture of MEC and cloudlet

一般地,对于解决有 n 个移动终端的 MEC 任务卸载问题,首先建立系统的通信模型,系统的上行数据速率可表示为

$$R_n(\mathbf{a}) = W \log_2 \left(1 + \frac{P_n H_{n,s}}{\omega_n} \right) \quad (1)$$

式中: W 代表上行链路的信道带宽; $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_N]$ 为移动终端的决策分布; P_n 代表移动终端的发送功率; $H_{n,s}$ 为终端用户到基站的信道增益; ω_n 为噪声。

从建立的通信模式(1)中可以看出,如果系统中存在大量的移动用户,在一定时间内将产生大量的数据任务,同时带来极大的干扰,由此给系统造成严重负荷和极低的数据速率。因此为了保证整个系统的可持续稳定运行,必须进行计算任务的卸载,这样就需要建立 MEC 计算模型^[11,12],计算模型一般可分为本地任务计算模型与云计算模型。考虑每个移动终端 n 都有一个计算任务 $C_n \triangleq (B_n, D_n)$,其中 B_n 代表输入数据的大小, D_n 代表 CPU 周期数。

对于本地任务计算模型,在任务执行过程中,令 f_n^m 代表每个移动终端 CPU 的计算能力,因此可以得到本地任务计算时间

$$T_n^m = \frac{D_n}{f_n^m} \quad (2)$$

以及本地计算能耗

$$E_n^m = \gamma_n D_n \quad (3)$$

其中 γ_n 表示每个 CPU 周期的能耗系数。

结合式(2,3),可以得到本地计算任务的代价函数

$$K_n^m = \lambda_n^T T_n^m + \lambda_n^E E_n^m \quad (4)$$

其中, $\lambda_n^T, \lambda_n^E \in [0, 1]$ 表示 MEC 决策过程中移动终端分配的不同权重系数。假如用户处于能源紧张状态并只考虑能耗问题,那么用户就可以设置 $\lambda_n^T = 0, \lambda_n^E = 1$;假如用户在接收服务过程中只考虑时延问题,那么用户就可以设置 $\lambda_n^T = 1, \lambda_n^E = 0$,获得超低时延的服务体验;多数情况下,用户可以同时设置 $\lambda_n^T, \lambda_n^E \in (0, 1)$ 且 $\lambda_n^T + \lambda_n^E = 1$,即在决策过程中同时考虑时延与能耗要求。

进一步地,对于云计算模型,可得到 MEC 任务上传时间与云中心任务计算的时间总和

$$T_n^c(\mathbf{a}) = \frac{B_n}{R_n(\mathbf{a})} + \frac{D_n}{f_n^c} \quad (5)$$

以及云中心计算能耗

$$E_n^c(\mathbf{a}) = \frac{P_n B_n}{R_n(\mathbf{a})} + L_n \quad (6)$$

其中 f_n^c 为云服务器 CPU 的计算能力, L_n 为任务上传的能耗。

结合式(5,6),可以得到云中心计算任务的代价函数,即有

$$K_n^c(\mathbf{a}) = \lambda_n^T T_n^c(\mathbf{a}) + \lambda_n^E E_n^c(\mathbf{a}) \quad (7)$$

用户即可通过配置不同的 λ_n^T, λ_n^E 数值得到

延与能耗加权的最小值。云计算模型的典型特征是数据的计算与存储均在云服务器中心,用户设备将海量数据传输到云中心,增大了网络带宽的负载量,也增加了网络延时。与云计算模型相比,移动边缘计算模型将原有云计算模型的部分或全部任务迁移到网络边缘侧,在边缘设备上提高任务计算和数据分析的能力,极大降低了能源消耗和数据处理时间,减缓了传输带宽的负载压力。移动边缘计算模型与云计算模型相辅相成,两者相互结合才能满足万物互联时代和大数据时代对网络可靠性、数据安全性的更高要求。

