

# 5G及以上的多址边缘计算综述：基本原理、技术集成与现状

Quoc Viet Pham、方芳、Vu Nguyen Ha、Mai Le、支国丁、龙宝乐、荣获Quoc Viet Pham是高安全车辆关键技术研发中心，中印大学，197，Inje ro，Gimhae si，Gyeongsangnam做，韩国。方芳和支国丁分别就读于曼彻斯特大学电气与电子工程学院，英国M139PL。Vu Nguyen Ha与综合理工大学蒙特利尔，蒙特利尔，魁北克，加拿大。Mai Le是信息与通信系统系，并获得Joo Hwang，系电子、通信、机械、汽车工程系、印第安大学、197、Inje ro、Gimhae si、Gyeongsangnam、韩国。长Bao Le与国立魁北克大学研究所，蒙特利尔，QC H5A 1K6，加拿大。电子邮件：{越南语Quij.j.A.Kr，Pang.MangChist.Ac.UK，VU-HAGNYNYNE.MPLTL.CA，MAILI2108@ Gmail，Ziuoo.Pij-MangChest.Ac.UK，Lo.Le.EM.Ir.S.CA，IjWang@ Cun.A.Kr}。Quoc Viet Pham博士是相应的作者。这项工作得到了韩国国家研究基金会（NRF）的资助，该基金由韩国政府资助（NSRF 2019R1C1C1006143）。

这是V1  
作者方方, 吴氏, MAILI2108, 丁志国, 隆勒, 井王, 越普克  
ARXIV页面 2019年6月20日提交 三百四十 138分钟阅读  
域曼彻斯特@多聚体E.R.S.CA@注射器

## 摘要

在新的计算密集型应用和物联网（IOT）的出现的推动下，可以预见的是，新兴的5G网络将面临前所未有的交通量和计算需求的增加。然而，最终用户大多具有有限的存储容量和有限的处理能力，因此如何在资源受限的用户上运行计算密集型应用最近成为一个自然关注的问题。移动边缘计算（MEC）是新兴的5G网络中的一项关键技术，它可以通过托管计算密集型应用来优化移动资源，在发送到云之前处理大数据，在与移动用户非常接近的无线接入网络（RAN）中提供云计算能力，并在RAN信息的帮助下提供上下文感知服务。因此，MEC实现了各种各样的应用，其中实时响应是严格要求的，例如无人驾驶车辆、增强现实、机器人和浸没介质。5G网络的特点是三种服务类型：极高的数据速率、大量的连接性、低延迟和超高可靠性。事实上，随着新技术的出现，从4G到5G的模式转变可能成为现实。MEC在5G网络中的成功实现还处于起步阶段，需要学术界和工业界的不懈努力。在本次调查中，我们首先提供了一个整体概述的MEC技术及其潜在的使用情况和应用。然后，本文主要研究了MEC与5G及其他技术的集成，包括非正交多址接入、无线功率传输和能量收集、无人机、物联网、网络加密和机器学习。此外，我们简要地总结了现有的文献，集成了MEC与其他5G技术，并专注于开发测试床和实验评价边缘计算。我们进一步总结的经验教训，从最先进的研究工作，并讨论挑战和潜在的未来发展方向的MEC研究。

5G网络及以上，异构网络，物联网，机器学习，边缘计算，非正交多址，试验台，无人机，无线电力传输和能量收集。

## 首字母缩略词

**3GPP**  
第三代合作伙伴计划

**1G**  
第一代移动网络

**2G**  
第二代移动网络

**3G**  
第三代移动网络

**4G**  
第四代移动网络

**4C**  
通信、计算、控制和缓存

**5g**  
第五代移动网络

人工智能  
人工智能

应用程序接口  
应用程序编程接口

应收账  
增强现实

**BBU**  
基带单元

**BS**  
基站

**CDMA**  
代码多址访问

**D2D**  
设备对设备

直流电  
数据中心

动态链接库  
深度学习

**DQN**  
深度Q网络

呃  
能量收集

欧洲广播电台  
进化的Node B

**ETSI**  
欧洲电信标准协会

埃沃  
边缘视频编排

频分多址  
频率多址接入

网络融合  
纤维丝

异质网路  
异构网络

**HET MEC**  
异质性MEC

Baidu

翻译

同义

英语

中文

显示原文

提交建议与反馈

进入百度翻译

物联网

物联网

ICI

小区间干扰

长期演进技术

长期演进

MDP

马尔可夫决策过程

多输入多输出

多输入多输出

MCC

移动云计算

MCS

移动群体感测

MEC

移动边缘计算

毫米波

毫米波

毫升

机器学习

二氧化锰

移动网络运营商

诺玛

非正交多址

NFV

网络功能虚拟化

QoE

体验质量

服务质量

服务质量

跑

无线接入网

秩和比

强化学习

RRH

遥控收音机头

RSU

路边单元

SBC

单板计算机

SCA

逐次凸逼近

斯皮普

同时无线通信与功率传输

OFDM

正交频分复用

瘤

正交多址

SDN

软件定义网络

电视

电视

时分多址

时间分割多路访问

无人机

无人飞行器

虚拟现实

虚拟现实

无线网络

无线保真

WPT

无线电力传输

## I说明

在过去的四年中，无线通信网络的发展改变了我们生活、社会、文化、政治和经济的方方面面。自从1980年初的第一代蜂窝网络商业化以来，为了支持语音服务，几代蜂窝标准已经在网络体系结构、关键技术、覆盖、移动性、安全和隐私、数据、频谱效率、成本最优等方面存在巨大差异。具体地说，每十代引入新一代蜂窝网络，从1980的第一代（1G）、1991的第二代（2G）、1998代的第三代（3G）、2008的第四代（4G）到2020的第五代5G。在这些网络世代中支持的基本服务和应用总结如下<sup>[1]</sup>。20世纪80年代初，1G被引入作为第一商业蜂窝网络，其中语音服务的峰值数据速率为2.4 kbps，没有安全机制。第二代（2G）开始为移动用户提供数据服务，例如短文本消息、图片消息和多媒体消息。之后，在第二代和第二代（2.5G）中支持电子邮件和Web浏览。2G网络提供了64 kbps的理论最大数据速率。后来，智能手机的出现促进了3G网络中的一些新的服务和应用，例如视频电话、快速下载、移动电视（TV）、远程医疗和视频会议。与2G相比，数据传输速度大大提高，这取决于底层技术，例如，WCDMA的高达384 kbps，HSPA高达7.2 Mbps，HSPA高达21.6 Mbps。目前，有两种4G候选系统：基于IEEE STD 802.16E-2005和长期演进（LTE）标准的微波接入全球互通（WiMAX）标准，该标准是日本NTT DoCOMO首次提出的，是ETSI注册商标。许多高数据率应用在4G中被新引入，例如，移动Web接入、云计算、游戏服务、高清（HD）移动电视和3D TV。4G网络需要在高迁移率的峰值数据速率为100 Mbps的服务和应用，并且对于低移动性通信需要大约1 Gbps。无线通信在Fig.的发展<sup>[2]</sup>。

https://www.groundai.com/project/a-survey-of-multi-access-edge-computing-in-5g-and-beyond-fundamentals-technology-integration-and-state-of-the-art/1

2/38

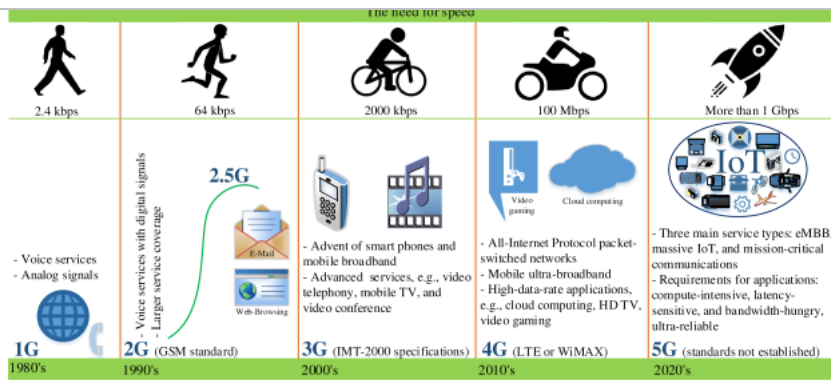


图1: 无线通信的发展

现在,学术界和工业界都在为最终完成5G标准化和商业化做出巨大的努力,并且很有理由预计2019的5G网络将是可用的。5G是新一代的无线通信网络,它不仅改进了现有的移动宽带业务,还扩展了移动网络,以支持大量连接的设备和大量多样的服务和应用。[1]. 一般来说,5G用例可以分为三种服务类型:增强型移动宽带(EMBB)、关键任务通信和大规模物联网(IOT)。5G网络将负责执行通信、计算、控制和内容传递(4C)四个主要功能。[2]. 此外,随着5G的出现,期望产生广泛的新应用和用例,例如,虚拟现实(VR)、增强现实(AR)、基础设施的远程控制和IOT场景。可以预见,5G中的新兴应用具有不同的属性和技术要求。例如[3]AR和VR需要更高的数据速率和更低的延迟(使用EMBB的情况);基础设施的远程控制需要具有极高可靠性/可用性和低延迟的网络连接(任务关键通信的使用情况);并且大量的设备在IOT应用中与数据速率、发射功率和移动性的放宽(使用大规模IOT)相连接。这些应用正准备引起不仅对通信资源的需求激增,而且对计算资源的需求激增。在通信资源方面,已经提出并开发了各种新技术,用于5G网络及其发展。[4]例如,非正交多址接入(NOMA)、密集异构网络(HetNetworks)、无人机(UAV)、物联网、无线功率传输(WPT)和能量收集(EH)、海量多输入多输出(MIMO)、毫米波(MMWAVE)和机器学习(ML)。在计算资源方面,针对不同的应用,例如移动云计算(MCC)、雾计算、云无线接入网络(C-RAN)和移动边缘计算,已经引入并实现了几种新的计算范例。

思科白皮书[\[4\]](#)显示全球数据流量在2016增长了63%，在过去的五年里增长了18倍。具体而言，移动网络每月携带400个字节，2011个月，2015个月每月4.4个字节，2016个月每月7.2个字节。2016的移动设备和连接数量达到了80亿，比2015的760万有所增长，其中智能手机占据了增长的大部分。下一代互联网的指数繁荣预示着连接的东西（例如传感器和可穿戴设备）的数量将分别增长超过950亿和2020。然而，大多数连接的设备具有有限的通信和存储资源和有限的处理能力，这表明新兴应用的严格要求与实际设备能力之间的不匹配。尽管在移动硬件能力方面的最新进展，在移动设备（移动计算）的计算仍然不能应付许多需要生成、处理和存储大量数据并且需要大量计算资源的应用的需求。处理这些挑战的一个可能的方法是使计算从终端设备卸载到集中式云，然而，它可以由回程和前端网络中的拥塞以及其他问题，如安全传输和隐私策略负担。这推动了移动边缘计算的发展，移动云服务和功能向移动网络的边缘移动。

## i-A从集中式云到移动边缘

为了丰富终端用户的计算资源，云计算、移动计算和无线通信网络结合的最早的计算模式是移动云计算。<sup>[4]</sup>一方面，MCC允许开发人员和服务提供者构建更复杂的应用程序，而不需要额外的计算能力的设备需求。另一方面，MEC承认移动设备运行更多的计算密集型应用，因为大多数计算可以卸载到中央云中并处理。<sup>[5]</sup> MCC提供了几个优点<sup>[6]</sup>通过将密集计算从资源受限设备迁移到资源云中来延长电池寿命，通过存储数据或远程访问云中存储的数据来提高存储容量和处理能力，并向移动设备提供计算密集型应用。然而，MCC也遭受了相当大的缺点。首先，虽然MCC的集中式允许大量的计算资源，但MCC不适合于希望广泛分布的用户的应用。第二，移动用户和中心云之间的物理距离很大，意味着高延迟，这不能满足延迟敏感应用的严格要求。第三，隐私和安全是MCC成功的关键因素。这是因为高浓度的数据信息使云非常容易受到暴力攻击，并且通过窃听者可以偷听到通过无线环境卸载到云的数据/应用。最后但并非最不重要的是，随着设备数量和数据量的急剧增加，移动数据从所有移动用户到中心云是有挑战性的，因为带宽负担和网络拥塞的极端负担。

Satyanarayanan提出了最早的边缘计算概念之一，所谓的CuldLead。等2009[4]。作者定义了一个云计算作为一个可信的和资源丰富的计算机或一组计算机，它们位于边缘的一个战略位置，并与互联网很好地连接。云计算的主要目的是将云计算扩展到网络边缘，并支持资源贫乏的移动用户在运行资源密集型和交互式应用。虽然云计算的存储和计算能力相对低于云计算中的数据中心（DC），但云计算具有部署成本低和可扩展性高的优点。[4]。移动用户利用基于虚拟机（VM）的虚拟化来定制邻近云团上的服务软件，然后在无线局域网上使用那些云计算服务来卸载密集计算。[4]，[4]。作者在[4]提出了两种不同的VM计算卸载方法：VM迁移和VM合成。由于云计算中使用了VM配置，所以云计算可以在独立模式下运行，而不需要云的干预。[4]，[4]。移动用户可以通过WiFi访问CyrdLead服务。事实上，云计算将云计算与移动用户紧密结合的想法与提供互联网接入的WiFi概念类似。[4]。用户和云团之间的WiFi连接可能是一个严重缺陷。这样，移动用户就无法在长距离访问云，同时使用WiFi和蜂窝连接。[4]即，当用户使用云计算服务时，用户必须在移动网络和WiFi之间切换。

为了解决云计算的固有缺陷，雾计算已经成为一种很有前途的解决方案。云计算是Cisco 2012提出的一个术语，是指云计算从核心扩展到网络边缘，从而使计算资源更接近于最终用户。<sup>[44]</sup>雾计算的主要目的是使计算资源更接近终端用户，并减少传输到云处理和存储所需的数据量。因此，移动终端用户（例如，传感器和IOT设备）所收集的大量的计算数据，而不是被传输到云上，可以通过网络边缘处的雾节点来处理和分析，从而减少了执行延迟和网络拥塞。<sup>[45, 46]</sup>与云DCS的集中式实现相比，雾节点（雾计算节点）通常分布在分布式的位置，因此它们在大范围内广泛分布和地理上可用。<sup>[47]</sup>作为云计算平台的补充，雾计算在以下特征中脱颖而出<sup>[48, 49]</sup>（1）边缘定位、低延迟和位置感知，2）地理分布广泛，3）支持移动性和实时应用，4）由于地理分布的结果，非常多的节点（例如传感器和雾节点），5）雾节点的异质性和无线接入的优势。由于它的特性，雾计算在许多使用场合和应用中起着重要的作用。<sup>[48]</sup>例如，智能城市、连接车辆、智能电网、无线传感器和执行器网络、智能建筑和分散智能建筑控制。然而，不像云团，雾节点不能充当自我管理的云DC，并且需要云的支持。

在节点类型方面，可以从异构元素（例如路由器、交换机、IOT网关）构建雾节点，而云计算可以称为云DC。<sup>[49]</sup>在节点位置方面，雾节点可以部署在从终端设备到集中式云的战略位置，并且可以在室内和室外部署云雾。云计算和雾计算是相似的，因为云和雾节点没有集成到移动网络体系结构中，因此雾节点和混浊通常由私有企业实现和拥有，并且不容易为移动用户提供服务质量（QoS）和体验质量（QoE）保证。<sup>[43, 44]</sup>

