

移动边缘计算中的计算卸载策略研究综述

董思岐 李海龙 屈毓铤 张 钊 胡 磊  
(火箭军工程大学作战保障学院 西安 710025)

**摘 要** 科技的进步使得智能移动设备越来越普及化,移动设备流量急剧增长。但智能移动设备由于自身资源及计算性能有限,在处理计算密集型和时间敏感型应用时可能会面临能力不足的情况。将移动终端需要处理的计算卸载到边缘网络中的计算节点进行计算,能有效解决此问题。基于移动边缘网络介绍了已有的计算卸载策略,从最小化延迟、最小化能耗、最大化收益这几个方面进行阐述,对比了不同侧重点的卸载策略的优缺点,并对移动边缘计算卸载策略的未来发展进行了思考与展望。

**关键词** 移动边缘计算,计算卸载,方法综述,卸载策略,性能评价指标

中图法分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/jsjcx.181001872

Survey of Research on Computation Unloading Strategy in Mobile Edge Computing

DONG Si-qi LI Hai-long QU Yu-ben ZHANG Zhao HU Lei  
(Combat Support College,Rocket Force University of Engineering,Xi'an 710025,China)

**Abstract** Improvement of technology makes smart mobile devices more and more popular. Mobile device traffic is growing rapidly. However,due to the limited resources and computing performance of smart mobile devices,mobile device may face the situation of insufficient capacity when dealing with compute-intensive and time-sensitive applications. Unloading the computations which the mobile terminal needs to process to the computing nodes in the edge network for calculation is an effective way to solve this problem. This paper first introduced the existing calculation offloading strategies and elaborated from the aspects of minimizing delay,minimizing energy consumption and maximizing benefits. Then,it compared the advantages and disadvantages of different offloading strategies. At last,it considered and prospected the future development of calculation offloading strategies of mobile edge network.

**Keywords** Mobile edge computing,Computing offloading,Method survey,Offloading strategy,Performance evaluation index

1 引言

随着互联网的普及和物联网技术的不断发展,智能移动设备(智能手机、平板电脑、智能家居电器等)被广泛应用于人们的日常生活。根据思科 2017 版可视化网络索引白皮书的统计,预计到 2021 年底,全球移动数据流量将达到 49 艾字节/月(1 艾字节=10<sup>9</sup> 吉字节),用户移动端流量将占网络中总流量的 84%<sup>[1]</sup>。2016—2021 年移动设备网络流量值的变化和移动设备增长趋势的变化分别如图 1 和图 2 所示。预计到 2030 年,全球移动终端数将接近 180 亿,中国将可能达到 30 亿<sup>[2]</sup>。随着数据量级的不断攀升,移动设备需要处理的数据量不断增多。移动设备的中央处理单元(CPU)虽然已经发展得很强大,但有时不能满足在短时间内处理大量计算任务的程序的需求。此外,电池能量与存储空间有限,也成为了制

约移动设备及时处理大量级数据计算应用程序和影响用户体验质量的重要因素<sup>[3]</sup>。现有的通信网络面临着诸多挑战:网络热点区域高数据传输速率、高流量密度;保障应用的高可靠性与时延约束;网络中连接设备功耗约束与高连接密度;网络负载能力与安全性等。

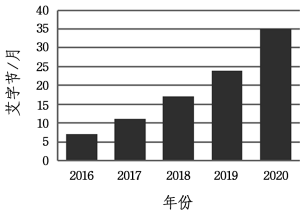


图 1 2016—2021 年移动设备网络流量值的变化

Fig. 1 Changes of mobile device network traffic value from 2016 to 2021

到稿日期:2018-10-09 返修日期:2019-01-14 本文受国家自然科学基金青年基金项目(61702525)资助。  
董思岐(1995—),女,硕士生,主要研究方向为移动边缘计算;李海龙(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络,E-mail:35244637@qq.com(通信作者);屈毓铤(1987—),男,博士,讲师,主要研究方向为无线通信、D2D 通信、网络编码;张 钊(1993—),男,硕士生,主要研究方向为软件定义网络;胡 磊(1994—),男,硕士生,主要研究方向为网络攻防。

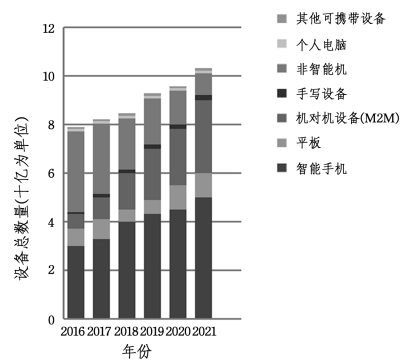


图 2 2016—2021 年移动设备数量增长趋势图

Fig. 2 Mobile device growth trend chart from 2016 to 2021

移动云计算技术的出现为解决这些问题提供了一种思路。将移动设备上需要进行的大量级数据计算卸载至云端处理,突破了移动设备终端硬件的限制,便于进行数据存取,智能均衡移动设备负载能够延长电池寿命,支持移动用户使用更复杂的高计算量程序,使移动设备具有更高的数据存储能力。但此方法需要将大量数据传输至距离移动终端较远的云服务器上,这会导致额外的无线电回程负载引起的高延迟;同时,移动终端需要消耗较多能量,从而增加了网络负荷。为解决这些问题,移动边缘计算的概念应运而生。移动边缘计算环境中将代理服务器或基站置于更加接近终端设备的位置,从而减少数据传输所带来的时间延迟和能量消耗,更适用于在移动终端上运行的实时应用等。移动边缘计算可被视为部署于移动网络边缘的云服务器,能够执行传统方式无法解决的一系列任务,保障用户的使用体验和服务质量。

在移动边缘计算网络中进行计算卸载,需要遵循卸载策略。将目前常见的卸载策略按计算卸载的性能需求划分为最小化时延、最小化能耗、最大化收益 3 种主要类型。最小化时延的卸载策略,即在卸载过程中将传输数据及进行计算所耗费的总时间降到最少;最小化能耗的卸载策略,即在满足移动终端时间延迟约束的条件下,力求在计算卸载的整个过程中最小化移动终端消耗的能量;最大化收益的卸载策略,即根据处理任务的实际需要将时间延迟与能量消耗这两个指标进行加权求和以获得最小值,使得移动终端或由移动终端及边缘服务器构成的整体系统的总花费最小。本文将介绍移动边缘计算网络中的这 3 类计算卸载策略的研究现状,并对未来的研究趋势做出展望。