1.2 MEC 的发展

在边缘计算(Edge computing, EC)发展初期,首先出现的概念是微云计算(Cloudlet),于2009年提出^[4],它是边缘计算和云计算结合产生的新型网络架构平台,位于云和终端设备的中间层,其架构设计类似于 WiFi 热点场景,终端设备的连接依赖于核心网络的覆盖范围,这样给 Cloudlet 的应用带来了许多局限性。移动边缘计算概念在2014年由 ETSI 提出后,凭借其高效性、低时延和应用灵活性得到了学术界和产业界的广泛关注。Cloudlet 与 MEC 网络架构如图2所示。

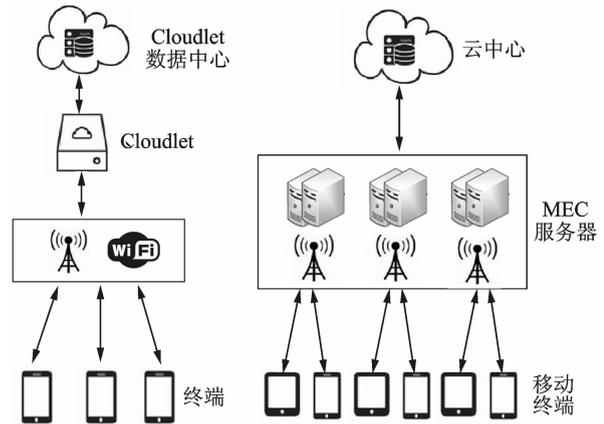


图2 Cloudlet 与 MEC 网络架构

Fig. 2 Architecture of MEC and Cloudlet

在移动边缘计算技术逐渐应用到实际需求的过程中,如何进行计算任务的合理高效卸载,成为亟待解决的重要问题。文献[10,12]从计算、存储和通信3个角度概述了 MEC,旨在建立一个不同方向、相互融合的多元系统;文献[13]从通信角度给出了 MEC 系统的宏观概述,包括 MEC 架构、关键技术、问题挑战以及未来研究方向等,致力于解决 MEC 资源管理分配和移动性问题;文献[14,15]给出了 MEC 的具体应用场景,并分析了 MEC 卸载过程中可能存在的问题;文献[16]提出了融合 MEC 技术的未来 5G 移动通信网络架构,从基础

理论和关键技术两方面构建通信与多级计算协同的网络,以实现通信、计算和存储资源高效共享。目前的研究中,关于实现计算卸载的算法以最小化时延或者最小化用户终端功率损耗为目标,分别解决在有约束条件下的计算卸载问题^[17,18],包括单用户和多用户场景。将计算卸载问题进行建模,并与移动边缘计算服务器进行结合,建立多用户场景下的资源分配模型,设计高可靠任务卸载算法,并

对 MEC 计算资源、频谱资源和缓存资源进行统一分配和优化也成为当前研究的重点^[19]。部分学者致力于研究 MEC 的安全管理问题^[20-24],结合 MEC 的移动性特点实现安全的隐私保护。

