



专题：移动边缘计算

移动边缘计算中的计算卸载和资源管理方案

李邱苹^{1,2}, 赵军辉^{1,2}, 贡毅³

- (1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013;
3. 南方科技大学电子与电气工程系, 广东 深圳 518055)

摘要: 移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 是一种新兴的计算范式。设备将计算任务卸载到 MEC 服务器, 满足业务时延需求, 延长设备电池寿命, 解决设备资源受限问题。对目前 MEC 系统中计算卸载方案的研究现状和成果进行了总结, 分析了存在的问题和挑战, 并进一步探讨未来 MEC 计算卸载的研究方向。

关键词: 移动边缘计算; 计算卸载; 资源管理

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019060

Computation offloading and resource management scheme in mobile edge computing

LI Qiuping^{1,2}, ZHAO Junhui^{1,2}, GONG Yi³

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 310033, China
3. Department of Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: Mobile edge computing (MEC) is an innovative computing paradigm. Offloading computing tasks to MEC server can effectively solve the contradiction between resource-constrained of mobile user and computing-intensive applications. Moreover, it can meet the delay of computing task and reduce energy consumption of mobile user. The current research results and achievements of computation offloading scheme in MEC system were summarized and the existing problems and challenges were analyzed. Furthermore, the development directions of MEC in the future were explored.

Key words: mobile edge computing, computation offloading, resource management

收稿日期: 2019-01-01; 修回日期: 2019-03-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.2018YJS008); 国家自然科学基金资助项目 (No.61661021, No.61531009); 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金前沿项目 (No.L182018); 江西省交通运输厅科技项目 (No.2016D0037); 江西省重点研发计划项目 (No.20171BBE50057); 江西省主要学科学术和技术带头人资助计划项目 (No.20172BCB22016); 江西省教育科学“十三五”规划课题 (No.17YB056)

Foundation Items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2018YJS008), The National Natural Science Foundation of China (No.61661021, No.61531009), Beijing Natural Science Foundation (No.L182018), The Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Transport Bureau (No.2016D0037), The Key Technology Research and Development Program of Jiangxi Province (No.20171BBE50057), Jiangxi Provincial Cultivation Program for Academic and Technical Leaders of Major Subjects (No.20172BCB22016), The Science Education Plan for 13th Five-Year of Jiangxi Province (No.17YB056)

1 引言

近年来,随着物联网(internet of things, IoT)的高速发展,大量新兴应用应运而生^[1-2]。这类新兴的应用通常需要消耗大量的计算资源,以满足低时延需求^[3]。然而,设备有限的计算能力、存储空间和电池寿命很难满足上述低时延、高复杂度、高可靠性的移动应用需求,为新兴应用的实现带来了前所未有的挑战^[4]。

云计算具有强大的计算能力,设备可以通过计算卸载,将计算任务传输到远端云服务器执行,从而达到缓解计算和存储限制、延长设备电池寿命的目的^[5]。然而,将计算任务卸载到位于核心网的云服务器会造成不可接受的时延、增加额外传输能量消耗和带来数据泄露等问题,无法满足应用背景下低时延、高可靠性以及数据安全的应用服务需求^[3,6-7]。为了解决云计算卸载过程中面临的高时延等问题,欧洲电信标准协会(ETSI)于2014年率先提出移动边缘计算(mobile edge

computing, MEC)^[8]的概念。MEC将云计算数据中心的计算、存储等能力移动到网络边缘^[9],为无线接入网提供IT环境和云计算能力^[10],使应用、服务和内容可以实现本地化部署,为业务提供低时延、高带宽的运营环境,满足智慧城市^[11]、智能交通系统^[12]、脸部识别^[13]和视频编辑^[3]等新兴应用的计算需求,如图1所示。

与卸载计算任务到云计算中心相比,将计算任务传输到网络边缘的MEC服务器,无需经过核心网和数据中心,可实现本地业务本地化服务、降低能耗,满足业务低时延需求。同时,计算任务通过本地网络边缘的MEC服务器进行处理并返回结果,可实现对一些敏感数据的保护与隔离,降低隐私泄露的风险^[14-15]。表1概述了云计算和MEC在关键技术方面的差异。