在这方面，云计算的概念之一是云无线接入网络（C-RANS）。在传统网络（例如1G和2G）中，无线电单元和基带信号处理单元集成在基站（BS）中，而在C-RANS中，传统BS被分为分布式远程无线电头（RRHS）和集中式基带单元（BBU），并且传统BS中的基带信号处理功能被移动到中央BBU。通过这种去耦合，RRH只负责基本无线电频率功能，并且可以支持热点中的高容量，而中央BBU提供大规模信号处理，例如集中式编码和解码以及联合波束形成。虽然C-RAN结构在降低成本和功耗，提高频谱效率和能量效率，以及提高硬件的利用率方面都是有希望的。C-RANS的集中导致了分布式RRH和集中式BBU之间的信息交换的大量需求，从而对前端链路提出了严格的要求。此外，虚拟化BBU主要用于集中式无线电信号处理和协作无线电资源分配。很少用于计算卸载。



构的补充，MEC的目标是将电信和IT云服务结合起来，在移动用户附近的无线接入网络中提供云计算能力。[\[13\]](#). MEC的主要目标是[\[14\]](#)通过托管计算密集型应用来优化移动资源，在发送到云之前对大数据进行预处理，在移动用户附近启用云服务，并借助于无线电接入网络信息提供上下文感知服务。在这样做时，MEC实现了各种各样的应用，其中实时响应是严格要求的，例如无人驾驶车辆、虚拟现实和增强现实（VR/AR）、机器人和浸没介质。为了利用异构接入技术（例如4G、5G、WiFi和固定连接）获得MEC的额外好处，ETSI ISG在2017中正式改变了移动边缘计算的名称为平均多接入边缘计算。[\[15\]](#). 在这种范围扩展之后，MEC服务器可以由网络运营商在RAN和/或与建立网络边缘的不同元素并置的不同位置部署，例如BSS包括宏eNB和小型eNBS、光网络单元、无线网络控制器站点、路由器、交换机和WiFi接入点。注意，虽然传统蜂窝网络中的BSS主要用于通信目的，但是MEC使它们能够与MEC服务器搭配以便于移动用户提供附加服务。这种转换将智能推向传统的BSS，使得它们不仅可以用于通信目的，而且可以用于计算、缓存和控制服务。在下文中，MEC的正确名称是多址边缘计算，并且本文中的工作相应地使用该名称。

i-B 前期工作的局限性及我们的贡献

主题	参考	主要贡献
体系结构与计算卸载	<a href="#">[13]</a>	-回顾潜在的MEC体系结构和负载计算。 -从计算卸载的最新研究成果和开放挑战和未来工作的愿景总结经验教训。
	<a href="#">[16]</a>	-介绍了MEC及其关键使能技术，例如NFV、SDN和虚拟机。
		-对MEC参考体系结构的一致解释以及MEC管理和编排框架的激励。
资源分配	<a href="#">[17]</a>	-从通信的角度，如计算任务模型、通信模型、移动用户的计算模型和MEC服务器的计算模型，对基本的MEC模型进行广泛的调查。
		-全面回顾了MEC在三个MEC场景、单用户、多用户和多服务器MEC系统中的联合通信和计算资源分配的研究。
数学框架	<a href="#">[18]</a>	对通信、计算和高速缓存的收敛和集成的新兴技术的全面回顾。
	<a href="#">[19]</a>	全面研究了从多个角度进行计算卸载决策的研究工作。
	<a href="#">[20]</a>	-博弈论中的一个基本背景（非合作、合作和进化博弈）和多接入边缘计算。
		-综述了无线通信网络和多址边缘计算的博弈理论贡献，以及理论博弈模型和边缘计算的研究方向。
研究方向	<a href="#">[21]</a>	概述了MEC背景、应用用例、MEC基础设施和安全和隐私问题。
	<a href="#">[22]</a>	简要介绍了MEC，包括概念、应用、体系结构和开放的研究挑战。
	<a href="#">[23]</a> , <a href="#">[24]</a> , <a href="#">[25]</a>	-回顾了如何利用MEC和其他边缘计算技术来部署和改进新兴的5G网络中的各种物联网应用。
		-全面审查最先进的研究工作和讨论的挑战，以及潜在的未来工作的MEC物联网集成。
	<a href="#">[26]</a> , <a href="#">[27]</a>	全面回顾和详细分析边缘计算技术的安全性和弹性，如雾计算和移动边缘计算。

表一：现有的多址边缘计算综述。

在过去的几年中，已经有大量的研究集中在移动边缘计算体系结构的技术方面或者评论移动边缘计算的属性和应用用例。许多人还考虑了移动边缘计算在5G使能技术和应用中的重要性，并涵盖了在我们的文章中讨论的某些研究方面，例如，[\[11\]](#), [\[12\]](#), [\[13\]](#), [\[3\]](#), [\[26\]](#), [\[23\]](#), [\[24\]](#), [\[25\]](#), [\[27\]](#), [\[28\]](#), [\[29\]](#), [\[31\]](#). 前面的调查总结如下。调查[\[11\]](#), [\[12\]](#)概述了MEC的定义、体系结构、优点、部署方案和测试平台、安全和隐私问题。调查[\[13\]](#)回顾了将云服务和功能集成到移动网络边缘的几个概念，并重点讨论了计算卸载，从用户的角度来看，这是一个关键的用例。毛 等进入[\[17\]](#)首先提供了MEC系统中的联合通信和计算资源管理的全面调查。然后，他们设想未来的MEC研究可以分为五个主要方向：大规模MEC系统的部署、缓存启用的MEC、MEC的移动性管理、绿色MEC、以及MEC中的安全和隐私。塔利布 等进入[\[16\]](#)首先阐述了考虑云计算和雾计算的边缘云计算的发展，然后描述了包括虚拟机和容器、网络功能虚拟化（NFV）、软件定义网络（SDN）和网络切片的MEC的四种基本实现技术。此外，作者还对MEC业务流程、MEC业务移动性、虚拟网络功能和MEC业务的联合优化进行了分析。几部作品[\[13\]](#), [\[24\]](#), [\[25\]](#)揭示了MEC在物联网应用和实现中的作用，其中MEC通过计算卸载赋予了微型IOT设备的计算能力，IOT将MEC服务扩展到各种应用场景和不同类型的物联网设备。随着新应用的成功部署，不仅依赖于高数据速率，而且依赖于高的计算和缓存能力，最近的研究在[\[27\]](#), [\[28\]](#)重点讨论了通信、缓存和计算的集成。本文报道了移动边缘计算中资源分配问题的一些潜在的数学框架。[\[19\]](#), [\[31\]](#). 特别是，作者在[\[19\]](#)进行了一个调查的计算卸载决策时，多个挑战，例如，异构资源，大量的计算和通信，间歇性连接和网络容量，被认为是（即，多目标优化）。作者在[\[31\]](#)提供了博弈论和MEC的背景信息，并回顾了应用理论游戏解决MEC系统的问题和挑战的研究工作。在表中[I](#)我们提供了最近出版的关于MEC的调查和评论的摘要。

概述。图1展示了本文体系结构和计算卸载、资源分配、数字框架。事实上，这些文章只提供了在其他5G技术的背景下的MEC的问题和挑战的高层讨论。无线通信网络从第一代到第四代的演进主要是为了提高移动用户的无线接入速度，以支持以语音为中心和以多媒体为中心的应用。现在，整个学术界和工业界正在对5G网络的标准化和商业化进行最后的冲刺。事实上，在5G网络中出现了广泛的应用和服务，例如高清（HD）视频流应用、在线游戏、虚拟现实（VR）、公共安全应用。每个应用程序/服务可能对高性能提出不同的要求。例如，在线游戏和VR需要非常高的数据速率和低延迟，但是对可靠性的要求不太严格，高清视频流应用需要高数据速率，而延迟和可靠性的低性能可以更宽松，而公共安全应用需要极高的可靠性和低的延迟，但它们可能不需要高数据速率。为了支持具有不同需求的新应用和服务，最终的5G网络需要满足三个主要需求，这是与4G网络相比的1000倍数据速率的增加，约为往返延迟。图2展示了本文的组织结构和读者阅读图。

据我们所知，没有现有的调查，以提供讨论的MEC的背景下，其他5G技术。因此，本文提供了一个全面的调查，最先进的研究工作，重点是集成的MEC和5G技术。简而言之，我们的调查提供的捐款可以概括如下：

- 我们对MEC系统进行了综述，包括MEC的优点、目前的研究进展以及MEC的潜在使用情况和应用。
- 在过去几年中，我们对MEC与NMA、WPT和EH、UAV、IOT和密集HETNET和ML的集成进行了全面的回顾。
- 我们提供了一个简要总结的经验教训，从最先进的研究工作，并描述潜在的未来方向。

### i-C 论文组织

本文的其余部分整理如下。区域二提供MEC的基本背景，包括MEC的优点、当前的研究进展和MEC的关键用例和场景。在这之后，本文的主要部分是对NOMA环境下MEC的最新研究工作进行回顾。三WPT和EH（节）IV无人机通信（段）VIOT（节）不及物动词密集的河网（剖面）七）和机器学习（节）八）对于每一个背景，我们首先概述了关键的挑战，然后回顾以前发表的论文，并最终提供了经验教训和潜在的研究方向。文章以章节结尾。X有更多的见解。为了清楚起见，Fig.二展示了本文的组织结构和读者阅读图。

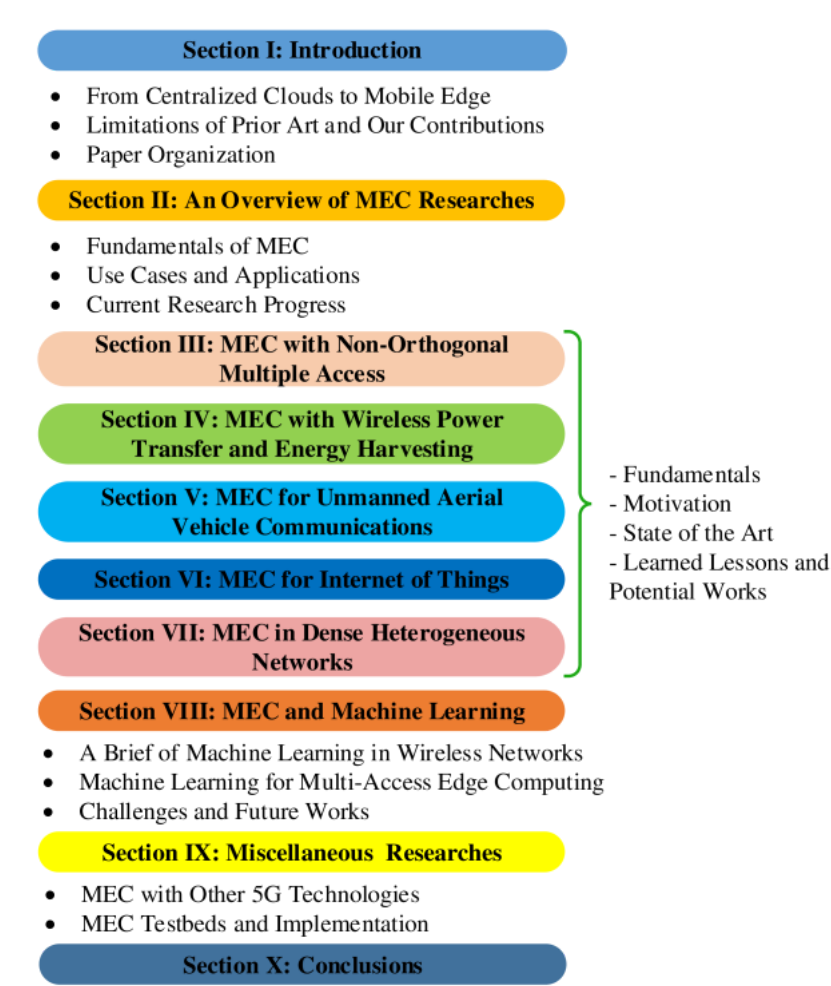


图2：本次调查的组织结构图。

## 二MEC研究综述

本节提供了MEC的总体概述。首先，我们列出了MEC的基本特征，列出了MEC的主要特点，并讨论了MEC的设计挑战和MEC提供的好处。然后，我们描述了MEC的三个主要用例，包括面向客户的服务，运营商和第三方服务，以及网络性能和QoE改进，并进一步说明这些具有代表性示例的用例。最后，重点介绍了MEC的最新研究进展，重点介绍了MEC的标准化工作、MEC的特殊问题列表，并对计算卸载和资源分配进行了简要回顾。概述了多址边缘计算，包括挑战、特性、潜在使用情况和应用以及市场驱动，在Fig.中有图解说

### Ii-AMEC基础

MEC的发展是基于不同的相关技术，包括云计算、MCC、云计算、雾计算。MEC的关键思想是“在移动网络的边缘、RAN和移动用户的近邻处提供IT服务环境和云计算能力”。图1展示了本文体系结构和计算卸载、资源分配、数字框架。由于使用了MEC应用，网络能够满足计算密集型、延迟敏感和带宽需求的新兴应用的各种需求。MEC的需求受到许多因素的推动，如智能和IOT设备的普及性、数据量和速度的快速增长、对新的高带宽和低延迟应用的快速发展的需求、新的无线技术的引入以及QoE和QoS的需求的增加。在这些因素中，低延迟计算被认为是MEC发展的主要驱动因素。对于低延迟计算的需求正在迅速增加，因为低延迟是网络性能的基本度量，并且是许多新兴应用（例如，VR、交互式游戏和任务关键控制）所需要的。MEC的发展进一步加强了业务转型的巨大机遇。一方面，移动网络运营商（MNOS）需要缩短新的应用和服务的市场时间，以使整体收入最大化。另一方面，只有当存在多个利益相关者（例如，移动运营商、服务提供商、供应商和用户）以及它们的协作时，MEC的成功和广泛部署才得到保证。如建议图4展示了MEC市场的关键增长驱动因素可分为四大类：技术集成、潜在使用案例、业务转型和行业协作（见图）。图3展示了在可预见的将来，MEC将通过启用各种各样的用例，例如IOT、连接车、缓存服务和边缘视频编排来为不同行业和部门开辟新的市场。



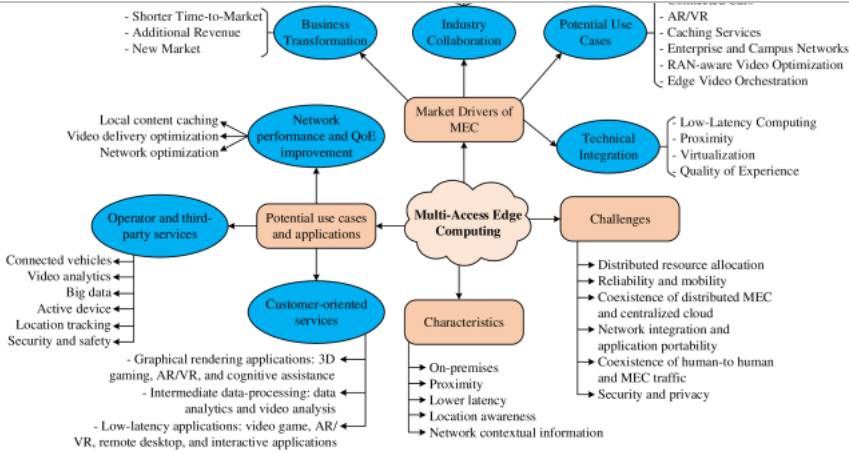


图3：多址边缘计算综述：挑战、特性、潜在使用案例和应用和市场驱动

MEC的一般体系结构可以在Fig.进行说明。从图中MEC将各种各样的应用（例如，视频监视和分析、定制应用和IOT相关服务）暴露给各种类型的最终用户，例如IRAT设备、移动电话、RAN边缘的智能相机。虽然MEC可以在独立的环境中运行，但集中式云和分布式MEC非常好地互补。分布式MEC和集中式云的共存将在许多场景中扮演重要角色，因为MEC服务器的资源瓶颈变得越来越突出，因为连接设备的数量和数据量、速度和变化（大数据）的数量迅速增加。