随着 5G 的快速发展和越来越广泛的应用,各学者对 MEC 的研究越来越深入,旨在从不同方向和角度对 MEC 进行全面的研 究,具体研究进展见表 2。

表 2 MEC 研究进展

Tab. 2 Research progress of MEC

时间	作者	具体研究
2018	Zhou 等 ^[6]	从基础理论、系统架构,结构化设计、信息交流机制等多个方面探讨了通信与计算的融合,有助于实现移动通信系统的可持续发展。
	Pan 等 ^[25]	从物联网角度对 MEC 技术的优势进行描述,并提出了 MEC 与 SDN, NFV 技术的结合应用。
	Abbas 等 ^[26]	从 MEC 基本概念、技术优势、网络架构、应用领域以及未来研究方向等各个方面进行详细阐述。
2017	Rimal 等 ^[1]	详细综述了 MEC 的典型特征及应用场景,并设计了结合 FiWi 网络的 MEC 技术场景,提出了可行方案,实现了不同技术间的融合。
	Taleb 等 ^[10]	对 MEC 进行扩展,提出多接入边缘计算概念,并介绍了其在 5G 的典型应用。
	Wang 等 ^[22]	针对 MEC 的资源管理问题与安全问题,提出了一种计算卸载和资源分配方案,实现了能效优化。
2016	Zhang 等 ^[23]	研究了 5G 异构网络中 MEC 计算任务卸载机制,建立以最小化能耗为目标以最小化时延为约束的优化问题,实现了系统能效的提升。
	Sabella 等 ^[27]	以 MEC 在物联网中关键作用为出发点,对 MEC 的架构部署进行实例描述。
	Chen 等 ^[11]	针对 MEC 的计算卸载和资源分配问题,建立了系统的计算模型和通信模型,并实现了多用户 MEC 计算卸载的能效优化。
2015	Kwon 等 ^[28]	相比于传统的静态任务卸载机制,提出了一种动态任务卸载机制。
2014	Orsini 等 ^[9]	提出内容感知卸载机制,并对 MEC 的需求分析、设计方案和未来方向进行了详细描述。
2014	Khan 等 ^[7]	从模型角度对移动云计算与移动边缘计算进行对比研究,并对未来研究方向进行了展望。
2013	Kumar 等 ^[2]	针对移动网络系统中计算卸载技术展开描述,介绍了计算卸载技术的背景、机制、面临的问题及未来方向等。
2012	Lopez-Perez 等 ^[29]	分析了 3GPP 异构网络中的移动性管理问题。

相比传统的集中式数据处理,MEC 在数据源附近对数据进行处理分析,并筛选有价值的处理结果传送到远程数据中心,极大地节省了处理时间,提高了效率。其显著优势表现为以下几个方面。

(1) 位置与内容感知。位于网络边缘的 MEC 服务器能实时获取网络中与用户位置有关的信息,及时地将收集的海量数据进行计算分析,并使用获得的信息来确定网络中连接设备的所处位置。同时,根据获得的实时网络数据对网络内容进行自适应感知^[9],根据当前网络环境下的内容流行度检测,以此作为实行不同应用服务的依据,以帮助用户更快速地确定基于位置的兴趣点,并且为基于位置的应用提供合理部署的可能性,极大地提高用户服务质量体验。

存储均在靠近用户的网络边缘侧进行,因此用户发出的请求不用再经过复杂的网络传输到核心网处理,便于用户方便地接入本地资源^[30-32]。利用 MEC 的存储资源将关键内容缓存在 MEC 服务器上,直接处理并反馈给用户,更高效更可靠对任务进行实时处理,用户可以直接从服务器上提取所需要的资源,大大减少了回程链路传输所需的时间,MEC 在智能视频存储和增强现实中有着非常重要的应用。

(2) 降低能耗,实现绿色通信。未来 5G 移动通信系统对通信网络提出了更高的要求,不仅要实现更加高效的通信传输,也要在高效传输的同时节约资源,降低能源消耗。MEC 能够在网络边缘侧进行部分紧急任务的卸载和计算,对于其他非紧急的、计算强度大的任务再上传到数据中心进行处理^[33,34],这样降低了核心网络的计算能耗,有选择