2 MEC中的计算卸载

计算卸载是MEC的一个重要应用,可以为资源受限设备运行计算密集型应用提供计算资源,

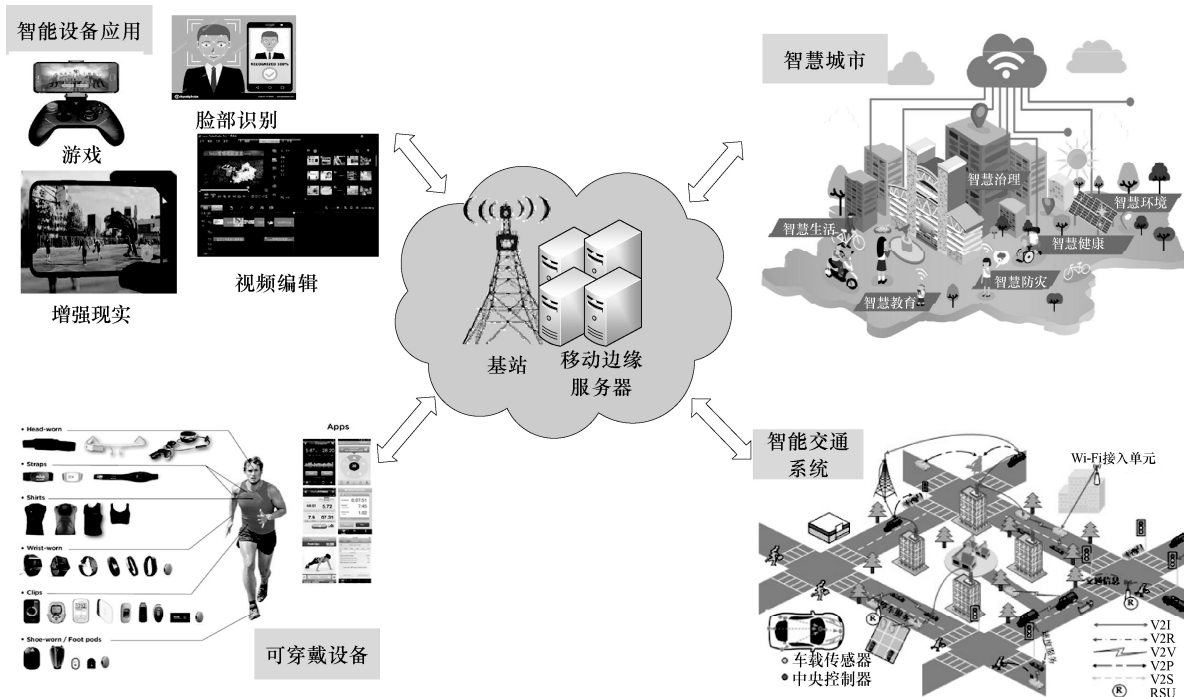


图1 MEC应用场景



表 1 云计算与移动边缘计算的比较

技术现状	云计算	移动边缘计算
部署	集中式	分布式
与用户的距离	较远	靠近网络边缘
隐私保护	低	高
位置感知	不适用	支持
实时性	低	高
抖动	高	低
计算资源	丰富	有限
存储容量	丰富	有限

加快计算速度, 节省能源^[16]。卸载决策作为计算卸载技术的核心问题, 主要取决于计算任务通过设备自身计算能力和卸载到 MEC 完成时所带来的时延和能耗。因此, 下面首先对本地计算和 MEC 计算完成计算任务产生的时间和能量消耗进行分析。

(1) 本地计算

在研究中, 通常用一个三元素参数 $T(D, C, t^{\max})$ 描述计算任务, 其中 D 为任务输入数据的大小, C 是完成计算任务所需的计算资源, t^{\max} 表示任务最大时延门限。计算任务在本地完成的时间和能量消耗分别为:

$$t_1 = \frac{C}{f_1} \quad (1)$$

$$E_1 = k f_1^2 \quad (2)$$

其中, k 为常数, 主要依赖于芯片架构的有效开关电容, f_1 为用户自身计算资源。

(2) MEC 计算

用户将计算任务卸载到 MEC 时, 需要通过移动网络将输入数据传输到 MEC 服务器。因此, 对于 MEC 计算, 任务的完成时间包括数据传输时间和任务计算时间, 具体表示为:

$$t_m = \frac{C}{f_m} + \frac{D}{B} \quad (3)$$

其中, B 为网络带宽, f_m 为 MEC 计算速度。

相似地, 对于 MEC 计算, 能量消耗包括用户

传输数据到 MEC 服务器带来的能量消耗和用户
在空闲状态产生的能量消耗, 表示为:

$$E_m = p^c \frac{C}{f_m} + p^i \frac{D}{B} \quad (4)$$

其中, p^c 为用户在空闲状态的功率, p^i 是用户在无线网络中的传输功率。

在研究中, 主要通过对比本地执行计算任务与 MEC 完成计算任务的能量消耗和任务完成时间, 衡量是否进行计算卸载。具体地, 当用户电池容量不足时, 在满足任务计算时延约束的前提下, 计算卸载倾向于节约能量消耗, 延长电池寿命。如图 2 (a) 所示, 当用户所需计算资源量较少时, 用户在本地计算产生的能量消耗低于卸载到 MEC 计算带来的能量消耗, 用户选择利用自身计算资源完成计算任务, 最小化能量消耗。随着任务所需计算资源的增加, MEC 计算大大降低用户能量消耗, 此时, 用户倾向于选择 MEC 计算, 降低能耗。相似地, 对于时延敏感任务, 例如, 与自动驾驶相关的计算应用请求, 计算卸载主要侧重于任务完成时间的降低。如图 2 (b) 所示, 随着 MEC 计算资源的增加, 用户选择 MEC 计算执行方式可以有效地降低任务完成时间。

对于单用户 MEC 系统, 通过对能量消耗和计算时间的对比, 用户可以方便地得到计算卸载决定。因为, 对于单用户 MEC 系统而言, 用户在卸载过程中数据传输速率一定, 并且独占 MEC 服务器的全部计算资源, 不用考虑用户之间的无线、计算资源竞争。但是, 随着 IoT 的发展, 全球移动设备呈爆发式增长。根据思科公司提供的白皮书预测, 到 2021 年全球移动设备和网络连接的数量将从 2016 年的 58 亿增长到 137 亿^[17]。因此, MEC 需要利用有限的无线、计算资源满足大量的计算请求, 协调多用户之间的计算卸载, 这对计算卸载方案提出了更高的要求。目前, 主要从以下几个方面考虑提高任务卸载效率, 优化 MEC 计算卸载方案。