本文第 2 节介绍了移动边缘计算网络的发展历程、特点,以及相比于移动云计算网络等具有的优缺点;第 3 节着重介绍了计算卸载的过程,并按照计算卸载的性能需求对计算卸载策略进行了分类;第 4 节结合计算卸载策略的分类,逐一对比卸载技术的研究现状进行了分析及对比;最后对全文进行了总结,并展望了计算卸载策略的发展趋势和未来的研究方向。

2 移动边缘计算网络

移动边缘计算网络是基于边缘计算的概念建立的。美国卡内基梅隆大学的 Satyanarayanan 教授将边缘计算定义为:边缘计算是一种新的计算模式,该模式将计算与存储资源(如 Cloudlet、微型数据中心或雾节点等)部署在更贴近移动设备

或传感器的网络边缘<sup>[4]</sup>。2009 年卡内基梅隆大学首次提出的使计算及云服务器更接近用户设备的边缘计算的概念为 Cloudlet<sup>[5]</sup>,也可称为薄云计算。Cloudlet 概念提出的初衷是将具有高计算能力的计算机或机群放置在网络边缘来为附近的移动设备提供计算和存储资源。Cloudlet 计算热点的概念与无线接入网络(WiFi)热点模式类似,移动终端通过 WiFi 连接访问 Cloudlet<sup>[6]</sup>。这种方式是存在缺点的,因为当使用 Cloudlet 服务时,用户设备需要在移动网络和 WiFi 之间进行切换;此外,由于 Cloudlet 不是移动网络的固有部分,WiFi 网络的覆盖范围一般只是本地范围,对移动性的支持有限,移动用户设备使用 Cloudlet 难以保证服务质量。因此,Orsini 等<sup>[7]</sup>提出可以通过建立在 ad-hoc 协议基础上的 ad-hoc 云直接在用户设备上执行计算来实现边缘云计算<sup>[8]</sup>。但是,该方法仍面临几个关键挑战:如何选取适当的用户设备进行计算,并保证处理的数据将被传送回用户设备;需要启用计算用户设备之间的协调,通过控制信道来促进可靠的计算;计算用户设备可以为其他设备提供计算能力,以提供电池消耗和额外数据传输的约束;安全和隐私问题<sup>[9]</sup>。

移动边缘计算(MEC)的概念最早于 2013 年被提出,IBM 与 Nokia Siemens 网络在当时共同推出了一款在无线基站内部运行应用程序以向移动用户提供业务的计算平台<sup>[10]</sup>。从用户的角度来看,边缘计算最大的缺点是用户的服务质量(QoS)和体验质量(QoE)难以保证,因为计算没有集成至移动架构的网络中。中国移动提出了将云的功能集成到移动网络中的云无线接入网络(C-RAN)。C-RAN 利用分布式协议栈的概念<sup>[11-12]</sup>,将计算能力汇集成虚拟资源服务更多的移动设备。将边缘计算集成到移动网络架构中的另一个概念是由欧洲电信标准协会(ETSI)中新创建的 2014 行业规范组(ISG)开发的<sup>[13]</sup>,ETSI 正式宣布推动移动边缘计算标准化。其基本思想是把云计算平台从核心网络内部迁移到移动接入网边缘,实现计算及存储资源的弹性利用,从而实现云计算功能与移动网络的高效无缝集成,在移动网边缘提供信息技术服务环境和云计算能力。从运营商的角度,网络分为无线接入网、移动核心网和应用网络三大部分。无线接入网的主要任务是负责移动终端的接入,主要由基站组成;移动核心网负责连通无线基站与外部网络,主要由高性能服务器和路由器构成;应用网络负责处理数据信息等,是各类型服务器的工作地点,相当于计算中心。移动边缘计算就是将应用网络中的功能转移到移动终端与无线接入网之间的位置,从而缩短移动终端的时延,避免网络拥塞。

移动网络中 MEC 的基本概念图如图 3 所示。

移动边缘计算网络中,移动终端通过基站(eNodeB)和无线信道连接;基站具有 MEC 服务器,为用户提供计算服务;云服务器位于距离移动终端设备较远的核心网络上层。相比移动终端将计算卸载到云服务器所使用的移动云计算技术可能导致的不可预测时延、传输距离远等问题,边缘计算能够快速、高效地为移动终端提供计算服务,同时缓解核心网络的压力。移动边缘计算网络和移动云计算网络的移动终端设备与服务器位置关系的示意图如图 4 所示。移动边缘计算与移动云计算的各项技术指标的对比如表 1 所列。

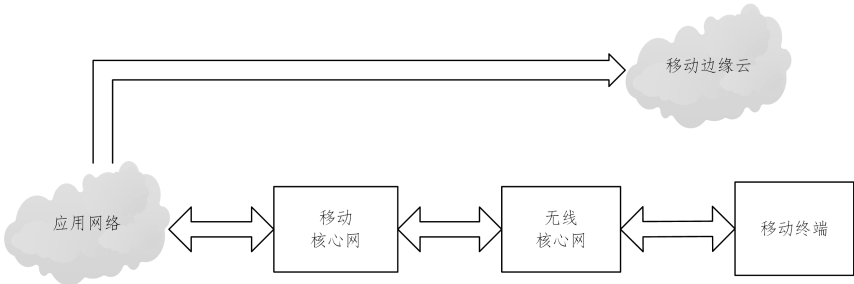


图 3 移动网络中 MEC 的基本概念图  
Fig. 3 Basic concept of MEC in mobile network

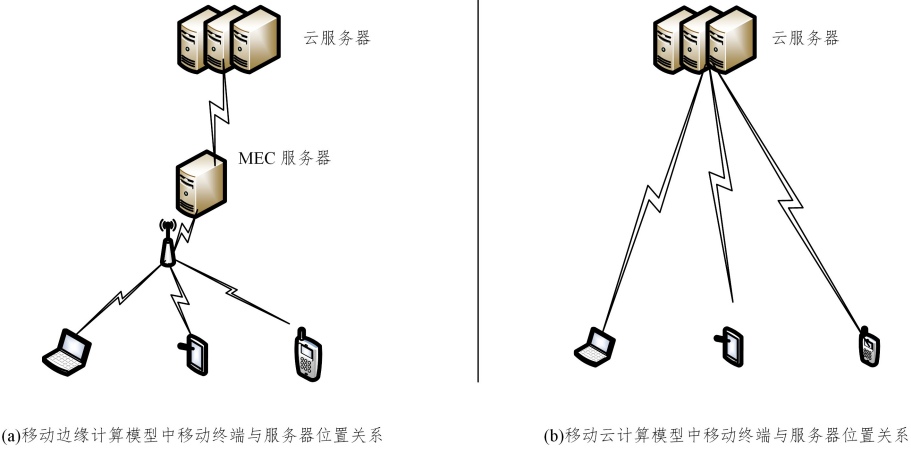


图 4 移动边缘计算网络与移动云计算网络中设备及服务器位置的对比示意图  
Fig. 4 Location comparison of mobile device between mobile edge computing network and mobile cloud network