(2) 时延更低,可靠性更高。MEC 的计算和

性的数据处理并存储,减少了带宽资源的成本,从而降低了传输过程中的能耗。

MEC 服务器设置于网络的边缘,与网络的其他部分相互独立。同时,较强的计算能力和较低的时延,不仅使 MEC 适合分析处理大量的数据,而且大大改善了核心链路的拥塞。MEC 显著的优势离不开关键技术的支持,当前的研究大部分围绕在 MEC 计算卸载算法、缓存优化算法、网络资源分配及网络架构部署等方面,常见的技术如网络功能虚拟化^[35-37](Network function virtualization, NFV)技术、软件定义网络^[38,39](Software defined networking, SDN)技术、云技术等。NFV 是一种资源管理技术,可提取各种物理资源并将其集成到行业标准服务器、交换机和存储硬件中,提供优化的虚拟化数据平面。SDN 技术是虚拟化的一种具体实现形式,是一种新型的网络架构,可编程易于实现快速服务。云技术与 MEC 相辅相成,很大程度上解决了基站的容量受限问题,各种技术的存在将 MEC 的功能推向最大化。

2 MEC 应用场景

作为未来 5G 移动通信网络的关键技术,MEC 的核心功能就是在网络边缘侧实现便捷化和智能化,不仅能准确及时地处理本地数据和实时业务,也能满足不同的设备在不同环境中实现跨应用跨厂商的集成,图 3 展示了 MEC 丰富的应用场景^[31-39]。

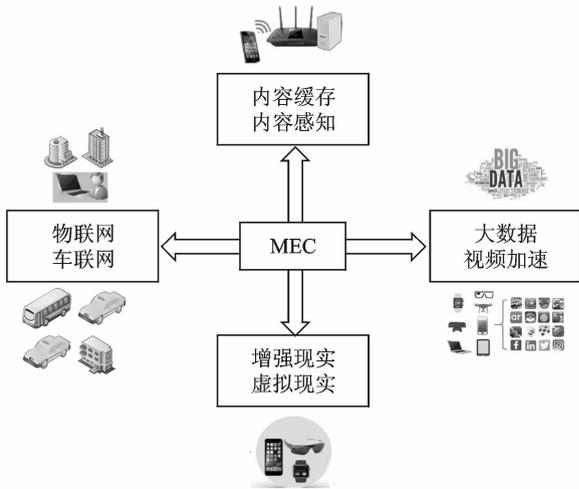


图 3 MEC 应用场景

Fig. 3 Examples of use scenarios for MEC

低时延、高可靠性的 MEC 也引起了业界的广泛关注和研究,以实现更好地用户服务和应用解决方案。本节主要列举未来移动通信系统中的几种典型应用场景,并分析了 MEC 与这些场景相结合带来的应用价值。

2.1 海量数据计算

5G 的实现,将产生数以亿计的海量数据,但随着对高带宽、低时延的要求越来越高,在很短的时间内进行大量计算已成为迫在眉睫的需求。增强现实(Augmented reality, AR)和虚拟现实(Virtual reality, VR)就是典型的实时型应用。增强现实技术是一种使用计算机生成的附加信息来增强或扩展用户所看到的真实世界愿景的技术。虚拟现实是一种计算机模拟技术,它利用计算机对多种信息和物理行为进行整合,进而模拟出三维动态视觉场景。这两种技术都需要收集与用户状态有关的实时信息,包括用户位置和方向,然后根据计算结果进行处理^[40-43]。MEC 服务器可以提供丰富的计算资源和存储资源,缓存流行的音频、视频内容,合并位置信息以确定推送内容,并将其发送给用户,或者快速模拟三维动态场景与用户进行交互。

2.2 物联网

物联网已经实现了一种基于互联网开发的万物互联的新型场景,从物联网的结构来看,MEC 是靠近物联网边缘的集计算、分析、存储和优化于一体的新型模式^[25],而云计算可认为位于物联网的顶层,两者发挥其最大优势,才能实现最终意义的“万物互联”。

各种各样的终端产生的海量数据,迅速增加的网络边缘设备,以及不断复杂化的网络架构,使得 MEC 成为越来越必要的技术。通常情况下,物联网设备在处理器和内存容量方面受到资源限制,因此 MEC 可以作为物联网汇聚网关使用,将终端生成的海量数据进行汇总和分析,这些来自不同协议的数据可以分组、分析和分发^[44]。此外,MEC 还可以作为控制节点来远程控制这些物联网设备并提供实时分析和配置。