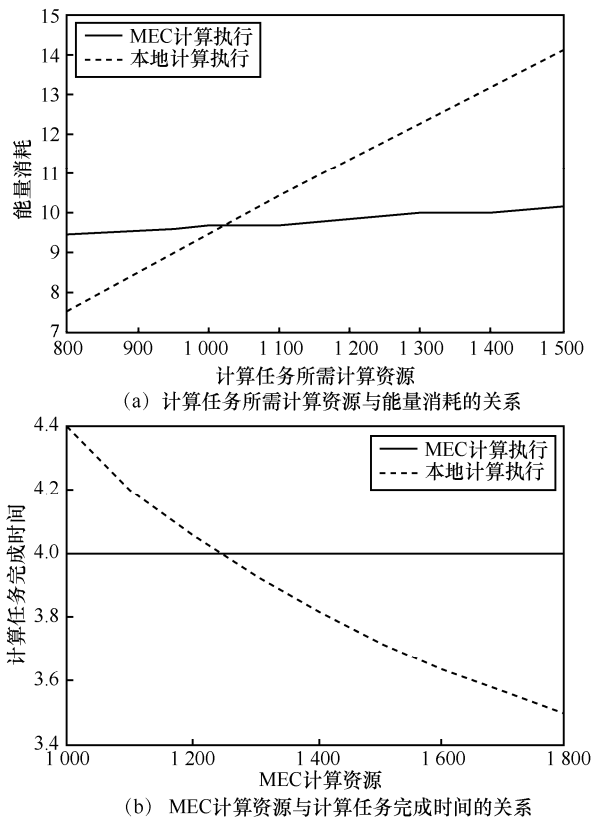


图2 本地与 MEC 完成计算任务的能量消耗和任务完成时间对比

- 优化计算卸载策略。如何协调用户之间的计算卸载, 决定是否卸载和卸载多少, 从而最大化满足用户的计算请求。
- 无线资源分配。针对复杂的无线通信系统, 如何有效分配通信资源, 优化无线传输速率, 降低用户之间的干扰, 提高任务卸载效率。
- 计算资源分配。根据任务的不同计算需求, 如何高效分配计算资源, 实现 MEC 计算资源的最大化利用。
- 系统可扩展性。在海量设备连接的情况下, 针对无线和计算资源不足问题, 提升系统可扩展性。

3 MEC 计算卸载方案优化设计

考虑上述 4 点, 现有 MEC 研究中提出了许多计算卸载方案, 以满足大量应用的计算需求。下

面分别介绍基于二进制卸载的计算卸载方案、基于部分任务卸载的计算卸载方案、基于随机任务模型的计算卸载方案和云-MEC 协同的计算卸载方案。

3.1 基于二进制卸载的计算卸载方案

在二进制计算卸载模型中, 任务不能被进一步划分, 只能作为一个整体在本地执行或被卸载到 MEC 服务器执行。二进制计算卸载通常是一个典型的混合整数非线性规划问题, 并且一般是一个非确定多项式困难 (non-deterministic polynomial hard, NP-hard) 问题, 它很难被求解。因此, 许多研究工作提出利用博弈论求解最优的计算卸载策略。

博弈论被广泛应用于解决具有限制性目标、多用户参与的二进制计算卸载决策问题。Ma 等人^[18]基于博弈论研究移动用户通过多个无线接入点进行计算卸载的问题, 并设计计算迁移算法。基于该算法, 每个用户根据计算需求、无线环境条件以及系统计算资源信息, 选择本地执行计算任务或者从多个无线接入点中选择一个最优的无线接入点进行计算卸载, 实现处理时延和移动设备能量消耗的最小化。Chen 等人^[19]研究 MEC 在多无线信道环境中的多用户计算卸载问题, 将多用户的分布式计算卸载决策过程建模为一个多用户计算卸载博弈, 并设计有效的分布式计算卸载算法。设计的分布式计算卸载算法获得博弈的纳什均衡和最优的卸载策略, 最小化能量消耗和执行时间的权重和。考虑 MEC 服务提供商的利益, Zhang 等人^[20]结合博弈理论和凸优化算法, 设计联合计算卸载方案。该方案通过联合优化计算卸载策略、计算资源分配和传输功率, 最小化由移动用户能量消耗、任务执行时间和计算资源成本组成的系统成本。针对无线网络重叠区域内用户竞争资源的问题, 参考文献[21]提出进化博弈实现服务提供商有限的带宽和计算资源的最优分配, 并通过复制动力学方法获得进化