表 1 移动边缘计算与移动云计算的应用对比  
Table 1 Application comparison between mobile edge computing and mobile cloud computing

对比项目	移动云计算	移动边缘计算
计算模型	集中式	分布式
核心思想	中心化	边缘化
计算节点位置	网络中心	本地网络边缘
目标应用	一般网络设备	移动设备及物联网设备
设备连接方式	专用线路连接	无线连接
服务器与移动终端距离	远	近
计算能力	无限制	有限制
存储能力	无限制	有限制
执行延迟	较高	较低

边缘计算中的网络边缘资源主要包括移动手机、个人电脑等用户终端，WiFi 接入点、蜂窝网络基站与路由器等基础设施，摄像头等嵌入式设备，Cloudlet 和 Micro Data Center 等小型计算中心等。这些资源数量众多，相互独立，分散在用户周围，我们称之为边缘节点。边缘计算更强调用户与计算之间的距离，边缘计算就是把这些独立、分散的资源统一，为用户提供服务<sup>[5]</sup>，因此移动边缘计算具有以下特点<sup>[14]</sup>。

- 1) 边缘部署: 便于用户接入临近的云资源, 可以为物联网等业务的发展奠定基础;
- 2) 临近用户: 可以获取、分析、处理用户或客户端设备的多种信息, 从而开展新型的业务;
- 3) 低时延: 边缘服务靠近用户或终端设备, 可以降低时延, 加快请求响应速度, 改善用户体验, 并缓解回程网络和骨干网络的压力;

- 4) 位置信息感知: 本地服务可以利用底层的信令信息确定互连设备的位置, 为基于位置的服务提供支持和保障;
- 5) 高带宽: 移动边缘计算服务器靠近信息源, 可以在本地进行简单的数据处理, 不必将所有数据或信息都上传至云端, 能够缓解核心网络的传输压力并减少网络拥堵, 同时也能提升网络的速率。

3 计算卸载技术

计算卸载一般是指将计算量大的任务合理分配给计算资源充足的代理服务器进行处理, 再把运算完成的计算结果从代理服务器取回<sup>[15]</sup>。计算卸载过程(见图 5)大致分为以下 6 个步骤。

- 1) 寻找可用的 MEC 计算节点, 用于后续对卸载程序进行计算。
- 2) 程序切割: 将需要进行处理的任务程序进行分割, 在分割过程中尽量保持分割后的各部分程序的功能完整性, 以便进行后续的卸载。
- 3) 卸载决策: 决定是否卸载程序, 以及卸载程序的哪些部分至 MEC 计算节点。卸载策略可分为动态卸载及静态卸载两种: 在执行卸载前决定好所需卸载的所有程序块的策略为静态卸载策略; 根据卸载过程中的实际影响因素来动态规划卸载程序的策略为动态卸载策略。
- 4) 程序传输: 将卸载的计算程序传输至 MEC 计算节点。
- 5) 执行计算: MEC 计算节点对卸载到服务器的程序进行计算。

6)计算结果回传:将 MEC 计算节点进行计算处理后的结果传回用户的移动设备终端。

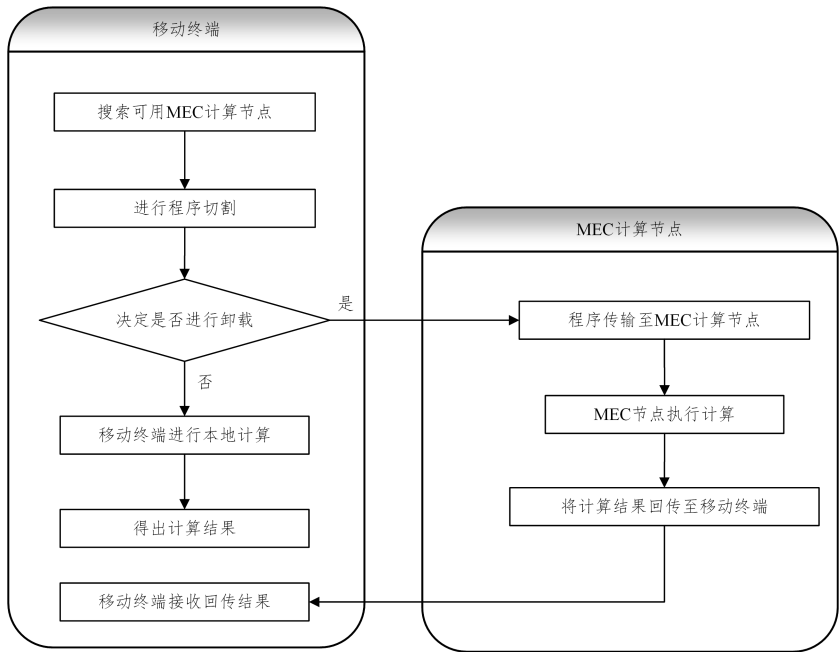


图 5 计算卸载流程图  
Fig. 5 Flowchart of computation offloading

4 移动边缘计算卸载决策的分类

在计算卸载的过程中会受到不同因素的影响<sup>[16]</sup>,如用户的使用习惯、无线电信道的通信情况、回程连接的质量、移动设备的性能和云服务器的可用性等,因此计算卸载的关键在于指定适合的卸载决策。本文按照需要进行计算卸载的任务的性能需求,对计算卸载策略进行了介绍。目前,计算卸载的性能通常以时间延迟和能量消耗为衡量指标。时间延迟和能量消耗的计算具体可分为以下两种情况<sup>[17]</sup>。

- 1)在不进行计算卸载时,时间延迟是指在移动设备终端处执行本地计算所花费的时间;能量消耗是指在移动设备终端处执行本地计算所消耗的能量。
- 2)在进行计算卸载时,时间延迟是指卸载数据到 MEC 计算节点的传输时间、在 MEC 计算节点处的执行处理时间、接收来自 MEC 计算节点处理的数据结果的传输时间三者之和;能量消耗是指卸载数据到 MEC 计算节点的传输耗能、接收来自 MEC 计算节点处理的数据结果的传输耗能两部分之和。