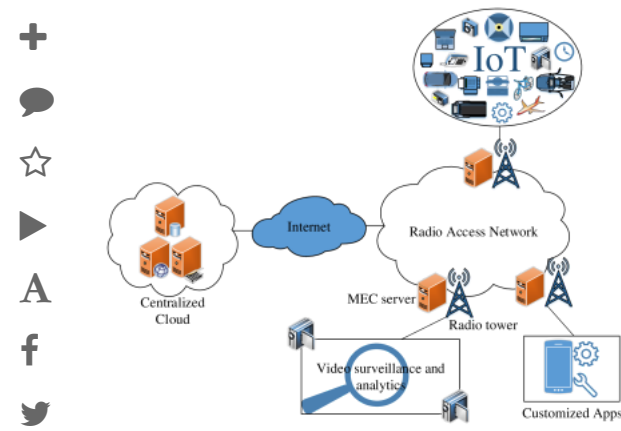


图4：多址边缘计算的一般体系结构。

根据ETSI白皮书MEC可以通过一些特征来描述，即在前提、接近、较低的延迟、位置感知和网络上下文信息。这些特征可以简短地解释如下：

- 在前提下：MEC可以在独立的环境中运行（即，MEC可以与网络的其余部分隔离），并且可以访问本地资源。
- 邻近性：MEC服务器通常定位在移动用户的近处，因此MEC可以从移动用户捕获信息，以用于进一步的目的，例如数据分析和大数据处理。此外，MEC可能能够直接访问移动用户，这可以被企业利用以提供更好的服务并启用特定的应用。
- 较低的延迟时间：虽然MEC服务器与云DC相比具有有限的计算能力，但是MEC服务器的计算能力通常高到足以实时处理新兴的计算密集型应用。随着MEC服务器与移动用户的接近，MEC还具有缩短通信和传播延迟的潜力，这使得MEC对于延迟关键的5G应用（例如自动驾驶、虚拟体育和实时在线游戏）具有很好的促进作用。MEC还打开了减轻前臂和回程链路负担的机会，并通过适当地缓存网络边缘上的流行和本地相关内容来加速内容和服务响应性。
- 位置感知：由于物理距离，云计算不能直接访问本地上下文信息，例如用户位置、网络条件和移动性行为。然而，由于接近，MEC可以利用低电平信号来发现移动用户的精确位置。这对于基于MEC的位置服务变得特别重要。
- 网络环境信息：以接近度为特征，利用实时无线网络条件和本地上下文信息来优化网络和应用操作。例如，MEC可以使用实时信息来估计无线接入网络的拥塞和网络带宽，并平衡MEC服务器之间的工作量。此外，实时网络和上下文信息可以用于通过个性化的服务来改善用户体验，这些个性化服务有利于个人偏好。

尽管MEC带来了一些机遇和潜力，但MEC的成功部署面临着许多挑战。简要讨论MEC的设计挑战可以概括如下：

- 分布式资源管理**由于MEC服务器的计算能力通常是有限的，因此资源分配是阻碍MEC在执行计算密集型和延迟关键应用的成功的关键挑战之一。资源分配的优化可以是多个目标，在不同的情况下变化，例如应用的多样性、异构服务器能力、各种用户需求和特性以及信道连接质量。随着卸载用户数量的增加，无线信道将受到瓶颈，用户对稀缺计算资源的竞争变得非常激烈。此外，由于MEC的动态和分布式部署，资源分配的集中优化并不总是有效的。虽然集中式方法可以满足各种QoS要求，并且可以实现资源优化问题的最优解和高性能，但是所有用户都需要向集中式实体报告其信道质量，这是为了完成整个网络的优化。因此，集中式优化具有计算复杂度高、报告开销大的缺点。此外，对于信息交换和计算卸载，可能不存在专用回程，即使存在，5G异构网络中的无线回程将由于巨大数据共享的高负担而堵塞。所有这些点都要求MEC系统中的高效和分布式资源分配方案。
- 可靠性与移动性**致密化是新兴的5G网络的关键所在，预计MEC与网络密实化的集成可以获得巨大的潜在效益。在这样的环境中，管理移动性和确保可靠性是相当具有挑战性的。首先，MEC服务器被密集地部署，并且移动用户可能在多个小规模MEC服务器的覆盖下。用户移动性会导致MEC服务器之间频繁的切换，这会给移动用户带来服务中断问题并影响整个网络性能。接下来，移动用户将密集计算卸载到MEC服务器进行远程执行，同时由于移动性，它们可以在计算卸载期间移动到新的位置。在这种情况下，移动用户可能无法接收计算结果，因为它们已经移出服务MEC服务器的服务覆盖范围。因此，如何获得计算卸载模型以及如何将计算结果从服务MEC服务器返回到移动用户是应用程序实现的必要条件。此外，由于用户移动性，向MEC服务器卸载用户的数量可以动态变化，从而导致随机上行链路干扰和分配给卸载用户的时变计算资源。最后，由于无线连接和用户移动性的时变动态，在移动环境中提供可靠的MEC服务是非常有挑战性的。例如，基于AR的应用程序通常需要服务器和用户之间的实时响应和超可靠连接。然而，由于动态信道质量和间歇性连接，这些要求不能很好地满足。MEC的研究工作已经显示出几种潜在的解决方案来解决移动性管理和可靠性保险的问题，例如计算迁移、移动性感知的资源分配和服务器调度以及移动感知容错MEC。

此，另一个关键挑战是将MEC无缝地集成到底层网络体系结构和现有接口中，以便在移动网络的边缘后新服务，并通过提供云计算服务来增加网络范围的性能。[\[4+2\]](#). MEC服务器和启用MEC应用程序的存在不应影响核心网络元件和终端设备的标准规范。白色埃斯纸[\[2+5\]](#)讨论了3GPP使能器无缝集成到5G网络的MEC。根据[\[2+5\]](#) MEC集成的关键部件是MEC在路由应用流量和接收相关控制信息时与5G网络交互的能力。此外，MEC应用程序从一个MEC服务器迁移到另一个，由不同的网络提供商实现并拥有，因此需要所谓的应用程序可移植性要求。这消除了应用程序开发人员为不同的MEC平台开发多个应用程序版本的需求。这也是通过VM迁移确保服务连续性和QoS要求的一个重要因素。

4. 分布式MEC与集中式云的共存Cloud DCs拥有丰富的计算资源，能够在接近零的时间内处理大数据应用，并支持大量的用户。然而，分布式MEC是高度优选的，因为在RAN的边缘处的计算不仅能够满足用户的需求，而且还减少了RAN和核心网络中的业务拥塞和传输延迟所导致的端到端延迟。通过与HETNET体系结构类比，以分层的方式实现MEC服务器是非常有益的，即用户层、边缘计算层和云计算层。以这种方式，MEC供应商还将计算资源注入到小型eNB，从而可以利用HETNET的优点来多样化无线电传输和在不同的MEC服务器/MEC层上扩展计算需求。然而，这可能使MEC系统更加复杂和异构，其中计算密集型应用的移动用户必须解决以下问题：哪一个模式（即本地处理或远程执行）哪里迁移[\[4+4\]](#). 一个重要的事实是分布式MEC可能没有足够的计算资源来处理所有的计算请求，但是它对移动用户的响应速度要快于云计算所能做到的，并且完全依赖于云提供了提供潜在的关键服务的挑战。[\[4+9\]](#). 因此，向分布式MEC服务器分发大数据/延迟关键计算是很直观的，同时将计算密集型和延迟容忍的计算任务传送到云DC。[\[5+1\]](#). 然而，由于MEC异构系统的复杂性，无线信道的时变动力学，以及计算任务的各种特性，建模一个能够导出任务分配最优解的优化框架是未来MEC研究的一个具有挑战性但有趣的问题。另一个关键的挑战是如何协调不同的MEC服务器与云DCS共存，在相互处理复杂的计算任务（例如，计算密集和延迟关键）。

5. 人与人共存与MEC交通将新的人-人（H2H）业务（例如语音、数据和视频）和MEC业务结合在新兴的5G网络中是一项具有挑战性的任务，因为终端设备数量的空前增加加上不同的QoS要求和MEC业务的独特特性。[\[5+1\]](#). 例如，物联网系统包括人类类型设备（HTD）和机器类型设备（MTD），它们预期运行不同种类的应用，例如，具有传感器和智能家居的MTD，以及带有视频游戏的HTD。虽然MTDs具有一组混合的QoS要求，例如延迟、可靠性和能量效率，但是HTD通常需要有限的能量预算的高速率。[\[5+2\]](#). 类似地，MEC系统应该以满足H2H业务的QoS要求的方式来设计，同时保持M2M业务（例如，实时响应和上下文感知）的独特特性。这需要设计适合于MEC系统的大规模和异构性质的高效的计算卸载和资源分配方法。

6. 安全与隐私与MCC相比，MEC具有提高安全性和保密性的能力。这种增强是MEC系统的分布式部署和小规模性质的直接结果。[\[3\]](#). 然而，对于安全和隐私保护的MEC服务仍有越来越多的需求。首先，MEC服务器可以集成到各种网络元件和异构的计算能力和层次级别（例如，一个MEC服务器放置在小的ENB，而另一个与宏eNB并置，具有更多的计算能力）。这使得传统的隐私和安全机制，已经在MCC中运行，不适用于MEC系统。第二，在无线信道上卸载任务可能不安全，因为计算任务可以被恶意窃听者偷听到。计算密集型应用程序的传输可以通过用户端的加密和目标服务器端的解密来保证。然而，这可以增加传播延迟以及执行延迟，从而降低应用性能。[\[5+3\]](#). 物理层安全已成为解决MEC中无线计算卸载的有效解决方案。[\[5+4\]](#). 最后，在多个移动用户之间共享相同的存储和计算资源引起了私有数据泄漏和丢失的问题。

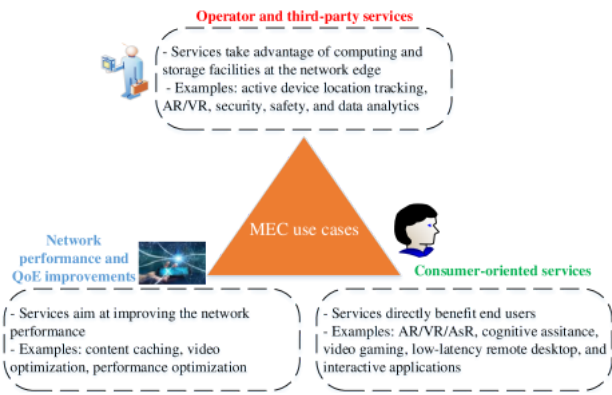


图5：多址边缘计算的用例分类。

## Ii-B用例与应用

有许多服务和应用程序可以通过在接近终端用户的分布式MEC服务器上执行而从MEC获得实质性的好处。不管服务是什么，ETSI白皮书[\[2+9\]](#)表明MEC用例可分为三大类，即：*面向消费者的服务*，*运营商和第三方服务*和*网络性能与QoE改进*（见图[\[5\]](#)）事实是，MEC应该支持所有这些类别，以在移动网络的边缘创建无数新的服务和应用。一般情况下，MEC用例的分类取决于谁能获得MEC的优点和好处。第一种用例类型是“面向消费者的服务”，其目的是通过在新兴的5G网络中运行计算重的和延迟敏感的应用的能力来给移动用户带来直接的好处。在第二类中，运营商和第三方利用MEC计算和存储设施来将自己的应用和服务放置在网络边缘。在“网络性能和QoE改进”下的MEC服务旨在优化移动网络的操作，从而提高网络性能和QoE。接下来，我们讨论单个MEC用例，并提供几个示例作为每个类别中的关键应用。

### Ii-B1面向消费者的服务

由于移动设备通常受限于有限的计算能力、存储容量和电池功率，用户不能完全享受他们自己设备上的高要求的应用。[\[2+3\]](#). 通过计算卸载，用户可以利用MEC服务器上的大量计算资源，从而执行计算密集型功能。计算卸载是有效地用于特别是计算饥饿应用和创新服务，直接受益于用户，例如，图形渲染应用（例如，3D游戏，AR/VR/辅助现实（ASR），和认知辅助），中间数据处理（例如，数据分析和视频分析），和低延迟应用（例如，视频游戏，AR/VR，远程桌面，和交互式应用）。

AR/VR/ASR移动应用由于其与物理现实交互的能力以及它们在改善生活质量方面的重要性，受到了来自客户和供应商的广泛关注。它们是三个不同的概念，它们具有容易区分的几个特征。然而，它们的相似之处是对繁重的计算资源和即时响应时间的要求。由于电池寿命和计算能力的限制，在移动设备上启用这些应用是严格禁止的。MEC被认为是一种在移动设备上实现AR/VR/ASR应用的解决方案。[\[5+5\]](#). 当这些应用程序将部分本地负载卸载到网络边缘处的MEC服务器时，这成为可能。如图所示。[\[6\]](#)进入[\[5+6\]](#) AR应用包括五个主要部分：视频源、跟踪器、映射器、对象标识符和渲染器。虽然必须在本地执行视频源和呈现组件，但是计算密集型部件（跟踪器、映射器和对象标识符）可以卸载到MEC服务器。数值结果[\[5+5\]](#)研究表明，利用MEC的AR应用可以大大减少移动能源消耗，同时满足延迟要求。

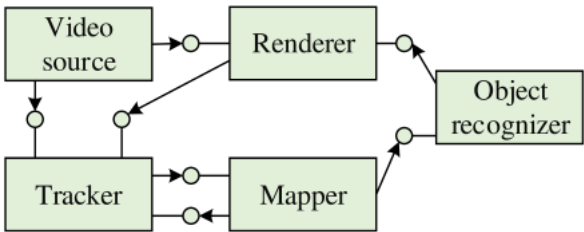


图6：AR应用的系统模型



速互联网接入和高性能配置。基于计算饥饿和低延迟的移动游戏的增长正在推动手持设备的物理限制。为了减少本地设备上的应变，并在低延迟的移动台中玩PC游戏，一个潜在的解决方案是将一些计算密集型任务重定位到MEC服务器，例如渲染流水线。当用户移动到新位置时，必须保持应用程序和用户之间的连接性。如果能够为用户提供更好的移动游戏体验，那么将计算从服务器迁移到新的服务器是可能的。

一个有趣的用例是使用MEC进行基于位置的服务推荐。通常，用户的活动取决于其位置，例如，零售店的用户可能会找到她想要购买的产品的详细信息，而足球比赛中的用户往往会找到有关团队、球员和使用社交媒体的信息。为了提高QoE相对于推荐用户服务的有用性，在MEC服务器上运行的MEC应用可以请求用户的行为和偏好，并且还可以收集用户周围的信息。众所周知，机器学习最广泛的应用之一是推荐系统。因此，基于所收集的数据和信息，MEC应用可以通过基于学习的算法来处理，以推荐适合用户的服务。

### Ii-B2经营者与第三方服务

可以预见，MNOs对MEC服务的支持和提供负有主要责任。然而，MEC被设计为开放的和互操作的环境，允许MNOS从第三方服务提供商部署应用和服务。这是为了鼓励多边经济合作组织的创新和发展，以及解决难以到达的地区提供MEC服务的障碍（例如，部署困难和运营成本）。[25, 57]. 运营商和第三方供应商提供的一些领先应用和服务包括连接车辆、视频分析、大数据、有源设备位置跟踪、安全和安全。