博弈的进化均衡。

此外, 利用二次约束二次规划 (quadratically constrained quadratic program, QCQP) 变换和半正定松弛 (semidefinite relaxation, SDR), Chen 等人^[22]求解非凸二次约束二次规划的用户卸载决策以及资源分配优化问题, 并提出一种有效的近似求解方案。仿真结果表明, 在各种参数设置下, 所提出的算法可获得接近最优的性能。参考文献[23]考虑 5G 异构网络的多接入特性, 设计一个节能有效的计算卸载方案。该方案专注于获得最优的计算卸载策略和无线资源分配, 最小化用户的能耗。Zhao 等人^[24]提出了基于线性化和基于基尼系数的贪婪启发式方法, 通过联合优化卸载决定、无线资源和计算资源分配, 将多用户 MEC 系统的能耗降至最低。考虑 MEC 服务器的密集部署, 参考文献[25]研究多 MEC 服务器异构网络的计算卸载问题, 其中用户可以将计算任务卸载到多服务器中的一个, 并力图最小化系统开销。为了实现这一目标, 利用多对一匹配理论实现用户与 MEC 服务器的最佳匹配, 利用一对一匹配理论获得子信道的最优分配, 使用二分法优化卸载用户的传输功率, 通过对偶方法实现计算资源的最优配置。

3.2 基于部分任务卸载的计算卸载方案

近年来, 随着代码分解和并行运算的发展, MEC 中的部分卸载得到国内外学者的广泛关注^[29]。部分计算卸载模型充分利用 MEC 服务器和移动设备并行计算的优势, 将计算任务分解为不同的部分, 一部分在本地执行, 一部分卸载到 MEC 服务器执行, 如图 3 所示。因此, 不同于二进制计算卸载方案的设计, 在部分计算任务卸载研究中, 决定卸载计算任务的多少成为设计计算卸载方案的关键问题之一。

在参考文献[26]中, 研究基于时分多址接入 (time-division multiple access, TDMA) /正交频分多址接入 (orthogonal frequency-division multiple

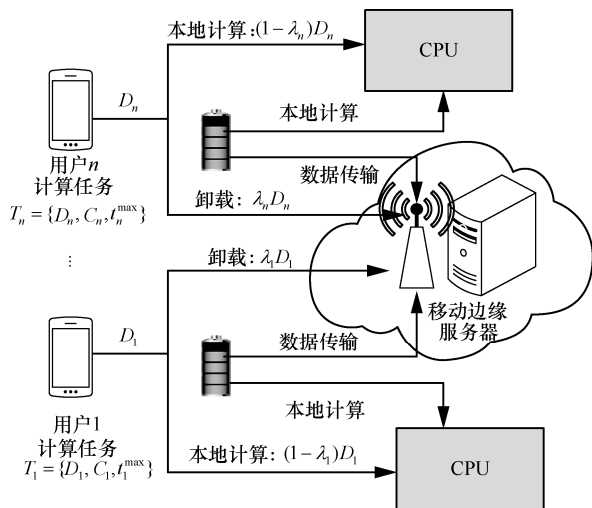


图3 部分计算卸载系统框架

access, OFDMA) 的多用户 MEC 系统, 设计控制卸载数据大小和时间/子信道分配的最佳策略, 达到最小化系统能量消耗的目的。考虑用户的服务质量和能耗, Tao 等人^[27]提出一个用户能耗最小化问题, 并利用拉格朗日乘子法得到最优的卸载策略。该策略包括最佳的卸载数据大小、最优的计算资源分配。考虑 MEC 服务器的密集部署和用户计算任务之间的相关性, Dai 等人^[28]提出一个两层计算卸载框架。基于该框架, 设计有效的计算卸载方案, 通过联合优化用户关联, 计算资源分配、传输功率分配以及卸载计算任务的大小, 解决多 MEC 服务器之间的负载平衡问题, 最小化系统能耗。参考文献[29]设计了一个以能源为导向的任务调度方案, 可以降低能耗, 提高计算性能, 最大化所有用户的收益。

此外, 许多学者结合诸如增强现实 (augmented reality, AR) 等实际应用的特点, 对部分计算卸载方案的优化设计展开研究。AR 是 MEC 的一个重要应用场景, 其应用程序主要包括 5 个计算组件^[30], 分别为视频源、追踪、映射、目标识别和渲染, 其中视频源和渲染部分必须通过本地计算来完成, 而需要大量计算资源的追踪、映射和目标识别模块可卸载到 MEC 服务器完成, 如图 4 所示。针对 AR 应用程序不同用户共享部

分计算任务以及输入、输出数据的固有协作特性,参考文献[30-31]设计有效的计算卸载方案。在该卸载方案中,用户可卸载一部分共享数据到 MEC 服务器执行,并通过广播的方式返回计算结果。仿真结果显示,与不考虑共享数据属性或本地计算能力的基线算法相比,所提出计算卸载方案可以获得更显著的节能效果。针对视频数据的压缩和存储, Ren 等人^[32]提出一个新的部分计算卸载模型,其中一部分数据通过本地计算资源进行压缩后再上传到 MEC 服务器存储,一部分数据先上传到 MEC 服务器之后再进行压缩存储。基于提出的框架,对计算资源、通信资源的分配和本地压缩数据的比例进行了优化,最小化计算完成时间。

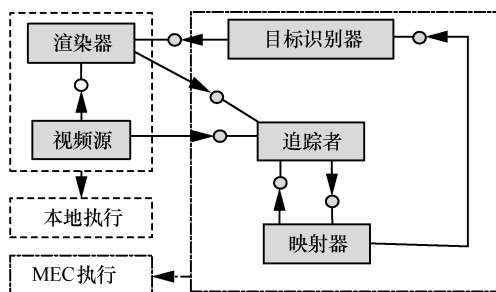


图4 AR应用程序中的主要计算组件

3.3 基于随机任务模型的计算卸载方案

相比确定性任务模型,随机任务模型系统的平均能耗和执行等待时间具有更强的相关性,这为设计高效的计算卸载方案带来更大的挑战性。因此,相比于确定任务模型的计算卸载优化方案,具有随机任务到达的 MEC 系统设计是一个较少探索的领域。