卸载决策需要考虑计算时延因素,因为时延会影响用户的使用体验,并可能会导致耦合程序因缺少该段计算结果而不能正常运行,所以所有的卸载决策至少都需要满足移动设备端程序所能接受的时间延迟限制。此外,还需考虑能量消耗问题,如果能量消耗过大,则会导致移动设备终端的电池快速耗尽。最小化能耗是指在满足时延条件的约束下最小化能量消耗值。对于某些应用程序,若不需要最小化时延或能量的某一个指标,则可以根据程序的具体需要,赋予时延和能耗指标不同的加权值,使二者数值之和最小,即总花费最小,我们称之为最大化收益的卸载决策。3 种卸载策略的适用范围

对比如表 2 所列。本文将对计算卸载目标满足最小化延迟、满足时延限制的条件下最小化能耗、满足最大化收益这 3 个方面分别进行阐述。

表 2 3 种卸载策略的适用范围对比			
Table 2 Scope of application comparison among three offloading strategies			
性能需求	适用对象	优势	不足
最小化时延	时间敏感型应用	卸载过程耗时最短	不能保证能量消耗量移动设备端是否可以承受
最小化能耗	能量消耗型应用	在卸载过程中能量消耗最少	为使得卸载的程序不影响后续程序的运行,需要在最小化能耗的同时满足卸载程序的计算时延限制
最大化收益	没有对时延或能耗有某一个指标最小化要求的应用	卸载过程中总花费最小(即时延消耗与能量消耗的加权和最小)	适用范围有限,针对特定要求的程序应用不适用

4.1 最小化延迟卸载决策方法

文献[18]提出了一维搜索算法寻找计算卸载的最优策略,该策略适用于需要将计算任务全部卸载的情况。预先设定好时间间隔,按照周期读取需要进行计算的程序段,在每个时间间隔期间根据缓冲区的队列状态及移动终端和 MEC 计算节点的处理能力、移动设备与 MEC 计算节点之间的信道特征,决定是否对缓冲区等待的程序进行卸载,以此进行最优卸载决策,从而达到最小化时延的效果。仿真实验表明,相比将任务置于移动设备本地进行计算,使用本文所提出的卸载策略进行计算可以缩短 80% 的延迟时间,与将计算卸载至中央云服务器相比能够缩短 44% 的时延。但是,这种方法需要移动终端接收来自于 MEC 计算节点的反馈后才能做出是否进行卸载的决定。文献[19-20]介绍了对单个移动终端进行全部计算卸载时适用的基于动态计算卸载在线学习分配策



略。首先设置时间间隔,在每个时间间隔内检测执行卸载所花费的执行成本(时间延迟和卸载失败率),以此决定是否进行卸载。在进行卸载时,通过改变为移动终端分配的中央处理器(CPU)的周期频率和计算卸载的发射功率来缩短计算时延。在线学习分配策略仅依赖于当前系统状态,不需要计算任务反馈结果、无线信道和能量采集的分布信息。通过理论推导和模拟实验证明:相比不进行卸载的本地计算,此方法可以缩短 64% 的延迟时间。文献[21]讨论了在超密集网络中的移动边缘计算满足低延迟需求的解决方案,利用软件定义网络的思想,将任务卸载问题表示为混合整数非线性计算过程,将降低时延问题转化为任务卸载放置问题和资源分配两个子问题。实验结果表明:与随意卸载任务和统一卸载任务相比,该方法可以缩短 20% 的时延。文献[22]考虑了物联网的应用场景,通过为程序合理分配资源来缩短计算时延,进而提出了一种完全多项式时间近似方案,相比启发式算法其更能有效地缩短计算时延。文献[23]以博弈论的方法设计分布式计算卸载算法,对计算时延指标进行量化,以实现更低的计算时间开销。

以上计算卸载策略都达到了缩短卸载过程中产生的执行时间延迟的目的,但是没有考虑在进行卸载决策时移动终端一侧的能量消耗,若移动终端电池能量快速耗尽则会导致相应的卸载策略无法正常使用。因此,研究者继续探索了在满足移动终端的计算时延限制的同时,又可以最小化能量消耗的计算卸载策略。

#### 4.2 最小化能耗卸载决策方法

最小化能耗的卸载策略一般可以分为三大类:动态在线卸载和静态离线卸载、计算与通信资源的联合优化分配,以及优化已有的成熟算法。

1) 动态在线卸载和静态离线卸载类的策略如下:文献[24]提出了离线预先计算卸载策略,该策略将在时延限制下的最小化能耗问题转化为约束马尔可夫决策过程问题。为了解决单移动设备的计算卸载能量最小化问题,引入了两种资源分配策略(基于在线学习的动态资源分配策略和预先计算离线策略),根据应用程序属性的先验知识(如检测每个时间周期内的数据包达标率、无线信道状况等)来决定资源分配。实验结果表明:对于中低负载的移动终端进行计算卸载,预先计算离线策略比在线学习策略的性能更高。模拟仿真结果表明:相比在移动终端进行计算,使用离线预先计算卸载策略可以减少 78% 的能量消耗。文献[25]针对单个移动设备提出了确定性和随机性离线策略,移动设备将需要进行计算的任务全部卸载至 MEC 计算节点进行处理,在卸载过程中考虑了时变信道的动态环境、无线电资源调度和计算负载的联合动态优化计算。文献[26]提出了适用于多用户设备情况下需要将计算全部卸载的卸载决策,将文献[25]中的用于单个移动终端的卸载场景向适用于多用户移动终端的场景进行扩展,进而提出了基于合置决策学习框架的确定性在线策略,该策略通过使用联合优化每个移动终端的调度及计算分流策略来保证用户移动终端的体验质量和各个移动终端的公平性,以及平均延迟限制。