连接的车辆配备有传感、计算和无线设备，因此它们可以与路边单元（RSU）和其他车辆对话。通过这种方式，车辆可以交换关键的安全和操作信息，以提高智能交通系统的安全性、效率和便利性，以及利用增值服务，例如，汽车取景器和停车位置。云计算在为车辆提供许多有价值的服务方面是至关重要的，然而，完全依赖于云计算带来长时间等待的挑战，这不适合于各种各样的连接的车辆服务，例如，自动驾驶、诊断解决方案和基于语音的导航和地理定位服务。MEC通过为RAN内的连接车辆创建分布式计算生态系统来解决延迟问题。MEC应用程序可以运行在MEC服务器上，其可以部署在RSUS、无线BSS、智能灯柱和近路建筑物中。这使得MEC应用程序从路边和车辆传感器收集信息，并进一步分析，例如碰撞警告、道路危险警告、拥堵检测和紧急车辆警告。

由于接近，MEC可用于有源设备位置跟踪。在MEC服务器上承载的地理定位应用可以请求来自活跃用户的实时网络信息，例如往返时间、定时提前测量、接收信号强度指示器（RSSI）测量，以确定它们的精确位置。应用程序还可以请求一些额外的跟踪信息来生成额外的知识。这为企业和人口密集地区提供了基于位置的服务，例如餐馆、场馆和零售商店，或者全球定位系统（GPS）跟踪服务不可用的有限区域。请注意，地理定位应用程序可以基于MNOS或第三方的需求永久地或临时地部署在MEC服务器上。根据应用和用户授权，MEC主机只能跟踪其服务覆盖范围内的一个用户、一组用户或所有活动用户。

MEC还可以用于安全性、安全性和数据分析。该用例代表在MEC服务器上运行的应用程序，从连接的传感器和设备收集大量数据，处理收集的信息并发出有意义的元数据，并将结果发送到中央服务器。MEC服务器可以存储一部分被收集和/或处理过的数据一段时间以用于将来的目的。大量的服务场景可以通过这种用例来实现，例如大数据、安全和安全。例如，在物联网和智能城市中，传感器、摄像机和无线设备的网络被连接在一起以形成基础设施并产生大量的数据，这些数据可以由分布式MEC服务器处理。这使得公民当局能够以更快更有效的方式提供必要的服务，例如，用于刑事识别和实时交通管理的面部识别。

### Ii-B3网络性能与QoE改进

虽然这些服务旨在改善网络性能，但由于优化的网络操作，用户满意度一般得到改善。本地内容缓存、视频传输优化、网络优化被认为是第三个MEC服务类别的三个典型例子。

移动设备的扩散和/或多媒体应用的日益普及对网络容量施加了相当大的压力，以满足在高速和低延迟下递送内容的严格要求。一种有前途的解决方案是缓存最频繁使用的内容在网络边缘。以分布式计算环境为特征，MEC服务可以在移动用户附近的MEC服务器上存储本地相关内容。如果所请求的内容在边缘服务器的存储中是容易获得的，则MEC服务器可以向用户提供来自其本地存储的内容，而无需向远程内容提供商附加请求。以这种方式，边缘缓存极大地减少了大容量传输的回程容量负担，从而减轻了网络拥塞。[58]. 此外，用户可以从内容缓存中受益，以减少下载时间和更少的功耗。

另一个演示MEC的功率的实际应用是边缘视频编排（EVO），它在一个小地理区域中产生并消耗大量用户的视觉数据，例如游戏和音乐事件。关注这种情况的移动用户通常期望可靠的连接来访问社交网络站点，揭示事件统计信息，查看实时视频，并与其他人共享重播。由于有限的回程能力和非常多的用户，对内容的高需求通常是不可行的。MEC可以连接用户以产生本地视频和MEC应用，其组合来自不同来源的多个视频，以改善整体视频体验，并使用EVO服务建立与用户的连接。EVO为用户提供了几乎实时地从不同角度选择定制视图的选项。从网络的角度来看，视频业务不会对回程网络施加任何压力，并且EVO服务的递送可以对用户进行，而不会对核心网络造成影响，因为EVO应用可以部署在MEC服务器上。

在同一MEC服务器上可以同时处理不同的应用，并且每个应用通常需要特定带宽资源，这不仅依赖于计算特性，例如输入大小和计算工作量，而且还依赖于无线环境的动态。此外，应用程序可以具有多个计算子任务，每个子任务都有自己的需求。如果带宽资源没有被有效分配，网络性能可能退化，从而负面影响用户满意度。在这种情况下，MEC可以收集不同MEC应用/子任务和无线网络信息所需的带宽资源，然后优化分配给每个应用/子任务的带宽资源量。以类似的方式，MEC可以利用实时信息来优化回程和无线网络中的资源。

## Ii-C研究进展

在这一节中，我们首先简要地概述ETSI ISG最近的标准化工作，并汇编了一些关于边缘计算的特殊问题的列表。此外，我们专注于一个典型的消费型服务，计算卸载，以及在MEC系统中的资源分配的典型使用情况。

### Ii-C1标准化工作

由于MEC提供的巨大潜力，学术界和工业界在实现下一代网络中的MEC方面已经进行了大量的研究工作。在初始化MEC概念之后，ETSI ISG多次尝试进一步规范和发展MEC。ETSI ISG的目的是创建一个标准化和开放的环境，这将允许跨多厂商MEC平台的供应商、服务提供商和第三方的应用程序的高效无缝集成。[41]. 价值链中的各个成员都在积极倡导基于行业共识的MEC规范的发展。在撰写本文时，有59名MEC成员和24名MEC参与者，不仅是移动运营商，还包括制造商、服务提供商和大学，例如DoCOMO、沃达丰、电信Italia、中国电信、PT葡萄牙SGPS SA、IBM、诺基亚、华为、英特尔、NTT公司和马德里大学。他们的参与是重要的，因为它可以确保MEC是一个开放的和互操作的环境，MEC有利于各种利益相关者，包括MNOs，应用程序开发人员，在顶级玩家，独立软件供应商，电信设备供应商，IT平台供应商，系统集成商，和技术提供商。在过去的三年中，ETSI ISG发布了一套标准和规范，重点放在MEC的服务场景上。[59] 框架和参考体系结构[61] MEC的技术要求[62] 无线网络信息应用编程接口（API）[63] 端到端移动性方面[64] 和在NFV环境中部署MEC[65]. 这些报告以不同的方式产生，因为每个报告都有各自的目的。例如，文件[62] 讨论了MEC典型用例及其技术效益，并规定了MEC的各种要求，从一般要求、通过服务和操作要求到安全性、法规性、查理要求。同时，报告[65] 定义了如何在NFV环境中启用MEC部署的参考体系结构，并进一步提供了一些关键问题的动机和解决方案。



<div><div><div>Baidu</div><div>翻译</div></div><div>英语 ▼</div><div>►</div><div>中文 ▼</div><div>显示原文</div></div>			
<div>提交建议与反馈 进入百度翻译</div>			
<div>能，作为使能器（即，功能使能器），用于支持5G网络中的MEC。这些推动者包括用户平面选择/再选择、本地路由和业务转回、会话和服务连续性、网络能力暴露、QoS和计费以及本地数据网络的支持，读者可以参考条款5.13。<a href="#">[六十四]</a>供他们详细解释。5G联网能力的出现将使大量新的应用和服务以及增加连接设备的数量，这强烈地促进了需要新的体系结构和技术来分发网络功能和需求。MEC利用网络的边缘使计算更接近终端用户，从而通过减少等待时间、降低能耗、增加数据速率来实现高效的服务交付。最近，3GPP已经发布了一个白皮书，标题为“5G网络中的MEC”，以实现技术规范3GPP TS 23.501在5G网络中集成MEC的功能使能器。本文还说明了一组具有代表性的3GPP生态系统的例子，该系统可以受益于MEC系统及其API，因为MEC可以提供一组互补的能力，以使网络边缘的应用和服务环境能够实现。<a href="#">[二十五]</a>。</div>			
主题	设计资源	参考	提出的框架
	本地执行	<a href="#">[十三]</a>	如果用户没有从卸载中获益，则其任务将在本地执行。 <a href="#">[四十四]</a> 。
	部分卸载	<a href="#">[十三]</a> , <a href="#">[六十五]</a> , <a href="#">[六十四]</a>	如果任务被分割成至少两个部分，则部分卸载是可能的。由于执行并行性，部分卸载特别适合于延迟关键应用程序。
	计算卸载		二进制卸载需要计算任务在本地或远程处理，这适合于简单且高度集成的应用。 <a href="#">[四十四]</a> 。然而，有太多的卸载可能是低效的，由于有限的远程计算能力，特别是在多服务器MEC网络中。
	二进制卸载	<a href="#">[四十四]</a> , <a href="#">[六十六]</a> , <a href="#">[六十七]</a>	
计算资源	计算速度	<a href="#">[六十八]</a> , <a href="#">[六十九]</a>	动态电压频率缩放技术被应用于通过调节CPU频率和/或电源电压来控制CPU性能。
	服务器计算资源	<a href="#">[二十三]</a> , <a href="#">[四十四]</a>	MEC服务器上的计算资源分配取决于几个因素，例如，任务特性（例如，数据大小、计算强度和完成期限）、服务器计算能力和网络设置（例如，卸载用户的数量、接入点和MEC服务器）。
	发射功率	<a href="#">[四十三]</a> , <a href="#">[四十四]</a>	每个MU可以调整发射功率以降低能量消耗和增加卸载速率，从而缩短上行链路传输时间。发射功率可以配置为考虑例如最大功率预算、延迟要求和（间和/或小区内）干扰。
无线资源	带宽	<a href="#">[十三]</a> , <a href="#">[六十六]</a>	系统带宽可分为正交子信道，其分配给用户以避免小区内干扰。然而，在多服务器MEC网络中可能存在小区内干扰（ICI），并且对性能实现产生不利影响。
	时间	<a href="#">[六十五]</a> , <a href="#">[六十六]</a>	卸载用户可以以时间的方式访问和共享MEC服务器 <a href="#">[六十五]</a> 。此外，在具有无线功率传输的MEC系统中，时间帧被分为不同的部分，用于I) 无线能量广播从MEC服务器卸载用户和II) 从用户到MEC服务器的任务卸载。 <a href="#">[六十六]</a> 。最优时间分配与卸载决策和任务特性高度耦合。
杰科拉	卸载决策与资源分配的联合优化	<a href="#">[四十三]</a> , <a href="#">[七十一]</a> , <a href="#">[四十五]</a> , <a href="#">[六十五]</a> , <a href="#">[六十六]</a>	随着MU的数量以前所未有的规模增长，计算卸载将是一个瓶颈。此外，受经济性和可伸缩性的启发，MEC服务器的计算资源是有限的，从而挑战了卸载用户的无线电和计算资源的最优共享。为了进一步提高网络性能，迫切需要联合优化卸载决策和资源分配。
表二：MEC中的卸载决策和资源分配研究综述。			

### Ii-C2边缘计算的几个特殊问题

为了满足MEC在未来5G网络中日益重要的地位，已经提出了大量的各种期刊的特殊问题，以集中在MEC研究的不同方面，从一般到特定的研究主题。一些特殊问题的列表如下所示。

- 移动互联网边缘计算中的先进计算技术——IEEE物联网期刊[\[七十一\]](#)。
- IOTS的新兴计算卸载：体系结构、技术和应用 [\[七十一\]](#)。
- 物联网IEEE网络的边缘计算 [\[七十三\]](#)。
- 物联网边缘计算的特殊问题——ELSVER系统体系结构杂志 [\[七十四\]](#)。
- 自主驱动的移动边缘计算特别问题，ELSVER系统体系结构杂志 [\[七十五\]](#)。
- 边缘计算的安全和隐私问题：当前的进展和未来的挑战，爱思唯尔计算机和安全 [\[七十六\]](#)。
- 光纤和移动边缘计算、印度无线通信和移动计算 [\[七十七\]](#)。
- 雾网络特别问题，通信与网络杂志 [\[七十八\]](#)。
- 光纤和移动边缘计算的最新进展，威利新兴电信和技术 [\[七十九\]](#)。
- 光纤和移动边缘计算的安全和隐私计算智能模型IEEE接入的最新进展 [\[八十\]](#)。

然而，MEC仍处于起步阶段，因为现有的工作已经忽略了在实际系统中成功部署MEC所需的许多关键因素，MEC完成规范和5G最终标准化尚未发布。作者强烈认为，需要更多的额外研究工作来解决MEC的挑战，未来将开启更多的特殊问题。

### II- C3计算卸载与资源分配综述

从用户的角度来看，计算卸载是MEC的关键用例，因为它使移动用户能够运行新的计算密集型和/或延迟敏感的应用程序，同时延长其使用寿命和改进其经验。关于计算卸载，一个关键的部件是决定是否卸载任务。基本上，卸载计算任务的决策可分为三个模型：*本地执行*，*二进制卸载*和*部分卸载*。当UE与MEC服务器有坏连接时，不存在任何可用的MEC服务器，或者用户不从计算卸载过程中受益，用户在本地处理所有的计算功能。否则，用户将它们的计算卸载到MEC服务器进行远程执行。在二进制卸载（即完全卸载）中，不能被分割成子任务的集成任务必须在本地执行，或者在MEC服务器上远程执行。同时，在部分可卸载卸载中，任务可以任意划分为至少两个子任务，其中一些可以在本地处理，而其他任务可以在MEC服务器上执行，考虑到各种因素，例如计算特性、用户和服务器计算能力、资源可用性和回程连接质量。[\[四十四\]](#)。计算卸载的另外两个重要方面是应用模型的确定和实践中卸载过程的管理。[\[十三\]](#)。前者指的是应用程序的可卸载性，确定处理数据的量，并指定可卸载部件之间的依赖性，而后者意味着用户如何确定应该卸载什么，检查外部因素，例如信道连接、系统带宽和在MEC服务器上可用的计算资源，并做出卸载决策。在多个用户的存在下，MEC服务器必须能够同时执行多个计算任务，并且稀缺的无线资源需要在多个用户之间共享。与资源丰富的云相反，MEC服务器通常具有有限的资源。因此，联合决策和资源分配的联合优化被认为是MEC系统中提高客户导向服务的网络性能的最重要的问题之一。[\[三\]](#)。

之间的折衷。实际上，目标可以从全系统级设计，例如最小化总执行等待时间，以达到用户感知的性能，例如个人能耗和收入的最小值。此外，目标应考虑目标应用的不同要求。例如，在应用IOT应用时，由于MEC在IOT设备上受到限制，因此应该研究计算和传输能耗之间的折衷。[\[3+3\]](#). 为了实现MEC这样的目标，资源（通信、计算和存储）分配起着重要的作用。有各种类型的资源，例如，用户的计算速度、MEC服务器上的计算资源、用户的发送功率、以及分配给用户的带宽和时间。显然，如果资源被有效地分配和使用，越来越多的用户可以从计算卸载中获益，从而提高了网络性能。事实上，卸载决策和资源分配是紧密耦合的，并共同影响所获得的性能。以两任务MEC设置为例，将第一等待时间敏感任务卸载到MEC服务器，并且需要服务器计算能力的很大一部分，这反过来影响分配给剩余任务的剩余计算资源。因此，第二个任务不受益于远程处理。在这种情况下，一种可能的解决方案是远程完成第一任务和第二任务的一部分。在表中[二](#)总结了MEC在卸载决策和资源分配方面的研究现状。对MEC系统的计算卸载、资源分配和其他方面的深入调查可以参考。[\[1+3, 3, 11+1\]](#).