Liu 等人^[33]基于马尔可夫决策过程,设计延迟最优的计算任务调度策略,这里马尔可夫决策根据信道状态控制本地处理、数据传输单元的状态以及任务缓冲队列的长度进行任务调度。仿真结果显示,设计的最优任务调度策略明显优于已存在的贪婪调度策略。假设移动用户的计算请求服从泊松分布,参考文献[34]利用排队论对 MEC 系统的计算卸载进行研究,通过标量化方案和内点

法寻找移动用户的最佳卸载概率和最优传输功率,从而最小化能耗、执行延迟和价格成本。Huang 等人^[35]基于李雅普诺夫优化技术,提出一种动态计算卸载算法,该算法确定需要利用无线网络进行计算卸载的任务数量,最小化移动能耗,同时将违反截止时间要求的计算任务比例保证在阈值之下。

此外,为了权衡用户能量消耗和任务完成时间, Hong 等人^[36]基于半马尔可夫决策过程,控制本地计算频率、调制方案和数据传输速率,最小化系统平均执行成本。Guo 等人^[37]考虑计算任务的上行传输时间、计算时间和计算结果下载时间,利用约翰逊算法和凸优化技术,优化分配任务操作序列、上传和下载持续时间以及上传、执行和下载的开始时间,最小化系统的能量消耗。参考文献[38]研究了不可卸载工作负载、可卸载工作负载和网络流量3种不同类型的应用在 MEC 系统中的能量—延迟权衡,提出了一种基于李雅普诺夫优化的算法来共同决定卸载策略、任务分配、计算资源分配和网络接口。

3.4 云-MEC 协同的计算卸载方案

MEC 靠近移动用户,移动用户仅仅通过一跳的无线传输即可获得所需计算资源,与云计算相比具有较低的时延。然而, MEC 服务器的计算能力有限且扩展性较差。随着移动用户和新兴应用数量的爆发式增长,单纯地依靠 MEC 不能充分且高效地满足用户的计算卸载请求。因此, MEC 不应该完全取代云计算,两者应该相互协调,相互补充,更好地满足移动用户需求。例如,对于延迟敏感任务,可由 MEC 执行,而非延迟敏感任务可传输到云计算中心执行。云-MEC 协同的基本架构如图5所示。

参考文献[39-43]研究基于三层(本地计算、边缘计算和云计算)混合结构的二进制计算卸载方案。针对现有 MEC 系统大多采用蜂窝网络和骨干网络相结合的组网技术,存在接入方式单一、