2) 从计算与通信资源联合优化分配的角度,文献[27]提

出了通信与计算资源联合分配的卸载策略,考虑单个 MEC 计算节点与多个移动终端的场景,在应用程序规定的平均时延约束下联合优化发送功率、分配给每个应用程序的 CPU 周期和比特数;论证了优化后的发送功率与分配给每个用户的 CPU 周期之间的关系,并利用计算调度技术验证了计算队列的稳定性;将优化策略与动态调度机制相结合,根据计算队列和无线电信道状态决策来判断是否进行卸载,以在规定的时延约束内完成相应程序的计算并最小化能耗。文献[28]提出了对多个移动终端设备进行全部计算卸载时适用的分布式迭代算法连续凸映射的卸载策略,将计算卸载问题转化为无线电和计算资源联合优化问题,任务卸载时通过无线链路传输任务的预编码矩阵信息,MEC 计算节点根据任务的矩阵信息将自身的计算资源按照 CPU 周期分配给各个任务进行计算的联合优化,以在满足时延限制的条件下最小化能耗;将优化任务在移动终端上执行计算产生的时延问题视为非凸性问题,由于计算卸载需要优化其他变量,因此提出了迭代算法,该算法收敛于原始非凸问题的局部最优解。根据模拟实验,该卸载策略更适用于需要卸载的数据量较少且需要大量 CPU 周期进行处理的程序。文献[29]提出了高效节能计算卸载算法,该算法适用于对多移动设备进行全部计算卸载的情况。首先,根据移动终端计算时间和能量成本特征将移动终端分为 3 类:第一类为由于移动终端不能满足执行时延约束,必须将计算卸载到 MEC 计算节点的移动终端;第二类为能够支持本地计算且计算能耗低于阈值的移动终端;第三类为可以进行计算卸载也可以支持本地计算的终端。然后,根据通信信道和计算要求给第一类和第三类移动终端分配优先级。最后,根据给定的优先级,为移动终端分配无线电资源。通过模拟实验证明:此方法可以减少 15% 的用户设备能量消耗。文献[30]基于组合优化方式的适应性算法,通过模拟实验证明:对于单移动终端设备将计算部分卸载的情况,该算法至多可以减少 43% 左右的用户设备能量消耗。该算法建立了基于联合优化算法的数学模型,通过降低计算复杂度来达到节约能耗的目的。文献[31]将需要上传至边缘服务器的任务进行分割,用贪婪算法解决最小化能耗问题,提出最大节能任务优先算法,同时对比了该算法在不同计算节点和信道数量情况下的节能情况。

3) 有许多卸载策略是基于已有的算法进行改进优化的,这类方法能够确保策略的可行性。文献[32-33]提出了二进制粒子群优化器算法,将其将单移动终端设备的计算部分卸载,降低了 25% 的用户移动终端能量消耗。此方法将由一组任务组成的应用程序分成几个原子部分,这几个部分相互依赖,某些部分只能在执行其他部分后才能进行处理。将应用程序建模为通用图拓扑,将节能卸载问题公式化为 0-1 编程问题,0 表示应用程序卸载,1 表示在本地进行计算处理。文献[32]中的卸载策略采用了 BPSO(Binary Particle Swarm Optimizer)算法,使节能效果优于传统粗粒度卸载策略,优化了卸载性能。文献[34]提出了基于资源配置规模的应用和时延算法,该算法利用无线电和计算资源的联合优化启发式策略来降低能耗。该文献讨论了多移动终端设备部分计算卸载的情况,基于 3 个移动终端的仿真实验结果表明:相比在本地进行

计算,该算法可以将能量消耗降低 40%。文献[35]提出了基于 TDMA(时分多址)系统的优化资源配置入口卸载算法,讨论了移动边缘计算卸载系统中的资源分配问题。系统中有多个移动终端,它们共同使用一个 MEC 服务器且具有不同的计算负载。卸载策略将最优资源配置问题归结为一个凸优化策略:基于阈值结构进行最优资源的分配。该策略为每一个移动终端做出二进制卸载的决策。如果移动终端具有高于给定阈值的优先级,则将任务全部卸载到 MEC 服务器;如果移动终端具有低于给定阈值的优先级,则卸载能够满足时延限制的計算量即可。文献[36]进一步完善了文献[35]中的策略,提出了基于 TDMA 和 OFDMA(正交频分多址)系统的优化资源配置入口卸载算法,将无线电及计算资源分解成更细粒度的指标进行优化分配。仿真实验结果表明:相比只使用 TDMA 系统,OFDMA 系统的接入使得系统的能量消耗降为 1/10。文献[37]通过 DVS(动态电压调节)调整用户设备的计算机功率,节约了能耗,其适用于单移动终端设备部分卸载的场景。算法的本质是:每次进行卸载时,使移动终端等待的时间均为允许时延的最大值,以使得能耗最小化。文献[38]提出了一种能耗感知的卸载方案,将电池剩余电量引入到能量消耗和时间延迟的加权因子中,通过迭代搜索算法优化通信和计算资源的分配,从而减少移动设备的能量消耗。

除上述解决能耗问题的主要方式外,还出现了一些新兴的研究方法。文献[39]给出了移动边缘服务器具备能量收集设备的情况,能量收集设备能从周围环境收集可再生能源,并使用 Lyapunov 优化算法来确定收集能量的策略;结合任务进行卸载请求时,采用集中式和分布式的贪心调度算法,来达到最小化能耗的目的。文献[40]考虑了移动设备具有多核处理器场景下的计算卸载耗能问题,将能耗问题转化为混合整数非线性规划问题,使用启发式搜索算法解决卸载决策和任务调度问题。该算法在满足任务时延约束的同时,能显著降低移动设备的能耗。文献[41]提出了移动边缘计算与物联网的新集成架构,通过设计选择性卸载方案最小化了设备的能量消耗。文献[42]研究了感知边缘服务器放置的问题,将降低能耗的问题转化为多目标优化问题,通过设计基于粒子群优化的能量感知算法求得最优解。对比实验结果表明:与其他算法相比,该方法可降低 10%以上的能耗,同时可提高计算资源利用率。

最小化能耗的计算卸载策略都是在满足移动终端的时延限制下寻求最小化能量消耗的算法。这样的最小化能耗策略取决于移动终端的发射功率和无线信道质量。现有的策略大部分是通过模拟仿真的形式来进行验证,并获取结论,但在仿真过程中可能无法还原真实的卸载条件,还可能会忽略掉无线信道质量的时变性、多移动终端同时进行计算卸载时的相互干扰等。此外,有的卸载策略仍停留在理论指导层面,在技术上还并未实现。在多移动终端设备使用同一 MEC 计算节点进行计算卸载的场景中,模拟实验假定了各个移动终端设备具有相同的信道质量和计算能力,这与真实情况存在差距。建立数学模型的方式实现计算卸载策略的优化可能会带来较高的复杂度,对 MEC 计算节点造成较高的负载。实际卸载过程中可能不一定需要最小化时延或最小化能耗,因

此研究者们试图根据实际卸载情况来找到缩短时延与在满足时延限制下降低能耗这两者之间的一个平衡,实现计算卸载的最大化收益。

### 4.3 最大化收益卸载决策方法

从搜索和博弈算法的角度出发,文献[43]提出了多移动终端计算卸载的博弈策略,该策略适用于将计算全部卸载的情况;设计了能够实现 Nash 均衡的分布式计算卸载算法,设置称量参数作为是否进行计算卸载的指标,同时将其作为卸载时决策倾向于减少能耗还是缩短时延的指标。卸载策略需要在设备能量消耗和计算时延之间进行权衡,以实现用户收益的最大化。理论论证和模拟仿真证明:此算法可以减少 40%的用户设备能量消耗。文献[44-45]提出了基于半定松弛和随机化映射的启发式算法全部卸载策略。该算法首先决定是否进行计算卸载,若进行计算卸载,则需要评估 MEC 节点能否满足计算需求,若满足,则继续进行卸载,若不满足,则将计算卸载至远程集中的云服务器上,将最大化收益问题公式化为非凸约束二次规划问题。实验证明:经过少量随机性迭代,该算法即可提供最优性能。文献[44]中的策略适用于单移动终端计算卸载场景;文献[45]对策略进行进一步优化,使其适用于多移动终端计算卸载场景。通过模拟仿真可知:对于单移动终端场景,该算法可以减少 70%的总体开销(时延和能耗总开销);对于多移动终端,其可以减少 45%的总体开销。