## 三非正交多址MEC

### III- A 诺玛原理

5G网络及其他领域的前沿研究课题包括多址接入、随机接入和波形技术。在以前的网络世代中已经应用了各种无线接入技术，例如，用于1G网络的频分多址（FDMA）、用于2G网络的时分多址（TDMA）、用于3G网络的码分多址（CDMA）和用于4G网络的正交频分多址（OFDMA）。所有这些多址技术共享一些相似性，其中每个用户被服务并分配给一个专门分配的资源，并且用户对其分配的资源

的访问不受另一个资源的干扰。然而，这些方案（也称为正交多址接入（OMA））将支持用户的数量限制为可用的正交资源的数目。为了支持大量的连接设备，满足5G网络中的延迟和频谱效率的不同要求，移动网络的设计理念已经从正交到非正交访问[\[1+2\]](#).

优势	缺点
-更简单的接收器检测	-较低的频谱效率
瘤	有限的用户数
	-用户不公平
-更高的频谱效率	-增加了接收机的复杂性。
诺	-对信道不确定性有较高的敏感性。
玛	-增强的用户公平性
	-较低的潜伏期
	支持多样化的QoS

表III：OMA与NOMA的比较

非正交多址接入（NoMA）已被认为是新兴5G网络中无线接入技术设计的一个基本原则。[\[1+3\]](#)NOMA的关键思想是在BS侧使用叠加编码技术和用户侧的干扰消除技术（例如多用户检测和连续干扰消除）。与传统的OMA相比，一组用户可以共享相同的时频资源。NOMA解决方案有很多种，但是NOMA可以分为两种主要的方法：功率域NMA和码域No.Poice域NMA利用功率域中用户和多路复用器之间的信道增益差异，而代码域NOMA使用用户特定的序列来共享整个可用的无线电资源。[\[1+2\]](#)典型的基于码域的接入策略是低密度扩频CDMA、基于低密度扩频的OFDMA、稀疏码多址接入、多用户共享接入、以及可连续多址接入的干扰消除。还研究了一些其他的NMA方案，例如，模式划分多址接入。[\[1+4\]](#)空分多址[\[1+5\]](#)比特多路复用[\[1+6\]](#)和角度分割多址[\[1+7\]](#)NOMA有可能容纳更多的用户，而不是可用的副载波的数量，这导致了各种各样的潜力，包括大量的连通性、更低的延迟、更高的频谱效率和宽松的信道反馈。[\[1+1\]](#)首先，由于NMA在理论上可以在可用资源中为多个用户服务，因此NOMA适合于需要大量连接（例如，IOT应用）的应用。虽然实际的执行问题（例如，计算复杂度和硬件限制）产生了支持大规模连接的挑战，但NOMA具有增加同时用户数量的能力。第二，OMA用户更难以保证其延迟要求，因为它们必须等到资源块可用以发送和/或接收数据。相比之下，NOMA可以支持灵活的调度和授权免费传输，从而可以同时服务更多的用户，从而减少等待等待时间。第三，NMA在频谱效率和用户公平方面优于OMA。由于NOMA用户可以利用所有信道，而OMA用户只能享受整个频谱的一小部分，因此实现了更好的性能。[\[1+9, 9+1\]](#). 最后，仅需要接收的信号强度，而不是精确的信道状态信息（CSI），而准确的CSI仅用于功率域NMA中的功率分配，因此NAMA中的信道反馈的要求是宽松的。[\[1+1\]](#). OMA与NOMA的比较综述[三](#)[\[1+2\]](#).

虽然NOMA能够同时支持大量用户，并且在多个方面超过OMA，但是在该技术可以应用于真实网络之前，必须解决与NOMA相关的各种具有挑战性的问题。伊斯兰教等进入[\[1+1\]](#)戴等进入[\[1+3\]](#)为NOMA在其调查中提供了一些研究指导：动态用户配对、传输失真、信道和干扰估计、资源分配、MIMO辅助NMA扩展、NHMA与HETNET、中断概率分析、均匀公平性、NMA天线选择、载波聚合、无授权NMA、解码复杂度和接收机设计等。为了更深入地了解NOMA提供的好处和机会以及它的挑战和应用场景，推荐感兴趣的读者参考NOMA研究工作，例如，[\[1+1, 9+3, 11+9, 11+3, 9+4, 11+2\]](#).

### III—BNOMA与MEC结合的动力

NMA和MEC由于其巨大的潜力和广泛的应用，被认为是5G网络中的关键使能技术。虽然NMA和MEC的基本原理和关键驱动力有所不同，但它们有几个相似之处。

- MEC和NOMA都通过提供黄金机会来提高用户满意度和网络性能，而NMA在提高频谱效率和小区边缘吞吐量、放宽信道反馈要求、减少传输延迟等方面提供了若干优点，MEC不仅对用户，而且对运营商和第三方都带来了可观的好处，并且能够提高整体网络性能。预计5G将支持设备连接的大量增加，1至10 Gbps的高速传输，并且大大减少了延迟和高可靠性。NMA和MEC提供的利益和机会将极大地提高5G网络的性能。
- MEC和NOMA加强了5G网络支持的服务和应用。一方面，NOMA不严格限制同时用户的数量与可用的正交资源的数量，因此NOMA预期会极大地增加用户在排名不足的各种情况下的用户数量。[\[1+3\]](#). 然而，NOMA的前期工作主要集中在利用有限的通信资源来扩大网络能力。另一方面，MEC中的边缘计算表明，计算资源被提供给接近和RAN边缘的最终用户。因此，MEC能够将计算资源从集中式云广泛分布到网络边缘并立即服务于大量用户，因此MEC具有支持大规模连通性和分布式计算的潜力。
- 5G网络将不完全依赖于单一技术，我们必须从多个角度优化网络，例如空中接口、网络体系结构和使能技术。为了应对低延迟的需求，MEC和NMA是两个有前途的解决方案。MEC将云服务和功能移动到网络边缘，其中数据主要是生成和处理的。因此，相比于云计算，MEC授权边缘处运行的服务以更好地满足终端用户较低的延迟要求。在类似的意义上，NMA中的灵活调度和免授权访问使得5G网络中的用户的传输延迟更低。因此，MEC和NOMA对于低延迟场景是可行的解决方案。

MEC和NOMA有很多好处，包括但不限于，增加连接用户的数量和缩短传输延迟。此外，NOMA和MEC的使用可以减少终端用户的能耗，并减少回程和核心网络上的压力。



究还没有在MCEC的背景下探索NMA的全部潜在利益。NOMA和MEC都被认为是填补IOT设备和物联网应用和服务之间的差距的一个方面。一方面，MEC通过计算卸载使资源受限的IOT设备具有显著的附加计算能力，从而为IOT设备带来新的应用和服务。类似地，随着物联网，MEC服务和应用的范围不仅适用于移动电话，而且适用于从传感器和执行器到智能车辆的各种各样的智能对象。另一方面，NOMA能够大大提高系统能力，因为它使得多个用户能够使用专用的正交信道资源进行传输。此外，由于NMA在OMA上的好处，与传统的基于OMA的MEC方法相比，人们可以利用NOMA来进一步改善IOT网络中MEC的使用。我们以两个用户为例进行说明，其中用户1需要以低要求的数据速率向基站发送紧急小数据包，但是在严格的短时间段内，用户2需要将计算重的但延迟容忍的任务移到MEC服务器进行远程处理。基本上，基于OMA的方法为两个正交信道资源服务这些用户，这可能导致低资源分配效率和大量连接情况下的资源匮乏。现在，我们假设用户2具有计算重和等待时间敏感的任务，并且只有两个正交的无线信道。在这种情况下，一种可能的解决方案是使用用户1的整个分组的第一信道和用户2的工作量的一部分，同时使用用户2的剩余数据的第二信道。

显然，NOMA可以被利用来提高多用户MEC系统的效率和性能。在下文中，我们提出了一个概述的研究工作，探索NMA和MEC的组合，然后讨论基本的挑战和开放的方向。

### III—C 目前技术水平

虽然NOMA或MEC的使用情况在文献中已被广泛研究，但对MEC-NMA方案仅有很少的研究。NOMA和MEC的优势推动了支持NMA应用于MEC的若干研究。[\[915\]](#), [\[916\]](#), [\[917\]](#), [\[918\]](#), [\[919\]](#) 当将NMA上行链路传输应用到MEC系统时，多个用户可以通过相同的频段同时将它们的任务卸载到MEC服务器。通过在MEC服务器上应用SiC技术，MEC服务器可以去除在同一频带上之前已解码数据的用户的干扰。当将NMA下行链路传输应用于MEC系统时，一个用户可以利用NMA通过同一频段同时将多个任务卸载到多个MEC服务器，并进行了NoMA-MEC和OMA-MEC系统的性能比较。[\[915\]](#) 这表明NOMA-MEC系统可以在降低延迟和能量消耗方面获得优异的性能。

现有的研究主要集中在资源分配方面，即计算资源和通信资源。具体地说，在[\[916\]](#)针对多用户NoMA-MEC系统的能量消耗的加权和，研究了部分卸载分配（即，每个用户可以将计算任务划分为本地计算和卸载两个部分）和功率分配，提出了一种有效的用户任务划分、局部计算CPU频率和发射功率分配的算法，以实现多用户NoMA-MEC网络的最小能耗。不同于OMA-MEC和纯NOMA-MEC系统（即，用户同时卸载其所有任务）[\[916\]](#), [\[915\]](#)提出了一种混合NOMA策略（即，用户可以首先在分配给其他用户的时隙内卸载其任务的部分，然后在仅由自身占用的时隙中卸载其剩余任务）。[\[917\]](#). 在这项工作中，功率分配和时间分配被优化以最小化MEC使能的NMA系统的能量消耗。随后，研究了混合NoMA-MEC系统的时延最小化问题。[\[918\]](#)将Dinkelbach方法和牛顿方法进行比较，结果表明两种算法收敛到同一个最优点，而NeNWON方法收敛速度快于Dinkelbach方法。与部分任务不同，作者[\[919\]](#)考虑卸载任务是独立的和不分离的。然后，对通信资源（即频带和发射功率）和计算资源（即计算资源块）进行联合优化，以最小化NOMA-MEC系统的能量消耗。[\[919\]](#)提出了一种有效的用户聚类 and 频率和资源块分配的启发式算法，以解决每个NOMA集群的能耗最小化问题。

### III- D 教训和潜在的作品

由于MCE-NOMA方案共存的有限研究，有许多关键的公开问题必须研究。NOMA和MEC的潜在工作可以从以下四个方面进行：**1。**联合资源优化；**2。**NoMA-MEC的用户分组；**3。**安全通信；**4。**合作NOMA MEC。

- **联合资源优化**一般来说，传播、计算和通信会对移动服务造成不同的延迟。传播延迟取决于从用户到MEC服务器的距离。较长的距离可能导致较差的信道传输条件。因此，调度器可能需要决定用户可以卸载到MEC服务器的计算负载，并且剩余的可以在本地计算以最小化延迟。此外，计算能力（即MEC服务器或移动设备的处理速度）和通信资源（即发射功率）也是减少计算延迟的重要因素。这些因素的联合优化提出了一个开放的研究问题。当将NMA上行链路传输应用到MEC系统时，多个用户可以同时将它们的任务卸载到MEC服务器。因此，可以调查由多个用户所经历的总延迟。通过控制每个用户的卸载计算负载和发射功率，可以考虑到总能量消耗，开发最优和次优策略，以最小化系统的总延迟。所提出的解决方案可以扩展到NMA下行链路MEC系统。
- **NOMA MEC的用户分组**在NMA系统中，多个用户可以在同一无线资源上同时发送信号。必须控制共享相同资源的用户数量，以限制接收机的解码复杂度。通常我们设置的用户数不大于三。对于多个用户想要卸载其在NMA系统中的计算任务的设置，必须考虑用户分组以最小化等待时间和能量消耗。匹配理论[\[100\]](#)或者可以利用博弈论将用户分组到不同的组中，使用不同的子信道来卸载他们的任务。
- **安全通信**安全和隐私保护通信吸引了大量的研究关注，特别是当NOMA应用于MEC系统时。例如，两个用户通过使用NOMA原理同时向MEC服务器卸载任务。当执行SIC时，一个用户可以解码另一个用户的信息。在此期间，窃听者或攻击者可以尝试解码移动用户的信息。为了解决外部窃听者的情况，可以利用物理层安全（PLS）来应对NoMA-MEC系统的这种挑战。[\[100\]](#), [\[101\]](#). PLS与NOMA-MEC的结合是一个很有前途的研究课题。
- **合作NOMA-MEC系统**为了提高NoMA-MEC网络的连通性，可以采用协作MEC使计算卸载到主MEC服务器。在这种情况下，移动设备将叠加的信号发送给主MEC服务器和辅助MEC服务器，其充当中继帮助MEC服务器。[\[102\]](#), [\[103\]](#). 考虑到移动用户的本地计算能力和能耗约束，可以优化任务分配和发射功率分配，以提高NOMA MEC系统的性能。
- **NOMA-MEC系统的信道估计**SiC技术的性能对信道状态信息敏感，其中差的估计CSI会导致SiC技术的解码次序模糊。解决这一问题的一个可能方向是依靠部分CSI。研究了部分CSI在下行链路NMA系统中的应用。[\[104\]](#), [\[105\]](#), [\[106\]](#), [\[107\]](#).

## IV 具有能量收集和无线功率传输的MEC

### IV-A 能量收集与无线功率传输基础

能量收集（EH，也称为能量清除）是一种有前途的技术，其目的是捕获来自不同来源的可用能量，以对能量受限的通信节点（例如，移动用户、雾服务器和基站）供电。因此，可以延长通信节点的使用寿命，提高通信节点的性能。[\[108\]](#), [\[109\]](#), [\[110\]](#), [\[111\]](#), [\[112\]](#), [\[113\]](#). 能量收集在概念上是简单的，但在实施过程中更复杂，这在很大程度上取决于能量收集电源的类型。EH技术可以根据能源的特性来分类，如Fig所示的自然或人为制造。[7](#)[\[109\]](#)具体而言，可收获能源可分为两大类：（i）自然能源：来自自然环境的能量来源，例如太阳能、热能、风能和水力流能，以及（ii）人造功率：从人体的主动和被动身体运动、机械系统和RF信号中获取能量。[\[114\]](#)一般来说，有两种不同的EH结构：（i）收获利用：能量及时地被收获使用，和（ii）收获存储用途：能量被收集，只要可能，存储在电池中以备将来使用。[\[115\]](#), [\[109\]](#)在基于EH的通信网络中的节点可以执行不同的任务，例如感测/监听任务、收发器任务、数据处理、一些特定任务。

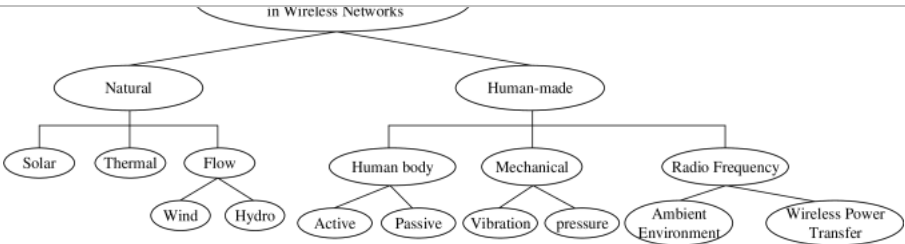


图7：无线网络中可收获能源的分类

对于每种特定类型的能源，可以采用相应的技术将能量转化为电能。[\[101, 101, 102\]](#)特别是太阳能电池可用于太阳能的太阳能发电。[\[106\]](#)利用压电、静电和电磁转换技术，将机械运动中的某些运动或机械变形的能量转化为电能。[\[107\]](#)该热电发电系统用于从废热中获取电力，例如地热、工业发动机排气、阳光和人体。[\[108\]](#)流体-风能和流动功率的动能可以通过两种方法获得，即机械涡轮系统。[\[109\]](#)对于机械源，例如利用压电、静电或电磁原理，非机械式的技术。对于RF信号，所接收的RF能量可以被转换成稳定的直流（DC）能量源。此外，能量源可以是可控的或不可控制的。可控的源，只要需要，就可以收集能量，而非可控源的能量在任何时候都可以简单地清除。例如，人体的被动身体运动，例如血压、体温和呼吸，可以由用户控制。[\[109\]](#)而人体的其他活动，如手指运动、跑步和行走，都是在使用者的控制下，在非可控类中，能量源是可预测的或不可预测的。