2.3 车联网

车联网是物联网的一个特定场景,对应着多种多样的服务,此场景下存在着大量的终端用户和基于 V2X (Vehicle to X) 的应用,其中的“X”代表 everything, V2X 实现了车与车、车与基站、基站与基站、车与其他物体之间的通信,是未来智能交通系统的关键技术^[45,46]。此关键技术推动了无人驾驶技术的迅速发展,该新兴的驾驶环境要求能够及时迅速地对道路中可能出现的情况进行紧急决策,对数据处理的实时性、高效性和低时延要求更高。

将 MEC 应用到车联网中,利用 MEC 技术在 LTE 基站或相关设施中部署边缘服务器,可以减少对网络资源的无效占用,增加实时通信的可用带宽,降低服务交付的时延^[47,48]。同时使用车载应用和道路传感器接收本地信息,分析并处理需要大

量计算的高优先级紧急事件和服务,这样确保了交通安全、避免了交通拥堵,并增强了车载应用的用户体验。

3 挑战与展望

MEC已经发展成为推动5G移动通信网络和物联网实现的关键技术,当前研究表明,MEC技术极大促进了无线通信与移动计算的融合。MEC处在通信与计算这两个关键领域的热点交叉区域,必然成为学术界与产业界共同青睐的研究方向,新的需求也给MEC的研究带来新的挑战 and 机遇。

3.1 面临的挑战

近年来,关于MEC的研究工作大多集中在MEC资源管理方面,许多新的研究方向和可能存在的问题对MEC的发展很大程度上是未知的,随着MEC的广泛应用,MEC以及各种基于MEC技术的方案仍然存在着以下几方面的问题。

(1) 大规模MEC系统部署存在的问题。MEC的核心是将云计算的功能扩展到网络边缘,以实现更低时延和更高能效的数据处理。如何正确部署MEC服务器的位置以及如何正确处理MEC选址成为亟待解决的问题,在当前的研究中,相关标准没有给出明确的解决方案。

(2) 计费问题。在当前的集中式网络下,计费功能由网络核心网负责,MEC技术将服务器部署在网络边缘侧,相关计算和存储在边缘侧进行,这样使得计费功能不容易实现。目前,ETSI的标准化工作并未涉及收费功能的实现,因此当前还没有统一的计费标准。

(3) 移动性问题。涉及MEC技术的移动性问题主要分为两种情况:①移动终端在特定MEC服务器覆盖范围内的移动,这种移动不涉及到MEC服务器的切换,只需要维持移动终端与服务器上应用程序的正常连接即可;②移动终端从一个源MEC服务器移动到另一个目的MEC服务器的情况^[26]。当第2种情况发生时,如何保持移动终端与应用程序之间的服务连接将是一个难点。目前,ETSI和主要制造商共同关注MEC移动性的问题,也成为关键问题,随着研究的深入,这个问题将会逐渐得到解决。

(4) 安全问题。在MEC场景下,海量设备和海量数据的存在将使得移动终端面临越来越复杂的网络计算环境,因此,最初用于传统云计算的许多安全解决方案可能不再适合移动边缘计算,网络实体如不同级别的网关认证也是需要考虑的安全问题^[49]。同时,基于MEC的通信过程涉及许多内容共享和计算协作,用户的隐私保护成为MEC发

展中的一大挑战。

3.2 未来研究方向

(1) 支持缓存技术的MEC。MEC技术通过将相关计算任务和数据迁移到靠近用户边缘的服务器上,减少了传输时延和设备能耗,一般地,MEC技术包括计算卸载与缓存两个关键问题。如何识别复杂网络平台中具有高用户接受度的应用程序,以及如何在不断增长的大量数据中快速提取所需信息,特别是在分布式缓存基站和边缘计算场景下^[50],如何实现资源的高效利用和内容的准确分发,这将是MEC需要解决的重要问题。