在计算资源与通信资源的分配方面,文献[46]提出了通信和计算资源的联合配置卸载策略,该策略适用于在单个移动终端设备进行部分卸载的场景。决定是否进行卸载时,考虑需要处理的计算的总位数、移动终端和 MEC 节点的计算能力、移动终端对 MEC 节点的访问服务、信道状态。计算卸载被公式化为通信和计算资源分配的联合优化问题。实验结果表明:执行时间较短时,移动终端的能量消耗随着执行时间的推移而降低,当执行时间更长时,节约的能耗量微乎其微。因此,执行时间较长的计算程序更适合进行部分卸载。文献[47]提出迭代算法来查找上行链路发送的比特数量的最优值,对文献[46]的卸载策略做了进一步的讨论,论证了信道质量好时执行计算卸载的效率更高。通过分析论证和模拟实验证明,文献[47]的算法可以减少 97%的用户设备能量消耗。文献[48]对文献[46-47]中的单移动设备场景进行扩展,将计算卸载策略拓宽至多移动设备卸载可用,通过模拟实验验证其可以减少 90%的移动终端能量消耗。文献[49]提出了基于动态计算卸载的 Lyapunov 优化计算卸载策略,其应用缓冲区的稳定性约束制定功耗最小化模型,确保本地执行计算的移动终端以最优 CPU 工作频率进行工作,并将传输功率和带宽分配给将程序卸载到 MEC 计算节点的移动终端,根据优先级控制能量消耗。实验结果表明:该策略可以使多移动终端设备在部分计算卸载条件下减少 90%的能量消耗和 98%的计算时延。文献[50-51]通过最小化通信和计算资源过载的方法来最小化系统开销。文献[50]在满足执行时延要求的同时最大化 MEC 计算节点能够支持计算的应用程序数量,应用程序是否被卸载取决于应用程序的优先级,应用程序的优先级取决于实际需求的侧重点,若侧重满足时延要求,则



设定低时延具有高优先级。文献[51]考虑了多移动终端设备访问多个 MEC 计算节点的情形,针对 MEC 服务器数量的增加会导致通信高开销和高计算复杂度的问题,设计了应用程序分配索引策略。移动终端根据自身的计算资源计算自己的索引策略,通过基站(eNodeB)广播该索引策略,使移动终端设备找到最合适的 MEC 服务节点,从而实现最大化收益的卸载决策。文献[52]通过二分法寻找需要进行计算卸载的移动设备的最优发射功率,匹配计算资源,以在所提框架下提高用户的任务卸载量,相比现有方案,所提方法能有效减少系统开销。文献[53]提出了 OREO 在线优化算法,其通过动态优化服务器缓存及任务卸载,利用 Lyapunov 优化算法解决了服务异质性、系统状态未知、空间需求耦合和分散协调的问题。实验证明:该算法在降低时延和能耗方面具有良好的性能。文献[54]在利用深度学习技术进行实时视频分析的场景下,利用测量驱动模型解决了视频精度、网络条件、时间延迟、能量消耗等性能指标的组合优化问题,证明了所提模型的优越性。文献[55]考虑了完成时间和能耗,将移动边缘计算的计算卸载问题制定为系统成本最小化问题,提出了分布式算法,通过优化卸载选择、移动终端 CPU 频率、传输功率等来达到降低时延与能耗的目标。文献[56]通过使用博弈算法和匈牙利算法的相互迭代来解决资源分配的优化问题,从而降低计算能耗及时延,最小化系统的总开销。

最大化收益的计算卸载策略本质上是在满足执行时间限制和能量消耗限制的条件下,在执行计算卸载过程中通过分析时延和能耗这两个指标对计算卸载总消耗的影响,来对二者进行权衡,寻找一个平衡点使得时延或能耗的限制设定更适合实际场景,从而达到总花费最小的目的,即最大化收益。最大化收益的计算卸载策略的优化效果大部分是通过理论论证与模拟实验的方式来进行评定的,将最大化收益问题进行公式化建模或转化为通信资源与计算资源的联合优化配置,而大多研究是将这些指标设置为指定值或在动态计算卸载策略中给定初值,没有考虑通信资源与计算资源的实时变化性。因此,在后续的研究中,需要在公式化建模或理论论证中增加干扰变量来模拟实际信道或计算资源变化等因素在计算卸载过程中的影响。

4.4 小结

通过对以上 3 类计算卸载决策的分析对比可知,与在移动端进行计算相比,将计算卸载至边缘服务器最显著的优势是可以降低计算时延。在保证计算时延的条件下,可进一步展开对能量消耗问题的讨论。最大化收益的策略虽然不能最小化时延或能耗,但能够更贴近具体的应用需求。应用移动边缘计算技术时,时间延迟一般指移动端的计算时延;能量消耗可以指移动端的能量消耗或移动端与边缘服务器构成的系统的整体能量消耗。

移动边缘计算的应用场景不断被扩大,计算卸载决策的设定很大程度上依赖于待处理任务的特性,未来可能会有新的衡量计算卸载决策的性能指标出现。利用移动边缘计算技术进行计算时涉及到的变量因素更多,只有保障计算过程中涉及要素的稳定性,才能支持移动边缘计算的使用。

**结束语** 近年来移动边缘计算发展迅速,解决了移动终

端设备在运行计算量大的程序时计算时延及电池能量消耗过快的问题;计算卸载技术的思路与卸载过程清晰明确。但计算卸载策略也仍有一些问题需要解决。

1)现有计算卸载策略很大程度上仍停留在理论指导层面,模拟仿真实验大部分忽略了时变性因素的影响,如无线信道的通信质量、MEC 服务器同时处理多移动设备的计算卸载时用户终端设备间的影响等。部分仿真实验虽然考虑了影响变量,但一般给出的影响因素参数为恒定值,没有较好地体现时变性。