与传统的天然能源相比，RF信号受天气或其他外部环境条件的影响较小。因此，这些信号可以被有效地控制和设计，因此基于RF的EH对于向包括WSNs、IoT的低功率能量受限网络提供稳定的能量具有很大潜力。[\[20\]](#)RF EHN可用于室内、敌对和恶劣环境，例如建筑物内或人体内的传感器、有毒环境等。[\[20\]](#)一般而言，无线能源可分为两类：（i）环境源（WiFi、蜂窝、AM、FM...），它们可以是可预测的或不可预测的，并且需要一种智能的过程来监测通信频段和用于收获机会的时间周期；（ii）专用源：可以部署专用RF源来提供能量供应，以满足无线网络中移动/边缘节点的要求。

基于RF的具有专用源的EH可以被认为是尼古拉Tesla 1899首次提出的无线功率传输（WPT）。[\[14\]](#)工业界和学术界都在不断地进行研究。—  $\mu W$ 在3M的发射功率和915兆赫的载波频率范围内超过11米[\[20\]](#)现有的WPT技术可分为三类：电感耦合、磁共振耦合和基于RF的WPT。前两种技术依赖于近场电磁波，由于有限的无线充电距离（几米）和所需的电磁场与能量收集电路的对准，近场电磁波不支持能量受限的无线通信设备的移动性。[\[22\]](#).相比之下，基于射频的WPT利用了电磁波在远距离（数百米）上的远场特性，而且，当RF信号在传递能量时也携带信息，提出并研究了同时无线通信和功率转移（SWIPT）的概念。[\[23, 24\]](#)从信息理论的角度来看，在实践中，能量收集过程可能影响信号中的调制信息（例如，相位嵌入信息）。[\[22\]](#)一种实用的解决方案是将接收到的RF功率分成两个不同的部分，一个用于能量收集，另一个用于通过实现时间切换来进行信息解码。[\[25\]](#)或权力分裂[\[26\]](#).

EH和WPT可以为WSNs和物联网系统带来好处，但他们也提出了一些技术挑战如下。

- 设计EH系统面临几个挑战，例如选择合适类型的能量采集器和能量存储，以及提供最佳效率的良好占空比。
- EH系统设计中的主要挑战之一是产生的功率的不可预测性和不确定性。一般来说，可用功率的水平是低的、可变的和不可预测的。
- 在使用能量收集时，必须考虑发电和电力消耗之间的平衡。为此，必须充分理解发电元件的发电环境、发电功率、所需时间、设备功耗和消耗时间。
- 覆盖区域、通信距离、要建立的网路类型、传输数据量和底层应用细节是考虑的重要设计因素。
- 在WPT系统中，由于能量收集过程可能会影响调制信息，因此应充分解决EH和数据传输的联合资源分配，以提高网络性能。

对这些挑战的深入理解需要设计一个高效的无线网络，它必须考虑不同的因素，如发电机、传感器、储能、电源管理方法和应用要求。为了更好地理解EH和WPT技术所带来的好处和机会，以及它们的挑战和潜在的应用场景，有兴趣的读者推荐参考EH和WPT调查，如[\[10, 10, 27, 28, 29, 30\]](#).

## IV-B 动力

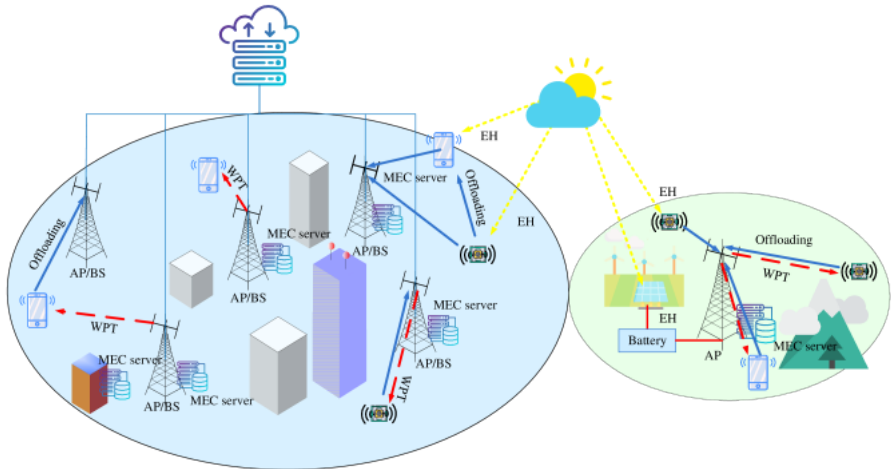


图8：EH/WPT使MEC接入网络成为可能。

虽然EH和WPT技术已经研究和研究了近一个世纪，MEC已被考虑和建议ETSI自2014。两者都被认为是未来无线系统的有前途的技术，它们是自供电的、持久的、几乎无需维护的。虽然EH和MEC的基本原理和关键驱动器是不同的，但它们是相似的，它们都是为了提高移动/边缘器件的能量效率，延长电池寿命而开发的。虽然在无线接入网络内启用MEC使云计算能力得以实现，以将移动设备从繁重的计算工作量中解放出来并更有效地利用它们的极限功率，但是EH技术允许移动设备将能量转换成各种形式的电力以用于电池再充电。一个简单的EH使能MEC系统在Fig.中得到了说明[8](#)其中EH和WPT在MEC服务器和移动设备中使用。将EH和MEC集成到单个系统中可以通过利用两种基础技术的优点来显著提高网络性能。EH、WPT和MEC技术将带来以下好处：

- 采用电池供电设备的MEC系统所采用的智能计算卸载策略不能充分利用可再生能源。EH和WPT技术可以为移动设备或MEC服务器供电，从而大大提高了这些设备的计算负载性能。[\[31, 32\]](#).除了被移动设备采用，EH技术还可以通过利用绿色能源（例如太阳能和/或风能）来为MEC服务器供电，特别是当MEC服务器部署在电网的覆盖范围之外，例如位置、可靠性、碳足迹、天气或灾难和成本等原因。
- 人们可以使用MEC服务器来学习由EH使能的无线网络所利用的能源的时变特性。在此基础上，可以实现具有均衡发电和功率消耗的智能采伐计划，以优化网络性能。[\[33\]](#).
- 可以部署MEC服务器来支持EH使能无线网络中的移动/传感器节点集群。在节点级，MEC可以帮助每个EH设备减少处理时间，并通过将大量工作负载卸载到FAX服务器来保留更多的时间来获取能量。[\[27, 34\]](#).在网络层，MEC可以允许部署一个集中的EH策略来调整所有设备的功能，以更好地利用可收获能源并提高网络性能。[\[109\]](#).





重连接，并且期望长时间地以目给目足的方式运行。大量的连接设备及其低功耗操作需要先进的无线接入网络，例如密集接入点或多跳数据传输。MEC系统可以在这个场景中起到相应的作用，以管理各个节点在同步、可靠性、利用信道资源和能量的效率方面的功能，利用可用的可收获能源，与其他人合作用于WPT、数据传输和卸载。在物联网基础设施中成功地大规模部署设备的另一个挑战是将其对人体和环境的影响减至最小。[一百一十三]. 在密集用户网络中，在不同频带上实现各种EH技术、对应于不同类型的能量、WPT和SWIPT的多个设备的存在还需要新的高效和可扩展的卸载和资源分配设计。

## V无人机通信中的MEC

### 伏安无人机基本原理

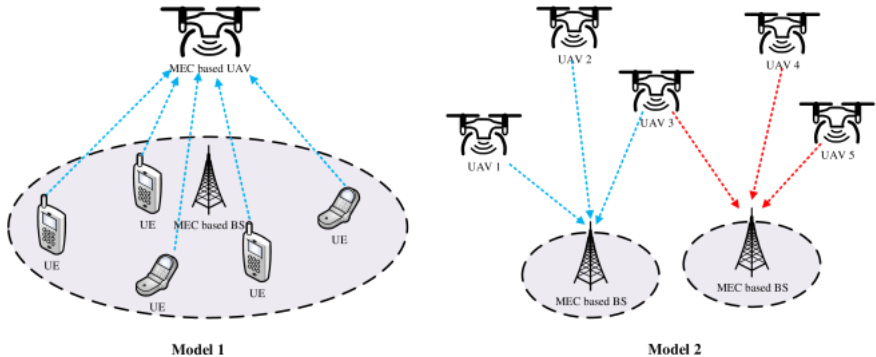


图9：MEC使无人机网络体系结构。

从历史上看，无人机已经被认为是包括军事、监视和监视、电信、运送医疗用品和救援行动在内的各种应用的推动者，因为它们的自治性、灵活性和广泛的覆盖范围。[一百五十一, 一百五十二]. 然而，在这些应用中，无人机主要侧重于导航、控制和自主性。因此，无人机的通信挑战通常被忽略或被认为是控制和自治组件的一部分。[一百五十三]. 无人机通常被称为无人机或远程驾驶飞行器，由于其高移动性、灵活性、自适应高度和低成本，在无线通信系统中具有几个关键的潜在应用。[一百五十四]. 特别是小型无人机由于其持续的成本降低和设备小型化而更容易被公众访问，因此小型无人机可用于天气监测、森林火灾探测、交通管制、紧急搜救、货物运输等。近年来，无人机无线通信系统由于缺乏基础设施覆盖的成本效益高的无线连接而备受关注，这是由于城市或山区地形严重遮蔽或对自然灾害造成的通信基础设施造成的损害。[一百五十五]. 无人机在无线通信系统中的应用主要有两个重要角色：**1**。航空基站，**2**。飞行移动终端。在第一种情况下，当无人机用作空中基站时，它可以在紧急和公共安全情况下提供额外的容量和网络覆盖，以提高无线网络的覆盖范围、容量、可靠性和能量效率。在第二种情况下，无人机可以作为蜂窝网络内的飞行移动终端来提供实时视频流。

对于无人机分类，需要考虑几个因素，例如Outlook和应用目标。不同类型的无人机依赖于它们的功能和能力。根据其前景特点，无人机可分为固定翼无人机和旋转翼无人机两大类。每种类型都有自己的长处和短处。具体地说，固定翼无人机（如小型飞行器）通常具有高速和沉重的有效载荷，但它们必须保持连续的向前运动以保持高度，因此不适用于诸如关闭检查之类的固定应用。相比之下，无人机和四翼无人机等旋转翼无人机在具有有限的机动性和有效载荷的情况下，能够在任意方向上移动，并在给定区域保持静止。因此，无人机的选择关键在于应用。根据各种无人机的应用和目标，可以定义一种替代的无人机分类，以满足各种QoS要求、环境的性质和联邦法规。为了正确区分UVSS的应用和使用，可以考虑无人机的飞行高度和能力。飞行高度通常用于无人机分类：高空平台（HAP）和低空平台（LAPS）。HAPS，例如气球，通常在距地球表面17公里的平流层中运行。通常，由于高空飞行高度，大面积的可靠的宽范围无线覆盖可以由HAU-UAVS提供。[一百五十四]相反，在不超过几公里的高度飞行，LAPS有几个重要的优点：快速运动和与LAPS相比更具灵活性。LAPS的一个应用是从地面传感器收集数据。与HAPS相比，LAPS具有较长的飞行耐力（例如，长达几个月），LAPS成本低，并且在飞行时间内可以容易地充电或更换，在无线通信系统中，无人机的应用情况可以归纳为：**1**。无人机辅助无处不在的覆盖；**2**。无人机辅助中继；**3**。无人机辅助信息发布与数据采集[一百五十四]. 无人机在无线通信中的应用可以描述如下：

- 成本有效、快速、灵活和高效的部署：**无人机可以提供成本有效的无线通信，并且可以更灵活地部署用于意外或有限的持续时间任务。其中一个主要的应用是无人机可以用作空中基站。众所周知，建造一个传统的地面基站，包括昂贵的塔楼和基础设施的部署，是非常昂贵的。一般来说，无人机辅助基站可以提供低成本的天空通信，因为无人机不需要高度受限和昂贵的基础设施。因此，无人机辅助基站可以在传统网络的互补网络中服务。例如，有时地面基站受到自然灾害的破坏或破坏，例如洪水、地震、飓风和严重的暴风雪等。无人机辅助基站为建立一个健壮、快速、有能力的应急通信系统提供搜索和救援行动的重要手段。
- 视线（LoS）链路：**与传统的地面基站相比，无人机辅助飞行基站能够提供即时通信和建立。**视线（LoS）**与地面用户的通信连接。特别是在低空无人机中，通常可以建立LOS通信链路，从而显著提高了网络的性能。**LOS**通信可以促进可靠的高频通信（例如，MMWAVE）。结合其他5G技术，例如毫米波通信、MIMO、无人机辅助基站可以建立LOS通信链路，以实现高容量。例如，通过利用无人机和毫米波链路的优点，配备有毫米波能力的无人机可以建立与地面用户的LoS连接，从而在高频工作时显著降低传播损耗。此外，将无人机与MIMO技术相结合，可以在无人机到地面通信蜂窝网络中创建毫米波LOS信道。
- 覆盖和容量增强：**在下行链路场景中，UAV辅助飞行基站由于无人机的可操作性，可以快速地将UAV重新配置到地面用户链路，从而提供一个大的覆盖网络。与传统的地面基站相比，无人机可以容易地和动态地调整它们的移动方向和位置，以向服务覆盖区域内的分布式移动用户或设备传播或传递延迟容忍信息。在上行场景中，无人机辅助飞行基站还可以在覆盖范围内从分布式无线设备中收集延迟容忍信息。由于无人机经历了良好的信道，例如LoS链路，它们可以提供更高的发射数据速率。此外，为了提高无人机辅助无线通信的容量性能，可以联合进行机动和自适应通信。一般来说，无人机辅助基站通常经历良好的信道，例如LoS链路。因此，它可以向地面用户传输高数据速率。此外，无人机的速度可以手动调节，以支持与地面终端的增强连接。大覆盖和容量改善的好处使得无人机辅助无线通信成为了5G无线系统的一个有前途的组成部分。
- 紧急情况 and 救灾本地化、搜索和救援的补充网络：**与传统的网络场景（例如，4G长期演进（LTE）和WiFi）相比，无人机辅助无线通信网络可以在紧急情况下向现有网络提供补充网络。例如，当地面基站过载时，无人机可以作为超密集网络的热点。当地面基站被自然灾害（例如，地震、洪水、严重飓风和雪灾）损坏甚至完全摧毁时，无人机辅助的无线网络能够提供有效的通信并有助于拯救生命。