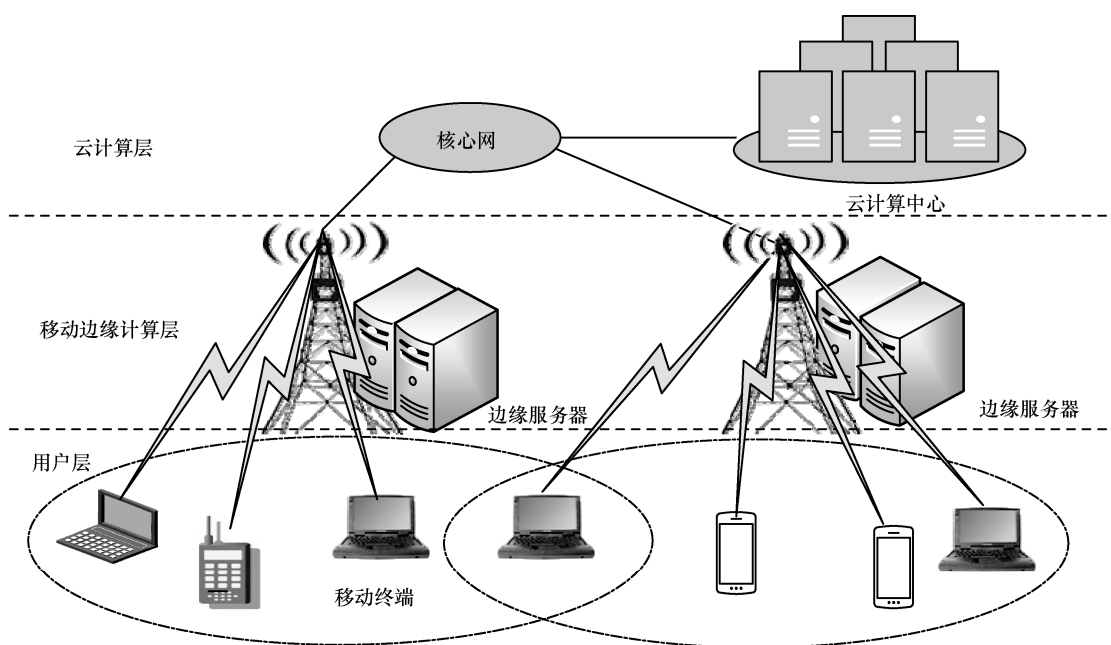


图5 云-MEC 协同基本架构

高拥塞和高能耗的缺点, Guo 等人^[39-40]提出混合光纤-无线网络, 为云计算和 MEC 的共存提供支持。而且, 基于提出的三层网络架构, 研究云-MEC 的协同计算卸载问题, 设计近似协同计算方案和博弈协同计算卸载方案。仿真结果显示, 提出的方案有效提高了卸载效率, 并且随着计算任务数量的增加, 具有很好的可扩展性。参考文献[41]提出一个云、MEC 和 IoT 集成的融合框架, 解决 MEC 面临的可扩展问题。同时, 设计一个选择卸载方案, 在满足不同业务延迟需求的同时, 最小化设备的能耗, 进一步降低信令开销。基于异构蜂窝网络, Hu 等人^[42]研究 MEC 与云计算的共存与协同, 假设多个多天线微基站装备 MEC 服务器, 宏基站通过高速回传链路与云计算中心相连。基于提出的系统模型, 通过联合优化卸载决定用户传输功率、微基站的波束成形和微基站的传输协方差矩阵, 最小化网络的能耗。考虑用户的公平性, 参考文献[43]提出低复杂度的次优化算法, 最小化所有用户中时延和能耗加权和最大的用户。该次优化算法通过半定松弛和随机化获得最优卸载决定, 通过分数规划理论和拉格朗日对偶

算法获得最优资源分配。

此外, Ma 等人^[44]将云协同的 MEC 系统建模成为一个排队模型, 如图 6 所示。用户 i 的计算请求服从参数为 λ_i 的泊松过程, 当移动计算请求到达速率超过用户的计算能力 μ_i 时, 移动用户将一部分计算请求迁移到 MEC 服务器。当大量的计算请求到达 MEC 服务器时, 系统做出云托管决策, 确定租用的云资源和云计算中心的工作量。基于提出的系统分析模型, 解决混合结构中面向非均匀用户的任务调度问题, 设计高效的集中式调度算法, 提高资源利用率, 降低系统处理时延和资源开销。针对移动应用计算请求具有时变性, 参考文献[45]采用非均匀的泊松流量模型对时延敏感的移动应用和时延不敏感的移动应用进行分析, 优化边缘主机的部署并弹性租用云资源, 满足时变移动请求的不同服务质量, 降低系统开销。

4 未来挑战与展望

计算卸载作为构建 MEC 系统最重要的功能和动机之一, 吸引了国内外大量学者的关注。但是, 目前基于 MEC 的计算卸载仍然是一项不成熟

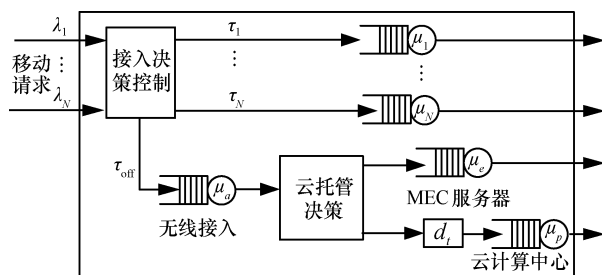


图6 云协同的边缘计算系统的分析模型

的技术, 仍有许多挑战需要解决。从 MEC 系统中的移动性管理、MEC 系统的计算资源分配、绿色 MEC 的设计和 MEC 系统中的隐私保护 4 方面分析 MEC 计算卸载优化方案的未来研究挑战与发展方向。

(1) MEC 系统中的移动性管理

在已有 MEC 的计算卸载优化方案设计中, 大多基于严格的静态场景假设进行。然而, 移动性是许多新兴应用的固有特性, 例如 AR 协助博物馆参观以增强游客的体验。因此, 移动性管理是计算卸载中迫切需要解决的一个关键问题, 同时也是进一步设计高效计算卸载方案所面临的重大挑战之一。

首先, 因为用户的移动性, 用户需要在小覆盖范围的边缘服务器之间频繁切换, 使得不同的系统配置和用户—服务器关联变得尤为复杂。而且, 频繁的切换也会增加计算时延, 降低用户体验。其次, 在计算卸载过程中, 信道条件因用户的移动或衰落而下降, 传输卸载数据消耗的能量和时间也会随之发生显著的变化。此时, 卸载计算任务到 MEC 服务器可能会带来更多的能耗或时间延迟。最后, 在不同无线覆盖区域移动的用户将导致严重的干扰和导频污染, 降低通信性能。基于此, 考虑用户的移动性, 设计新的计算卸载方案是 MEC 进一步发展必须要解决的一个挑战。例如, 在 MEC 计算卸载方案设计中, 通过预测用户的移动轨迹和信道的状态, 实现计算资源的预分配, 从而更好地估计不同条件下的卸载成本, 达到减少时延、降低能耗的目的。

(2) MEC 系统的计算资源分配

在现有的计算卸载方案研究中, 关于 MEC 计算资源分配的研究大多基于 MEC 计算节点均匀分布、计算能力相同的假设。但是, 在实际情况下, 将计算资源异构地分布在网络中, 可以更好地实现计算负载平衡, 降低用户的计算时延。例如, 在宏基站和微基站组成的异构网络中, 对微、宏基站部署计算能力不同的 MEC 服务器, 通过不同计算节点之间的协调, 实现负载平衡, 满足大量的计算需求, 解决 MEC 扩展性差的难题。而且, 相比于云-MEC 的协同, 异构的 MEC 部署, 既可以避免向云计算中心传输数据带来的高延迟, 也可以弥补单一 MEC 计算服务器计算资源不足的问题。