(2) 融合深度学习的MEC。随着人工智能的发展,深度学习已被广泛应用到各个领域,物联网的高速发展使得怎样从现实世界的海量数据中挖掘有价值的信息成为关键问题,深度学习的兴起与研究正是以物联网大数据为背景。深度学习在处理海量数据方面具有很大的优势,它是一种多层次的计算模型,能够在不同应用环境下自动提取抽象数据中隐藏的特征,可以学习复杂的函数。而移动边缘计算可以实时计算,提升效率,有效降低数据处理时延,并且减少处理过程中的能耗。因此,两者的结合可以更加高效地处理物联网产生的海量数据,实现更低时延、更快速以及更高效的性能,将成为未来移动通信系统的热门方向。

(3) M2M与MEC技术。随着网络智能移动设备的爆发式增长及其差异化发展,未来的无线网络必须能够支持大量的设备连接,保证通信的实时性和可靠性,MEC能有效解决传统网络非实时性、低时延和结构僵化等问题,M2M(Machine to machine)给设备提供了更加高效快速的连接服务,与MEC的结合,能够满足不断增长的数据流量需求,这将为物联网带来新的机遇。

(4) D2D辅助的MEC。D2D(Device to device)通信技术是一种允许终端设备在基站的控制下通过复用蜂窝网络资源直接进行通信的技术^[51]。将D2D应用于MEC,可以通过建立短距离的D2D通信链路来最大化两者的功能,可以将用户的计算任务经D2D迁移到邻近且计算资源相对充足的边缘设备上,这种短距离的通信能够有效降低数据传输能耗,减轻基站的通信压力,提高网络通信容量。如何设计一些智能的算法或者方案来整合和分配有限的无线资源,同时增加潜在的经济效益将是未来的研究热点与难点。

4 结束语

随着未来移动通信网络的快速发展,将兴起越来越多的新型应用场景和办公娱乐方式,用户也将

产生更多的需求, MEC作为一种新兴的技术已成为各大电信运营商、设备厂商、软件开发商和各行各业研究人员共同关注的热点。本文主要论述了 MEC 技术及其在未来移动通信网络中的应用。通过引入 MEC 的基本原理及系统模型, 阐述了 MEC 显著优势及其典型应用场景。在此基础上, 结合现有的技术场景, 给出了 MEC 可能存在的问题, 并对未来的发展方向进行了论述和展望。 MEC 的研究和进步将会进一步推动计算和通信的融合, 助力 5G 进入新场景多需求下的多技术融合新阶段。

参考文献:

- [1] RIMAL B P, VAN D P, MAIER M. Mobile edge computing empowered fiber-wireless access networks in the 5G era[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2):192-200.
- [2] KUMAR K, LIU J, LU Y H, et al. A survey of computation offloading for mobile systems[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2013, 18(1):129-140.
- [3] RAHIMI M R, REN J, LIU C H, et al. Mobile cloud computing: A survey, state of art and future directions[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2014, 19(2):133-143.
- [4] SATYANARAYANAN M, BAHL P, CÁ CERES R, et al. The case for VM-based cloudlets in mobile computing[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2009, 8(4):14-23.
- [5] WAQAS A, YUSOF Z M, SHAH A. A security-based survey and classification of cloud architectures, state of art and future directions[C]//International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies. Kuching, Malaysia: IEEE Computer Society, 2013:284-289.
- [6] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合[J]. *电信科学*, 2018(3):1-7.
ZHOU Yiqing, LI Guojie. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems[J]. *Telecommunications Science*, 2018(3):1-7.
- [7] KHAN A U R, OTHMAN M, MADANI S A, et al. A survey of mobile cloud computing application models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1):393-413.
- [8] KHAN M A. A survey of computation offloading strategies for performance improvement of applications running on mobile devices[M]. [S.l.]: Academic Press Ltd, 2015.
- [9] ORSINI G, BADE D, LAMERSDORF W. Context-aware computation offloading for mobile cloud computing: Requirements analysis, survey and design guideline[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 56(1):10-17.
- [10] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge architecture & orchestration[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3):1657-1681.
- [11] CHEN Xu, JIAO Lei, LI Wenzhong, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(5):2795-2808.
- [12] LI Jun, WU Anping, CHU Shunfeng, et al. Mobile edge computing for task offloading in small-cell networks via belief propagation[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City, MO, USA: IEEE, 2018:1-6.
- [13] MAO Yuyi, YOU Changsheng, ZHANG Jun, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4):2322-2358.
- [14] GUO Jun, ZHANG Heli, YANG Lichao, et al. Decentralized computation offloading in mobile edge computing empowered small-cell networks[C]//IEEE GLOBECOM Workshops. Singapore: IEEE, 2017:1-6.
- [15] DU Ping, NAKAO A. Application specific mobile edge computing through network softwarization[C]//IEEE International Conference on Cloud Networking. Pisa, Italy: IEEE, 2016:130-135.
- [16] 齐彦丽, 周一青, 刘玲, 等. 融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络[J]. *计算机研究与发展*, 2018, 55(3):478-486.
QI Yanli, ZHOU Yiqing, LIU Ling, et al. MEC coordinated future 5G mobile wireless networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2018, 55(3):478-486.
- [17] BARBAROSSA S, SARDELLITTI S, LORENZO P D. Joint allocation of computation and communication resources in multiuser mobile cloud computing[C]//Signal Processing Advances in Wireless Communications. Darmstadt, Germany: IEEE, 2013:26-30.
- [18] LIU Juan, MAO Yuyi, ZHANG Jun, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Barcelona, Spain: IEEE, 2016:1451-1455.
- [19] RIMAL B P, VAN D P, MAIER M. Cloudlet enhanced fiber-wireless access networks for mobile-edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6):3601-3618.
- [20] TRAN T X, HAJISAMI A, PANDEY P, et al. Col-

- laborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(4):54-61.
- [21] NUNNA S, KOUSARIDAS A, IBRAHIM M, et al. Enabling real-time context-aware collaboration through 5G and mobile edge computing[C]//International Conference on Information Technology - New Generations. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2015: 601-605.
- [22] WANG Chenmeng, LIANG Chengchao, RICHARD F Y, et al. Computation offloading and resource allocation in wireless cellular networks with mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(8):4924-4938.
- [23] ZHANG Ke, MAO Yuming, LENG Supeng, et al. Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 4(99):5896-5907.
- [24] SIGWELE T, ALAM A S, PILLAI P, et al. Energy-efficient cloud radio access networks by cloud based workload consolidation for 5G[J]. *Journal of Network & Computer Applications*, 2017, 78(C):1-8.
- [25] PAN Jianli, MCELHANNON J. Future edge cloud and edge computing for Internet of Things applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1):439-449.
- [26] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al. Mobile edge computing: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1):450-465.
- [27] SABELLA D, VAILLANT A, KUURE P, et al. Mobile-edge computing architecture: The role of MEC in the internet of things[J]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2016, 5(4):84-91.
- [28] KWON Y, YI H, KWON D, et al. Precise execution offloading for applications with dynamic behavior in mobile cloud computing[J]. *Pervasive & Mobile Computing*, 2016, 27(C):58-74.
- [29] LOPEZ-PEREZ D, GUVENC I, CHU Xiaoli. Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(12):70-78.
- [30] PANAOUSIS E, KARAPISTOLI E, ELSEMARY H, et al. Game theoretic path selection to support security in device-to-device communications[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 56:28-42.
- [31] TALEB T, DUTTA S, KSENTINI A, et al. Mobile edge computing potential in making cities smarter[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3):38-43.
- [32] HE Ying, RICHARD F Y, ZHAO Nan, et al. Software-defined networks with mobile edge computing and caching for smart cities: A big data deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12):31-37.
- [33] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(3):1628-1656.
- [34] BARBAROSSA S, CECI E, MERLUZZI M. Overbooking radio and computation resources in mmWave mobile edge computing to reduce vulnerability to channel intermittency[C]//European Conference on Networks and Communications. Oulu, Finland: IEEE, 2017:1-5.
- [35] 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.
- 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.
- [36] YU Yifan. Mobile edge computing towards 5G: Vision, recent progress, and open challenges[J]. *China Communications*, 2016, 13(S2):89-99.
- [37] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算:万物互联时代新型计算模型[J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(5):907-924.
- SHI Weisong, SUN Hui, CAO Jie, et al. Edge computing: An emerging computing model for the Internet of everything era[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(5):907-924.
- [38] CARELLA G A, PAULS M, MAGEDANZ T, et al. Prototyping nfv-based multi-access edge computing in 5G ready networks with open baton[C]//Network Softwarization. Bologna, Italy: IEEE, 2017:1-4.
- [39] INTHARAWIJITR K, IIDA K, KOGA H. Simulation study of low latency network architecture using mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Information & Systems*, 2017, 100(5):963-972.
- [40] MAO Yuyi, ZHANG Jun, SONG S H, et al. Stochastic joint radio and computational resource management for multi-user mobile-edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(9):5994-6009.
- [41] MUNOZ R, MANGUES-BAFALLUY J, VILALTA R, et al. The CTTC 5G end-to-end experimental platform: Integrating heterogeneous wireless/optical networks, distributed cloud, and IoT devices[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2016, 11(1):50-63.
- [42] ATZORI L, IERA A, MORABITO G. Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm[J]. *Ad*