### V-BMEC与无人机结合的动因



信。[\[155\]、\[156\]](#)。一方面，无人机可以作为空中基站。[\[157\]](#)。在这种情况下，为了提高计算能力，无人机可以配备MEC服务器。因此，启用MEC的无人机服务器为地面移动用户提供了卸载繁重计算任务的机会。在计算之后，移动用户可以通过可靠、有成本效益的无线通信链路来下载基于无人机的MEC服务器的计算结果。[\[159\]、\[160\]](#) UAV可以是蜂窝网络的新空中移动用户，如图2的模式所示。[\[9\]](#)。在这种情况下，*细胞连接*无人机能够为无人机提供无缝可靠的无线通信。一般来说，由于小型化、重量轻、资源有限，无人机的计算能力有限，尤其是当无人机需要计算一些等待时间敏感和计算密集的任务时。为了提高无人机辅助无线通信系统的计算性能，可以采用MEC来解决这一问题。在这种情况下，无人机可以将其计算任务卸载到配备MEC服务器的地面基站。UAV UE在空中交付应用中起着关键作用，如Amazon引物空气和监视应用和虚拟现实应用。[\[161\]](#)。MEC具有强大的计算能力，可以与无人机支持的无线通信系统互补，由于无人机的资源、尺寸、重量和功率的限制，无人机与MEC技术的结合将带来以下好处：

- *基于无人机的MEC服务器*在这种情况下，无人机可以被用作移动云计算系统，其中基于无人机的MEC服务器可以为地面移动用户提供卸载机会。由于其灵活性和移动性，无人机可以接收卸载任务，尤其是当地面MEC服务器不可用时。例如，当紧急救援或灾难发生时，具有有限处理能力的移动设备可以受益于移动无人机辅助MEC服务器来帮助执行任务，例如，分析受害者、敌人和危险地形的状态的评估。[\[158\]](#)。由于LoS与无人机和地面移动用户之间的连接，可以大大提高卸载能力和下载能力。此外，基于无人机的MEC通信系统可以提高覆盖范围。
- *UAV-UE MEC系统*不同于传统用户通过复杂衰落信道与固定地面BS（GBS）相关联的传统场景，UAV-UE MEC系统使得高移动性UAV UE能够通过更可靠的LOS链路同时将其计算任务卸载到大量优化的GBSS。这种情况有两个优点。一方面，无人机的轨迹可以与资源分配（卸载任务调度）共同设计，因为它在3D空域中具有可控的移动性。另一方面，无人机可以通过LoS链路同时与一组GBSS相关联，利用其分布式计算资源来提高计算能力。

尽管UAV和MEC的组合带来了良好的效益，但在MEC使无人机系统中也存在若干技术挑战。UAV-BS场景中的主要挑战是无人机的最优3D部署、飞行时间优化和轨迹优化，以实现无线网络的不同目标，例如吞吐量最大化和低延迟控制。此外，切换管理、信道建模、3D定位和干扰管理是UAV-UE场景中的主要挑战。MEC系统还面临通信资源分配、计算资源分配、时延最小化和安全问题等挑战。因此，将无人机与MEC系统结合起来可能面临以下挑战：

- *移动性控制与轨迹优化*由于无人机飞行时间有限，无人机MEC系统的最优路径规划。对于基于无人机的MEC服务器，必须优化位置和飞行路径，以提供移动设备的卸载机会。与UAV-UE场景类似，必须优化位置和飞行路径，以将计算任务卸载到GBSs组，以提供与其他无人机的无缝通信。在这两种情况下，移动性控制对网络的质量有重大影响。优化无人机航迹是一个连续优化问题，具有挑战性。在本设计中，必须考虑信道变化和能量消耗和最大飞行速度。此外，与其他优化因素，如QoS度量，轨迹优化是具有挑战性的解决。
- *通信与计算资源优化*在无人机的MEC服务器通信系统中，无人机可以作为配备MEC服务器的飞行基站。通信资源（即，卸载功率）和计算资源（即，任务卸载因子）需要联合优化考虑不同的目标，例如，继电器最小化和能量消耗最小化。在UAV-UE MEC系统中，无人机作为高移动性中继用户，将其计算密集型任务卸载到基于MEC服务器的GBSS用于远程执行。在这种情况下，无人机的轨迹可以通过通信和计算资源分配共同优化，这是固定用户和基站情况下更具挑战性的。

## V-C 目前技术水平

在通信系统中，无人机与MEC结合有两种方案。在第一种情况下，无人机正在充当配备有MEC服务器的飞行基站，并为地面上的用户提供卸载机会。[\[158\]](#)。这种情况在实践中很常见。例如，移动MEC使无人机在灾难响应和应急场景中起着重要的作用，其中地面基站（GBS）由于突发性灾害的破坏而不能提供任何服务，例如地震。具有有限处理能力的移动设备可以受益于基于无人机的MEC服务器。基于无人机的MEC服务器场景[\[158\]](#)TAUAV作为移动MEC服务器在天空中被用来帮助执行由多个地面用户卸载的计算任务。在这项工作中，作者的目的是通过考虑QoS需求来最小化总能耗。利用连续凸逼近（SCA）方法，研究了在无人机MEC系统中，为了最小化OMA上行链路和NMA下行链路的移动能量，进行比特分配。针对无人机MEC系统的能耗最小化问题进行了研究。[\[162\]](#)。为了解决移动设备有限的计算容量和有限的电池寿命，提出了基于无人机的MEC服务器来向移动设备提供卸载机会。提出了一种替代算法，通过优化用户的卸载计算比特和CPU的频率和最大速度限制的无人机轨迹来最小化无人机的能量消耗。仿真结果表明，该方案优于基准方案。

在第二种情况下，蜂窝连接的无人机由配备有MEC服务器的多个地面基站服务。[\[163\]](#)。在这种情况下，无人机需要完成一定的计算任务，在飞行的时间和访问一些给定的位置。因此，任务可以卸载到一些选定的地面基站。作者在[\[163\]](#)针对无人飞行器任务完成时间最小化的问题，结合无人机的最大速度约束和GBSS的计算能力，通过联合优化其轨迹和计算任务调度。结果表明，所提出的问题是非凸的，难以在多项式时间内找到全局最优解。因此，交替优化和SCA被利用来获得高质量的次优解。

## 伏安法 教训和潜在的作品

由于MEC和无人机结合的巨大优势以及有限的资源，可以得出结论，MEC-UAV是未来无线通信系统的必然趋势。虽然已经进行了一些现有的工程来设计MEC-UAV系统，但仍然存在一些挑战。下面，我们讨论MEC-UAV系统中的关键问题：

- *UAV-MEC系统性能分析*UV-MEC系统需要进行基本性能分析。特别地，可以研究覆盖概率、吞吐量、延迟或可靠性，以评估每个设计参数对整个系统性能的影响。由于无人机的3D开发和短的飞行时间和MEC的延迟意识，UAV-MEC系统的性能分析是具有挑战性的。
- *能量感知的资源分配*由于无人机的体积小、重量轻、功率有限，其飞行时间和资源受到限制。因此，需要优化设计轨迹和资源分配（即通信资源和计算资源）以减少能量消耗。然而，大多数现有的工程只考虑设计轨迹和优化资源分配，不能提高最高的网络性能。因此，对MEC-UAV系统的路径规划和资源分配进行联合优化是一个具有挑战性的问题。在这样的设计中，当考虑到其他优化因素，如QoS需求、卸载功率分配和任务分配以及信道变化、延迟约束和最大飞行速度时，都变得更加具有挑战性。
- *用户分组与无人机关联*在无人机的MEC服务器通信系统中，无人机作为飞行MEC使能基站。地面用户需要同时将任务卸载到一个无人机或多个无人机上。因此，用户分组问题需要通过使用合适的方法来解决，例如匹配理论、博弈论和凸优化方法。相反，在无人机MEC系统中，无人机需要将任务卸载到用于远程计算的GBSS。可以研究子信道分配和无人机关联。

## 不及物动词物联网的MEC

### vi-A 物联网基础

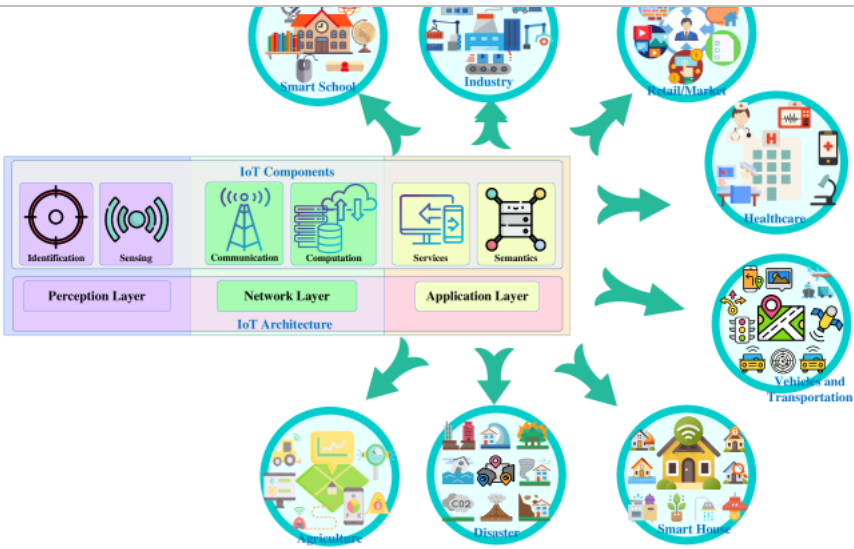


图10： IOT应用和架构的总体图片。

互联网因其对教育、传播、商业、科学、卫生保健、政府和人类的影响而被认为是人类历史上最重要、最有活力的创新之一。[\[164\]](#). 在过去的几十年中，互联网经历了从计算机到计算机广域网到万维网和移动网络的巨大的范式转换。[\[165\]](#), [\[33\]](#). 如今，得益于计算和存储技术和通信网络的显著发展，数十亿的具有其特定领域的应用的设备能够连接到因特网以产生/收集数据、交换重要信息，并通过复杂的通信网络来协调决策。[\[164\]](#). 这一现象开启了互联网的新时代，即所谓物联网（IOT）。[\[164\]](#). 物联网的基本概念是，任何事物都可以在任何时间、任何地点与全球信息和通信基础设施互连。[\[166\]](#). 事物可以是存在于物理世界中的物理事物，它们能够被感知、激活和连接，或者存在于信息世界中的虚拟事物，它们能够被存储、处理和访问。事物可以被识别并集成到通信网络中，相关的信息可以是静态的和动态的。物联网在解决现代社会的各种挑战和提高人类生活质量方面发挥了重要作用，如更安全、更健康、更高效、更舒适。[\[16\]](#). 根据[\[166\]](#) IOT的基本特征可以归纳如下：

- **互联性：**至于物联网，包括人、车、可穿戴设备、计算机、智能设备、传感器、工业组件、社会实用对象、数据、信息在内的任何东西都可以与全球信息和通信基础设施互连。
- **与之相关的服务：**除了传统的人类活动服务之外，物联网还具有通过人机交互和机器对机器交互的方式来提供与事物相关的服务的能力。提高新的服务期望在真实世界和虚拟世界中改变技术。
- **异质性：** IOT中的设备由于各种上下文、大量的多样化应用、多个服务域、不同的协议集、硬件平台、设计模式、通信接口和标准而具有异构性。
- **动态变化：**物联网中的各个组件动态地、连续地变化。新的传感器、机器、数据和分析不断地被开发、革新、介绍、实施，这为新的服务、应用、技术和解决方案创造了机会。例如，设备的状态动态地变化，例如，连接和/或断开，休眠和唤醒，收集，处理，执行新的关键作业等。此外，设备爆炸性增加的数量和设备触发的通信也要求IOT的动态变化。

图11阐述了物联网的基本体系结构及其具体的各个领域的应用。特别是，物联网基本架构包括三层：感知、网络和应用。[\[167\]](#), [\[168\]](#). 在第一层中，感知或对象（设备）表示物理传感器，以从事物或环境中收集有用的信息/数据（例如查询位置、温度、重量、运动、振动、加速度、湿度等），然后将这些信息转换成数字形式。此层还具有额外的义务来标记具有唯一地址标识的所有对象。第二层网络层的主要职责是帮助和保护感知层和应用层之间的数据传输。本质上，这一层是基于互联网和通信系统的融合，如有线、无线和卫星。[\[169\]](#). 应用层是传统的物联网体系结构的顶层，根据用户的相关需求提供个性化的服务。这一层的主要职责是连接用户和应用程序之间的主要差距。它结合了行业，实现了针对物联网特定领域应用的高层次智能解决方案，如灾难监测、医疗保健、智能家居、换位、生产监控、医疗保健、零售、教育等。在其他方面，第三层又分为三个子层：服务管理层——促进对相关任务的配对请求或信息处理的信息处理、决策和控制；应用层-根据客户的预先请求为客户提供智能高质量的设施；业务层-表示业务模型和从应用层接收的数据。近年来，由于一些应用和服务的高层次需求，在应用层和网络层之间潜在地放置了一个层，该层由MEC和雾计算服务器组成，以执行特定的计算任务或预数据处理。

虽然物联网有利于现代社会，但仍存在许多技术问题和要求，一些与物联网相关的基本要求概括如下：[\[166\]](#)：

- **基于标识的连通性：** IoT中的事物之间的连接性需要基于事物的标识符来建立。此外，不同的事物可能的异构标识符以统一的方式处理。
- **互操作性：** 需要在异构和分布式系统之间确保互操作性，以提供和消费各种信息和服务。
- **自主组网：** 物联网需要自主管理、自配置、自修复、自寻优、自保护技术和/或机制等多种自主网络的智能控制功能，以适应不同的应用领域、不同的通信环境和大量的设备类型。
- **自主服务提供：** 服务需要具有基于运营商配置的规则或用户定制的数据自动捕获、通信和处理的能力。
- **基于位置的能力：** 基于位置的能力符合安全法律法规，需要在IOT中支持自主服务。
- **安全性：** 当数据和信息涉及到物联网时，需要慎重处理安全问题。
- **隐私保护：** 隐私保护需要在物联网中得到支持。很多东西都有他们的主人和使用者。事物的感知数据可以包含与他们的所有者或用户有关的私人信息。IOT需要支持数据传输、聚合、存储、挖掘和处理过程中的隐私保护。隐私保护不应设置数据源认证的障碍。
- **高品质和高度安全的人体相关服务：** 需要在IOT中支持高质量和高度安全的人体相关服务。不同的国家对这些服务有不同的法律法规。
- **即插即用：** 在IOT中需要支持即插即用的能力，以实现飞跃的生成、组合或基于语义的配置的获取，以使互连的事物与应用的无缝集成和协作，以及对应用需求的响应。
- **可管理性：** 需要在IOT中支持可管理性，以确保正常的网络操作。物联网应用通常是自动工作的，没有人的参与，但其整个运作过程应由相关方管理。

欲了解更多的信息技术和未来趋势的物联网，我们请读者进一步参考以下参考文献。

## VI-B 物联网应用的动机与挑战



得越来越必要。将MEC应用到物联网系统中有很多好处，包括不限于，降低通过基础设施的流量，减少应用和服务的延迟。[\[一百七十一\]](#) 注意到延迟是许多IoT应用中提供服务质量（QoS）的一个关键性能指标，其中最重要的是由于物理和虚拟通信距离的减少，由MEC引入的低延迟。利用MEC部署，边缘计算（或雾计算）被部署以将一部分虚拟机（VMS）从云计算中心分发到网络边缘，因此，雾计算可以显著地减轻计算和路由负担，并提高资源利用率。由于雾节点更接近于IOT设备，因此可以减少端到端的延迟，另外，在IoT中使用MEC可以降低终端用户的能耗，减轻云计算负荷的压力。MEC通过计算卸载使微IOT设备具有显著的附加计算能力，此外，MEC为网络运营商、服务和内容提供商开辟了许多新的前沿，以在IOT应用上部署多方面的和不间断的服务。