此外, 在当前基于部分任务卸载的计算卸载方案优化设计研究中, 主要集中于将计算应用分为两部分卸载到 MEC 或本地执行, 从而忽略了将计算任务分为更多的部分卸载到多个计算节点并行执行, 降低任务执行时间的优势。最后, 现有研究中, 用户将计算任务卸载到 MEC 服务器之前预先选择了计算节点, 并没有考虑网络的动态性。然而, 由于不同计算任务所需的计算资源不同, 当 MEC 服务器完成给定计算任务, 释放额外空闲资源时, 未完成的计算任务可利用这部分额外计算资源, 进一步降低计算时间。因此, 在 MEC 处理卸载应用的过程中, 动态资源分配也是未来需要进一步完善的领域。

(3) 绿色 MEC 的设计

MEC 服务器是小型的数据中心, 每台服务器的能量消耗都远远低于云数据中心。然而, 随着 IoT 的发展, MEC 服务器被密集部署, 必然会大大增加系统的整体能耗。因此, 在未来的 MEC 研究中, 不仅需要考虑移动用户的能量消耗, 而且需要考虑 MEC 服务器在计算和通信过程中产生的能量消耗, 以响应绿色 MEC 的号召。不同于绿色通信系统, 设计绿色的 MEC 需要管理计算资



源, 保证满足用户的计算需求, 这无疑为绿色 MEC 的设计加入了新的挑战。此外, MEC 服务器中高度不可预测的计算工作负载模式, 也对绿色 MEC 系统设计中的计算资源管理提出另一个巨大的挑战。

(4) MEC 系统中的隐私保护

MEC 为各种各样新兴服务的发展提供支持, 但其独特的功能也伴随着新的安全和隐私问题。特别是, 在将计算密集型应用卸载到 MEC 服务器的过程中, 计算任务的输入数据往往包含诸如个人临床数据在内的敏感私人信息。如何在隐私保护下, 卸载数据到 MEC 服务器, 以避免信息泄露, 是一个亟待解决的问题。而且, 网络边缘高度变化的环境, 也导致网络更容易受到攻击。因此, 开发更多的隐私保护平台处理边缘数据, 也是未来研究的重点之一。

5 结束语

将计算密集型应用卸载到 MEC 服务器是发展 MEC 最重要的动机之一。然而, 复杂的无线环境和 MEC 服务器有限计算能力等因素, 为 MEC 计算卸载方案的设计提出了各种新的挑战。本文总结现有 MEC 资源管理的最新研究成果, 从基于二进制计算卸载的计算卸载方案、基于部分卸载的计算卸载方案、基于随机任务模型的计算卸载方案和云-MEC 协同的计算卸载方案 4 个方面介绍了计算卸载决定、无线资源、计算资源联合优化的计算卸载算法, 并进一步探讨了未来 MEC 研究存在的挑战及发展趋势。

参考文献:

- [1] ZHANG K, LENG S, HE Y, et al. Mobile edge computing and networking for green and low-latency internet of things[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(5): 39-45.
- [2] QI Y, TIAN L, ZHOU Y, et al. Mobile edge computing-assisted admission control in vehicular networks: the convergence of communication and computation[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(1): 37-44.
- [3] 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 W S, SUN H, CAO J, 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.
- [4] LI Q, ZHAO J, GONG Y, et al. Energy-efficient computation offloading and resource allocation in fog computing for internet of everything[J]. China Communications, 2019, accepted.
- [5] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1628-1656.
- [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, 34(3): 1-7.
ZHOU Y Q, LI G J. Communication and computing fusion in future mobile communication systems[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(3): 1-7.
- [7] ZHAO J, LIU Y, GONG Y, et al. A dual-link soft handover scheme for C/U plane split network in high-speed railway[J]. IEEE Access, 2018(6): 12473-12482.
- [8] ETSI. Mobile edge computing-a key technology towards 5G[R]. 2015.
- [9] ZHOU Y, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communication Magazine, 2019(1).
- [10] MA X, ZHAO J, GONG Y, et al. Key technologies of network towards 5G-enabled vehicular networks[C]//International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Dec 16-17, 2017, Dalian, China. Berlin: Springer, 2017: 153-159.
- [11] 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.
- [12] ZHAO J, CHEN Y, GONG Y. Study of connectivity probability of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication systems[C]//IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2016, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [13] DINH H T, LEE C, NIYATO D, et al. A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2013, 13(18): 1587-1611.
- [14] 陈建业. 移动边缘计算环境下的服务迁移策略设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
CHEN J Y. Design and implementation of service migration strategy in mobile edge computing environment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [15] 林晓鹏. 移动边缘计算网络中基于资源联合配置的计算任务卸载策略[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
LIN X P. Computing task offload strategy based on resource joint