2)由第 4 节对 3 种卸载策略的介绍与比对可知,现有的计算卸载策略不能够在最小化时延的同时最小化能耗,后续可以研究约束条件下的双性能指标优化策略。

3)由于移动边缘计算中的计算卸载技术仍属于新兴发展领域,计算卸载策略是否会对不同的移动终端设备产生不同的影响仍有待讨论。在未来的发展中,移动运营商能否将边缘计算集成到网络架构中实现边缘云的高效无缝集成,将功能计算植入移动网络中形成行业统一标准,仍是未知的。

4)现有的计算卸载策略少有对安全防御性的思考,如何保障 MEC 计算节点及通信信道的安全性,防止数据泄露窃取等问题,仍然值得进一步研究。

基于需要解决的问题,可以总结出下一步的研究方向。

1)结合物联网应用、增强现实技术、自动驾驶、实时交互应用、工业控制系统、5G 网络等场景下待处理的计算任务的需求,制定相关的计算卸载策略;

2)考虑制定既最小化时延又最小化能耗的计算卸载策略;

3)促进将边缘计算集成到网络中形成行业统一标准,移动终端使用基于此制定的具有普适性的计算卸载策略;

4)在卸载过程中如何保证数据信息安全性,分析信道安全性能等指标,可通过数据编码等方式制定具有一定安全性能的计算卸载策略;

5)在多 MEC 计算节点与多移动终端场景下制定计算卸载策略时,考虑卸载策略的公平性;

6)考虑其他领域背景的应用,如利用机器学习的相关性能指标进行计算卸载策略的制定,将精度或成功率作为性能指标制定卸载决策等;

7)现有的计算卸载策略研究的计算任务之间都为独立且平等的关系,未来可以考虑待处理任务间存在优先级区分的计算卸载策略。

参 考 文 献

[1] CISCO I. Cisco Visual Networking Index : Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021, whitepaper, 2016 [EB/OL]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-indexvni/complete-white-paper-c11-481360.pdf>.  
[2] IMT-2020(5G)推进组. 5G 愿景与需求白皮书 V1.0[EB/OL]. [http://jpkc.bcu.edu.cn/meol/common/script/preview/download\\_preview.jsp?fileid=292201&resid=82701&lid=17534](http://jpkc.bcu.edu.cn/meol/common/script/preview/download_preview.jsp?fileid=292201&resid=82701&lid=17534).  
[3] 王尚广,周傲,魏晓娟,等. 移动边缘计算[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2018:2-10.  
[4] SATYANARAYANAN M. The emergence of edge computing

- [J]. Computer, 2017, 50(1): 30-39.
- [5] SATYANARAYANAN M, BAH L P, CACERES R, et al. The Case for VM-Based Cloudlet in Mobile Computing [J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(4): 14-23.
- [6] DENG M F. Research on Task Migration Strategy Based on Mobile Edge Computing [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)  
邓茂菲. 基于移动边缘计算的任务迁移策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [7] ORSINI G, BADE D, LAMERSSDORF W. Computing at the mobile edge: Designing elastic android applications for computation offloading[C]// Proc of the 8<sup>th</sup> IFIP Wireless and Mobile Networking Conf (WMNC). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 112-119.
- [8] LIU Z. Research on Computing Unloading Algorithm Based on Mobility Prediction in Mobile AdHoc Cloud Environment [D]. Kunming: Yunnan University, 2015. (in Chinese)  
刘帆. 移动 AdHoc 云环境中基于移动性预测的计算卸载算法研究[D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- [9] YU G D, ZHANG J, LEUNG V C M, et al. IEEE Access Special Section Editorial: Mobile Edge computing for Wireless Networks [J]. IEEE Access, 2018, 6: 11439-11442.
- [10] BARBAROSSA S, SARDELLITTI S, LORENZO P D. Communicating While Computing: Distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 45-55.
- [11] CHENG J K, SHI Y M, BAI B. Computation Offloading in Cloud-RAN Based Mobile Cloud Computing System[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.
- [12] SONG S S, YAN Y, WANG M Y. Key Technologies of 5G Oriented Mobile Edge Computing System [J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(1): 21-25. (in Chinese)  
宋晓诗, 闫岩, 王梦源. 面向 5G 的 MEC 系统关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(1): 21-25.
- [13] 俞一帆, 任春明, 阮磊峰, 等. 5G 移动边缘计算[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 40-45.
- [14] MARJANOVIC M, ANTONIC A, ZARKO I P. Edge Computing Architecture for Mobile Crowdsensing [J]. IEEE Access, 2018, 6: 10662-10674.
- [15] WANG G D. Research on Mobile Cloud Computing Offload Switching Based on Utility Function [D]. Kunming: Yunnan University, 2014. (in Chinese)  
王国栋. 基于效用函数的移动云计算卸载切换研究[D]. 昆明: 云南大学, 2014.
- [16] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [17] JIAO L, FRIEDMAN R, FU X M, et al. Cloud-based Computation Offloading for Mobile Devices: State of Art, Challenges and Opportunities [C]// Future Network & Mobile Summit. Lisboa: IEEE Press, 2013: 1-11.
- [18] LIU J, MAO Y Y, ZHANG J, et al. Delay-Optimal Computation Task Scheduling for Mobile-Edge Computing System[C]// IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Barcelona: IEEE, 2016: 1451-1455.
- [19] MAO Y, ZHANG J, LETAIEF K B. Dynamic Computation Offloading for Mobile-Edge Computing with Energy Harvesting Devices [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3590-3605.
- [20] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360-381.
- [21] CHEN M, HAO Y X. Task Offloading for Mobile Edge Computing in Software Defined Ultra-dense Network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 587-597.
- [22] YU R Z, XUE G L, ZHANG X. Application Provision in Fog Computing-enabled Internet-of-Things: A Network Perspective [C]// IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications. Honolulu: IEEE, 2018: 783-791.
- [23] CHEN X, JIAO L, LI W Z, et al. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2795-2808.
- [24] KAMOUN M, LABIDI W, SARKISS M. Joint resource allocation and offloading strategies in cloud enabled cellular networks [C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). London: IEEE, 2015: 5529-5534.
- [25] LABIDI W, SARKISS M, KAMOUN M. Energy-Optimal Resource Scheduling and Computation Offloading in Small Cell Networks [C]// International Conference on Telecommunications (ICT). Sydney: IEEE, 2015: 313-318.
- [26] LABIDI W, SARKISS M, KAMOUN M. Joint Multi-user Resource Scheduling and Computation Offloading in Small Cell Networks [C]// IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Abu Dhabi: IEEE, 2015: 794-801.
- [27] BARBAROSSA S, SARDELLITTI S, LORENZO P D. Joint allocation of computation and communication resources in multi-user mobile cloud computing [C]// IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Darmstadt: IEEE, 2013: 26-30.
- [28] SARDELLITTI S, SCUTARI G, BARBAROSSA S. Joint Optimization of Radio and Computational Resources for Multi-cell Mobile Cloud Computing [J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2015, 1(2): 89-103.
- [29] ZHANG K, MAO Y M, LENG S, et al. Energy-Efficient Offloading for Mobile Edge Computing in 5G Heterogeneous Networks [J]. IEEE Access, 2016, 4: 5896-5907.
- [30] CAO S W, TAO X F, HOU Y Z, et al. An Energy-Optimal Offloading Algorithm of Mobile Computing Based on HetNets [C]// International Conference on Connected Vehicles and Expo (IC-CVE). Shenzhen: IEEE, 2015: 254-258.
- [31] WEI F, CHEN S X, ZOU W X. A greedy algorithm for task offloading in mobile edge computing system [J]. China Communications, 2018, 15(11): 149-157.
- [32] DENG M, TIAN H, FAN B. Fine-granularity Based Application Offloading Policy in Small Cell Cloud-enhanced Networks [C]//



IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). Kuala Lumpur:IEEE,2016:638-643.

[33] KENNED J,EBERHART R C. A Discrete Binry Version of the Particle Swarm Algorithm[C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Orlando:IEEE,1997:4104-4108.

[34] ZHAO Y,ZHOU S,ZHAO T C,et al. Energy-Efficient Task Offloading for Multiuser Mobile Cloud Computing[C]// IEEE/ CIC International Conference on Communications in China (IC-CC). Shenzhen:IEEE,2015:1-5.

[35] YOU C S,HUANG K,CHAE H,et al. Multiuser Resource Al- location for Mobile Edge Computation Offloading[C] // IEEE Global Communication Conference (GLOBECOM). Washing- ton,DC:IEEE,2017:1-6.

[36] YOU C S,HUANG K,CHAE H,et al. Energy-Efficient Re- source Allocation for Mobile-Edge Computation Offloading [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2017,16(3): 1397-1411.

[37] WANG Y T,SHENG M,WANG X J,et al. Mobile-Edge Com- puting:Partial Computation Offloading Using Dynamic Voltage Scaling [J]. IEEE Transactions on Communications,2016, 64(10):4268-4282.

[38] ZHANG J,HU X P,NING Z L,et al. Energy-Latency Tradeoff for Energy-Aware Offloading in Mobile Edge computing Net- works[J]. IEEE Internet of Things Journal,2018,5(4):2633- 2645.

[39] CHEN W W,WANG D,LI K Q. Multi-user Multi-task Compu- tation Offloading in Green Mobile Edge Cloud Computing [J]. IEEE Transactions on Services Computing (Early Access), 2018:1-1.

[40] GENG Y L,YANG Y,CAO G H. Energy-efficient Computation Offloading for Multicore-Based Mobile Devices[C]// IEEE IN- FOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications. Honolulu:IEEE,2018:46-54.

[41] LYU X C,TIAN H,JIANG L,et al. Selective Offloading in Mo- bile Edge Computing for the Green Internet of Things [J]. IEEE Network,2018,32(1):54-60.

[42] LI Y Z,WANG S G. An Energy-Aware Edge Server Placement Algorithm in Mobile Edge Computing[C]//2018 IEEE Interna- tional Conference on Edge Computing(EDGE). San Francisco, CA:IEEE,2018:66-73.

[43] CHEN X,JIAO L,LI W Z,et al. Efficient Multi-User Computa- tion Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing[J]. IEEE/ ACM Transactionson Networking,2016,24(5):2795-2808.

[44] CHEN M H,LIANG B,DONG M. A Semidefinite Relaxation Approach to Mobile Cloud Offloading with Computing Access Point[C]// IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Stockholm: IEEE,2015:186-190.

[45] CHEN M H,DONG M,LIANG B. Joint offloading decision and resource allocation for mobile cloud with computing access point [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Shanghai:IEEE,2016:3516-3620.

[46] MUNOZ O,PASCUAL-ISERTE A,VIDAL J. Joint Allocation of Radio and Computational Resources in Wireless Application Offloading[C]// Future Network and Mobile Summit. Lisboa: IEEE,2013:1-10.

[47] MUNOZ O,PASCUAL-ISERTE A,VIDAL J. Optimization of Radio and Computational Resources for Energy Efficiency in La- tency-Constrained Application Offloading [J]. IEEE Transac- tions on Vehicular Technology,2015,64(10):438-4755.

[48] MUNOZ O,PASCUAL-ISERTE A,VIDAL J,et al. Energy-La- tency Trade-off for Multiuser Wireless Computation Offloading [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Confer- ence Workshops (WCNCW). Istanbul:IEEE,2014:29-33.

[49] MAO Y Y,ZHANG J,SONG S H,et al. Power-Delay Trade off in Multi-User Mobile-Edge Computing Systems[C] // IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Washing- ton DC:IEEE,2016:1-6.

[50] ZHAO T C,ZHOU S,GUO X Y,et al. A Cooperative Schedu- ling Scheme of Local Cloud and Internet Cloud for Delay-Aware Mobile Cloud Computing[C]// IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). San Diego:IEEE,2015:1-6.

[51] GUO X Y,SINGH R,ZHAO T C,et al. An Index Based Task Assignment Policy for Achieving Optimal Power-Delay Tradeoff in Edge Cloud Systems[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur:IEEE,2016:1-7.

[52] PHAM Q V,LEANH T,TRAN N H,et al. Decentralized Com- putation Offloading and Resource Allocation for Mobile-Edge Computing: A Matching Game Approach [J]. IEEE Access, 2018,6:75868-75885.

[53] XU J,CHEN L X,ZHOU P. Joint Service Caching and Task Of- floading for Mobile Edge Computing in Dense Networks[C]// IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Commu- nications. Honolulu:IEEE,2018:207-215.

[54] RAN X K,CHEN H L,ZHU X D,et al. DeepDecision:A Mobile Deep Learning Framework for Edge Video Analytics[C]// IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communica- tions. Honolulu:IEEE,2018:1421-1429.

[55] YU H Y,WANG Q Y,GUO S T. Energy-Efficient Task Off- loading and Resource Scheduling for Mobile Edge Computing [C]// 2018 IEEE International Conference on Networking, Ar- chitecture and Storage (NAS). Chongqing:IEEE,2018:1-4.

[56] ZHANG J,XIA W W,YAN F,et al. Joint Computation Offloa- ding and Resource Allocation Optimization in Heterogeneous Networks with Mobile Edge computing [J]. IEEE Access,2018, 6:19324-19337.