- Hoc Networks, 2017, 56:122-140.
- [43] SASAKI K, SUZUKI N, MAKIDO S, et al. Vehicle control system coordinated between cloud and mobile edge computing[C]//55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan. Tsukuba, Japan: IEEE, 2016:1122-1127.
- [44] LI He, OTA Kaoru, DONG Mianxiang. Learning IoT in edge: Deep learning for the Internet of things with edge computing[J]. IEEE Network, 2018, 32(1):96-101.
- [45] LIU Kaiyang, PENG Jun, LI Heng, et al. Multi-device task offloading with time-constraints for energy efficiency in mobile cloud computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2016, 64(C):1-14.
- [46] 郭延超, 高岭, 王海, 等. 移动边缘计算中基于内容动态刷新的能耗优化[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3):563-571.
- GUO Yanchao, GAO Ling, WANG Hai, et al. Power optimization based on dynamic content refresh in mobile edge computing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(3):563-571.
- [47] 周悦芝, 张迪. 近端云计算:后云计算时代的机遇与挑战[J]. 计算机学报, 2018, 41(25):1-24.
- ZHOU Yuezhi, ZHANG Di. Near-end cloud computing: Opportunities and challenges in the post-cloud computing era[J]. Chinese Journal of Computer, 2018, 41(25):1-24.
- [48] ZHAO Yun, ZHOU Sheng, ZHAO Tianchu, et al. Energy-efficient task offloading for multiuser mobile cloud computing[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Shenzhen, China: IEEE, 2016:1-5.
- [49] MUNOZ O, P-ISERTE A, VIDAL J. Joint optimization of radio and computational resources for multi-cell mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks, 2015, 1(2):89-103.
- [50] LUO Zhaohui, LIWANG Minghui, LIN Zhijian, et al. Energy-efficient caching for mobile edge computing in 5G networks[J]. Applied Sciences, 2017, 7(6):557.
- [51] 钱志鸿, 王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述[J]. 通信学报, 2016, 37(7):1-14.
- QIAN Zhihong, WANG Xue. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7):1-14.

(编辑:刘彦东)