- configuration in mobile edge computing network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [16] 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 H, FAN S S, LV X C, et al. Mobile edge computing for 5G requirements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(2): 1-10.
- [17] 安琪, 刘艳萍, 孙茜, 等. 基于 SDN 与 NFV 的网络切片架构[J]. 电信科学, 2016, 32(11): 119-126.
AN Q, LIU Y P, SUN Q, et al. Network slicing architecture based on SDN and NFV[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(11): 119-126.
- [18] MA X, LIN C, XIANG X, et al. Game-theoretic analysis of computation offloading for cloudlet-based mobile cloud computing[C]//The 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Nov 2-6, 2015, Cancun, Mexico. New York: ACM Press, 2015: 271-278.
- [19] CHEN X, JIAO L, LI W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016(5): 2795-2808.
- [20] ZHANG J, XIA W, YAN F, et al. Joint computation offloading and resource allocation optimization in heterogeneous networks with mobile edge computing[J]. IEEE Access, 2018(6): 19324-19337.
- [21] ZHANG J, XIA W, CHENG Z, et al. An evolutionary game for joint wireless and cloud resource allocation in mobile edge computing[C]//2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Oct 11-13, 2017, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [22] CHEN M H, LIANG B, DONG M. Joint offloading decision and resource allocation for multi-user multi-task mobile cloud[C]// 2016 IEEE International Conference on Communications, May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [23] ZHANG K, MAO Y, LENG S, et al. Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2016(4): 5896-5907.
- [24] ZHAO P, TIAN H, QIN C, et al. Energy-saving offloading by jointly allocating radio and computational resources for mobile edge computing[J]. IEEE Access, 2017(5): 11255-11268.
- [25] PHAM Q V, LEANH T, TRAN N H, et al. Decentralized computation offloading and resource allocation in heterogeneous networks with mobile edge computing[J]. arXiv:1803.00683, 2018.
- [26] YOU C, HUANG K, CHAE H, et al. Energy-efficient resource allocation for mobile-edge computation offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1397-1411.
- [27] TAO X, OTA K, DONG M, et al. Performance guaranteed computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(6): 774-777.
- [28] DAI Y, XU D, MAHARJAN S, et al. Joint computation offloading and user association in multi-task mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12313-12325.
- [29] AHN S, LEE J, PARK S, et al. Competitive partial computation offloading for maximizing energy efficiency in mobile cloud computing[J]. IEEE Access, 2018(6): 899-912.
- [30] AI-SHUWAILI A, SIMEONE O. Energy-efficient resource allocation for mobile edge computing-based augmented reality applications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(3): 398-401.
- [31] HUANG D, WANG P, NIYATO D. A dynamic offloading algorithm for mobile computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 1991-1995.
- [32] REN J, YU G, CAI Y, et al. Partial offloading for latency minimization in mobile-edge computing[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [33] LIU J, MAO Y, ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory, Jul 10-15, 2016, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1451-1455.
- [34] LIU L, CHANG Z, GUO X, et al. Multi-objective optimization for computation offloading in mobile-edge computing[C]// 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications, Jul 3-6, 2017, Heraklion, Greece. Piscataway: IEEE Press, 2017: 832-837.
- [35] HUANG D, WANG P, NIYATO D. A dynamic offloading algorithm for mobile computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 1991-1995.
- [36] HONG S T, KIM H. QoE-aware computation offloading scheduling to capture energy-latency tradeoff in mobile clouds[C]// IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, Jun 27-30, 2016, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [37] GUO J, SONG Z, CUI Y, et al. Energy-efficient resource allocation for multi-user mobile edge computing[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [38] KWAK J, KIM Y, LEE J, et al. DREAM: dynamic resource and task allocation for energy minimization in mobile cloud systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(12): 2510-2523.
- [39] GUO H, LIU J. Collaborative computation offloading for multi-access edge computing over fiber-wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4514-4526.

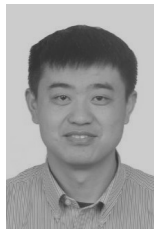


- [40] GUO H, LIU J, QIN H, et al. Collaborative computation offloading for mobile-edge computing over fiber-wireless networks[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [41] LYU X, TIAN H, JIANG G L, et al. Selective offloading in mobile edge computing for the green internet of things[J]. IEEE Network, 2018, 32(1): 54-60.
- [42] HU X, WANG L, WONG K K, et al. Edge and central cloud computing: a perfect pairing for high energy efficiency and low-latency[J]. arXiv preprint arXiv:1806.08943, 2018.
- [43] DU J, ZHAO L, FENG J, et al. Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(4): 1594-1608.
- [44] MA X, ZHANG S, LI W, et al. Cost-efficient workload scheduling in cloud assisted mobile edge computing[C]//2017 IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service, Jun 14-16, 2017, Vilanova i la Geltru, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-10.
- [45] MA X, ZHANG S, YANG P, et al. Cost-efficient resource provisioning in cloud assisted mobile edge computing[C]//IEEE Global Communications Conference, Dec 4-8, 2017, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[作者简介]



李邱苹（1993—），女，北京交通大学电子信息工程学院博士生，主要研究方向为车联网、移动边缘计算。



赵军辉（1973—），男，博士，华东交通大学信息工程学院院长、教授、博士生导师，江西省车联网关键技术工程实验室主任。主要研究方向为移动通信、智能信息处理、物联网等。已经在相关领域发表论文 100 余篇，曾获得省部级科学技术进步奖 2 项。



贡毅（1973—），男，博士，南方科技大学电子与电气工程系教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信和网络、认知无线电、通信信号处理和物理层信息完全等。