相反，IOT也为MEC提供了相互促进的优势，特别是，IOT将MEC服务扩展到从传感器和执行器到智能车辆的所有类型的智能对象。MEC体系结构可以被看作是中间层，它可以集成和处理由IOT服务生成的小数据包，并在到达核心网络之前提供一些额外的特殊边缘功能。将MEC能力集成到IOT系统中，保证了在服务质量和易于实现方面的更好性能。为了实现MEC对物联网应用的益处，应考虑诸如可扩展性、通信、计算卸载和资源分配、移动性管理、安全性、隐私和信任管理等技术方面。

#### 可扩展性

如果要有效地支持这样大量的设备，IOT环境将需要在网络空间中动态范围的能力。[\[一百七十二\]](#). 这需要将MEC应用到许多不同的可能场景中。MEC的部署场景越大，它所能处理的能力范围越广，这也意味着像IoT这样的MEC使能技术具有更高的可扩展性。

#### 通讯

在MEC使能的IOT系统中，MEC服务器被放置在IOT设备和云之间的中间层。因此，主要的通信类别有：（i）边缘计算节点和IOT设备之间的无线接入；（ii）边缘节点和云之间的无线/光纤/电缆回程访问；（iii）MEC服务器之间的通信[\[一百七十三\]](#). 在MEC使能的IOT系统中，这些通信类别连同连接的设备的数量需要解决异构通信技术，例如FiWi、MMWAVE、海量MIMO、5G和低功率广域网（LPWANS）。[\[一百七十三\]](#)，[\[一百七十四\]](#)，[\[一百七十五\]](#)，[\[一百七十六\]](#)。

#### 计算卸载与资源分配

计算卸载是MEC在IOT中的重要服务，它不仅延长了IOT传感器节点的电池寿命，而且减少了执行显式应用所需的端到端延迟。为了最大限度地提高MEC的效益，应该解决联合计算和通信资源分配问题。[\[一百七十七\]](#)。

#### 移动性管理

在MEC使能的IOT中，大多数节点将是移动节点或附着在移动对象（人、车辆、机器人等）上，这要求MEC为IOT应用提供超可靠的移动性管理方案。

#### 安全与隐私

安全性和隐私性是边缘网络中的关键问题，由于缺乏物理安全性，以及在使用边缘计算的设备中缺乏或脆弱的安全框架。[\[一百七十八\]](#)此外，在边缘计算节点进行远程处理的数据共享会带来大量的隐私问题。[\[一百七十九\]](#)因此，开发安全框架和保护MEC允许的隐私是当前和未来网络面临的应用挑战。

#### 信任管理

信任的MEC启用的IOT不仅限于系统安全性鲁棒性和隐私保护[\[一百七十八\]](#)在IOT网络层的大数据处理、IOT服务的质量和身份信任等方面，为了提供有效的信任管理，MEC服务器应该引入更多的信任相关的目标，例如保持计算IOT服务的信任，或者将数据收集到边缘云和边缘服务器之间的合作信任。边缘服务器应该确保最终用户ANDIOT设备的可信赖性，从而从边缘云获取资源。同样，边缘服务器也应该保证最终用户/设备和其他边缘服务器提供可靠服务的可靠性和可信性。更重要的是，边缘服务器之间的有效资源共享必须基于适当的信任管理框架来实现。IOT系统实体之间的信任关系，包括IOT感知层的数据感知和收集的可靠性、效率和可信赖性。里维斯[\[一百八十\]](#)，[\[一百八十一\]](#)总结了近年来物联网信托研究的成果。

为了加深对MEC使物联网技术要求的深入了解，推荐有兴趣的读者参考现有的MEC IOT主题调查论文。[\[IV\]](#)。

方面	
直接应用方面	
裁判	贡献

<a href="#">[三十三]</a>	全面综述了实现物联网应用的MEC技术及其协同作用。在IOT中实现MEC的技术方面，并对其中的各种其他集成技术提供一些见解。
<a href="#">[一百八十二]</a>	5G物联网的研究现状、关键技术及其在5G IOT中的主要研究方向和挑战
<a href="#">[一百八十三]</a>	利用光纤无线接入技术、云计算概念和软件定义的网络架构，提出了一种移动边缘物联网（MEIoT）体系结构。
<a href="#">[一百八十四]</a>	解释支持它们的网络方法的缺点。讨论可能支持实时物联网分析的相关网络方法。提出研究问题和未来研究方向。
<a href="#">[一百八十五]</a>	在每个雾节点中提出一种分级的雾计算架构，以在保持用户隐私的同时提供灵活的IOT服务：每个用户的IOT设备与代理VM（位于雾节点中）相关联，其收集、分类和分析设备的原始数据流，将其转换为元数据，并将元数据发送到相应的应用程序VMS（其由IOT服务提供商拥有）。
<a href="#">[一百八十六]</a>	全面综述了近年来MEC领域的研究和技术发展及其应用领域、研究的挑战以及物联网中的开放性问题。
<a href="#">[一百八十七]</a>	证明了MEC技术的简短教程，概述了MEC框架、体系结构及其在物联网中的作用。
<a href="#">[一百八十八]</a>	主张边缘计算的新兴的物联网应用，利用传感器流，以增加交互式应用程序。
<a href="#">[一百八十九]</a>	提出了一种新的存储和处理可伸缩传感器数据的体系结构。
<a href="#">[一百九十]</a>	三个边缘计算技术的简明教程，包括MEC、CuldDLE和雾计算。
<a href="#">[一百九十一]</a>	典型的物联网设备的硬件结构，并总结了许多低功耗技术，这使得它们有助于大规模的应用。
<a href="#">[一百九十二]</a>	全面调查使用雾计算支持物联网设备和服务。
<a href="#">[一百九十三]</a>	从安全和效率的角度看物联网边缘辅助数据处理综述。

表四：现有MEC IOT专题调查论文综述

## Vi-C最新技术-启用MEC的物联网应用场景

本节提供了关于最近启用MEC的IOT应用场景的调查。

IOT最重要的使用案例之一是智能城市及其重要的子集智能家居。近年来，MEC环境和新颖的5G技术使IOT系统出现了明智的边缘大数据分析 and 无线接入，进一步提高了市民的城市生活质量。[\[194\]](#) 优化智能家居系统的资源管理。通过利用启用雾的云计算环境，新实现的智能家居系统可以减少12%的网络带宽、10%的响应时间、14%的等待时间和12.35%的能耗。[\[195\]](#) 这种基于雾的IOT系统可以解决复杂的和资源需求对智能家居中的在线和离线数据处理、存储和分类分析的挑战，用于监控和控制智能家居或智能建筑，[\[196\]](#) 在云/雾资源的基础上，提出了以信息为中心的网络（ICN）的一些解决方案、参考体系结构和测试平台。[\[197\]](#) 提出了一种在智能家居中监测病人健康的框架，通过嵌入数据挖掘、分布式存储和通知服务，与其他分类算法相比，该模型能够基于实时医疗数据做出更好的准确性和响应时间的决策。[\[198\]](#) 特别是，在ZigBee和WiFi设备之间实现无缝通信的家庭自动化系统（FAS）表明，所开发的光纤服务比评估的云服务响应速度快几倍，并且必须认真对待交叉干扰以防止冲突。

针对智能城市的使用案例，近年来已经研究了很多方面，考虑到安全性和隐私性，[\[199\]](#) 提出一个基于链链的智能合同服务为可持续的物联网使经济在大智慧城市。在雾节点上，利用人工智能来处理 and 提取重要的事件信息，然后利用BoBLink算法来节省 and 提供安全的结果。[\[200\]](#) 应用深度强化学习，所提出的机制能够更有效地管理能源网格。[\[201\]](#) 通过提出了一种可扩展的、可持续的物联网框架，提出了一种可扩展的、可持续的物联网框架，使其能够支持智能城市愿景。通过数值比较结果表明，该框架在减少大规模IOT设备的端到端延迟和能耗方面具有很好的效果。[\[202\]](#) 在基于深度强化学习的人群管理算法中，开发了一种智能路由，使分布式计算和通信基础设施完全可行，同时满足来自人群的服务请求的时延约束。

### Vi-C2教育与灵巧学校

在物联网时代，智能学校和电子学习系统的创新和易于使用的技术产品有望帮助学生更有效、更灵活、更舒适地学习新事物。[\[203\]](#) 作为行为（记录位置、活动）、资源连接、无处不在、技术丰富的服务和平台环境，为了实现这些特征，在多层MEC边缘的智能计算起着关键作用。[\[204\]](#)，[\[205\]](#)，[\[206\]](#) 通过监控学生在智能学校环境中的位置 and 活动来关注行为特征。特别地，[\[204\]](#) 开发了一种学校穿梭巴士系统，用于跟踪学生和车辆的位置，其中在每个总线上实现基于树莓PI的MEC服务器。[\[205\]](#) 设计了一个平台来识别课堂上发生的任何学生活动，其中原始的室内环境数据在边缘计算服务器（Raspberry Pi）上被处理，以检测教室中的个体的存在。[\[206\]](#) 利用MeC实现的智能学习环境中的深度学习算法进行个人识别，利用云功能实现MEC可以提高移动学习的效率和情境学习的能力。[\[207\]](#)，[\[208\]](#) 通过比较性能研究 and 分析，工作表明，边缘和雾计算可以减少潜伏期，并实现实时响应为当前的物联网应用，特别是，[\[209\]](#) 提出了一种光学-雾辅助虚拟现实（VR）框架，以提高E-L学习体验，同时提高体验质量（QoE）以低延迟。提出了一种硬件在软件协同设计过程中的校园边缘计算网络。[\[210\]](#) 该平台通过在校园照明系统中集成管理网络、移动无线网络和计算服务，丰富了学习环境，利用神经网络学习算法有效地管理计算资源和资源配置，提出了一种大学教育边缘计算系统框架。[\[211\]](#) 包括基础设施层、资源管理层和数据支持层，分别提供硬件支持、管理资源和存储资源的管理 and 安全控制，在该系统中对网络资源进行优化，以满足响应时间、能耗 and 安全性的要求，提高教与学的效果。[\[212\]](#) 提出了一个基于物联网的平台，为实时监控 and 交通管理提供了一个完整的解决方案。[十八](#) 在这个平台上，传感器数据处理发生在边缘设备（例如Raspberry Pi）上，以减少网络核心层之间的网络流量。评估表明，边缘计算部署可以将流量增加到现有的5倍。

### VI- C3医疗保健

基于物联网和网络物理系统的快速发展，已经开发和实现了具有更智能 and 预测能力的医疗解决方案。MEC使IOT在改善医疗系统的性能方面具有巨大潜力，包括但不限于移动监控医疗保健方案。在该方案中，MEC使能网关可以在控制数据传输的同时提供本地存储、实时本地数据处理、嵌入式数据挖掘等多个高级服务。[\[213\]](#) 这些使得授权系统能够处理管理远程设备的许多挑战，即安全性、可靠性、延迟、能量效率问题。进入[\[214\]](#) 通过提出一种安全有效的数据管理系统EDGE CARE，考虑移动医疗系统中的安全问题。在该系统中，考虑安全性考虑，在边缘服务器上处理医疗数据 and 促进数据交易。设计了基于Stackelberg博弈的优化算法，以优化数据收集机制 and 公平分散的数据交易，以提高延迟和可靠性性能为重点。[\[215\]](#) 提出了一种新的身体保健架构，它由一个微小的移动客户端模块 and 一个边缘网关组成，用于收集 and 本地处理来自不同场景的数据。该平台的实际实现证明了它在高可靠性、低数据负载 and 处理延迟方面的巨大优势。[\[216\]](#) 实现了一种准确、轻量级的分类机制，利用边缘计算方法，根据生命体征提取的信息，准确定位分类精度，计算量低。实施结果表明，所提出的系统优于传统的非MEC远程监控系统：（i）实现98.3%的分类精度，用于癫痫发作检测，（ii）延长电池寿命60%， and （iii）减少平均传输延迟90%。

此外，MEC使能的IOT也被应用在紧急医疗场景中，其中管理和处理病人的信息需要高可靠性和低延迟。[\[217\]](#) 提出了一种结合云计算 and 边缘计算的资源保存网（RPN）框架，可用于急诊科（ED）系统。在该框架中，考虑患者的住院时间（LoS）、资源利用率和平均病人等待时间等关键性能指标，并考虑高可靠性、高效率 and 安全性，对其进行建模 and 优化。[\[218\]](#) 将计算资源与终端设备紧密结合，有效地处理实时视频数据（如基于视频的心率）。实验结果表明，在采用边缘服务器 and 云服务器的多层卸载模型下，可以达到最佳的性能。

### Vi-C4自主车辆/物联网汽车

进入[\[219\]](#) 3GPP已经确定了5G作为支持车辆对所有车辆（V2X）概念的关键技术，在几种使用情况下：信息（状态地图、环境、交通）共享、车辆排队、远程驾驶、基于分组的协同驾驶、车辆之间的通信、协作避让、动态乘搭。在不同的V2X应用中，数据速率 and 通信范围中的QoS要求可能会有所不同。[\[220\]](#)，[\[221\]](#) 然而，在大多数用例中，由于超低潜伏期、高可靠性和安全性等关键因素需要改进，这可以通过使用MEC技术来实现。[\[222\]](#)，[\[223\]](#) 安全概念被认为是[\[224\]](#) 这使得一个合作的智能交通系统（C-ITS）与MEC在道路 and 未来的自主车辆部署上增加了安全性。在该系统中，部署有MVC装备的托管V2X服务的信箱塔，以允许本地通信具有动态可扩展性和低延迟，以提高流畅性和更高效的交通流的交通效率。[\[225\]](#) 重点研究了基于MEC的密集毫米波V2X网络中的时延，在该系统中，对车辆 and 路侧单元的卸载计算任务和发送功率进行了优化，以最小化车辆移动性所产生的时延约束下的能量消耗，在此基础上说明了能量消耗与任务计算时延之间的折衷，此外，在RAN内的MEC服务器的布置为车辆提供灵活的网络服务，并有效地控制无线网络资源。[\[226\]](#) 另外，在V2X网络中利用MEC部署可以在边缘侧进行深度学习，从而可以提高信息共享 and 通信的性能。[\[227\]](#)，[\[228\]](#) 例如，研究了利用MEC进行深度学习的目标识别增强。[\[229\]](#) 将英特尔Movidias-Aythi神经计算棒与树莓PI 3 模型B用于分析车辆边缘计算的实时图像 and 视频中的对象。

### Vi-C5工业互联网



的轻量级IIOT移动设备（MDS）。[232, 233]. 智能管理边缘资源，MEC能够为IIOT系统供电，以解决一些重要问题，例如延迟、弹性、成本、对等、连接性、安全性。例如，[234]考虑到MEC使能IIOT系统中的联合资源分配和卸载问题，提出了两种基于拍卖的报价方案，并要求由边缘服务器提供的报价。结果表明，在IIoT中启用MEC可以显著提高系统效率。SDN和MEC用于IIoT [235]动态地对具有不同时延约束的业务进行分类。该工作旨在考虑时间期限、业务负载平衡和能量消耗的聚合来优化路由路径，以便在平均时延、吞吐量、能量效率和下载时间方面提供更好的IIOT数据传输解决方案。[236]提出了一种基于服务流行度的智能资源划分（SPSRP）方案，用于FIR计算使能IIoT。通过论证延迟时间、成功响应率和容错性的显著性能改进，证实了使雾计算能够应对大规模IIOT服务的显著益处。介绍了IIOT中MEC的另一个应用实例。[237]其中实现与MEC服务器的并行计算，以提高设备识别的效率。特别是，采用长短期记忆来分析大数据特征，构建具有MEC的非侵入式负荷监测系统，可以将平均识别率提高到80%以上。[238]提出了一个有趣的MIE-IIOT用例，通过在出版商和工人之间传输原始数据（例如图片或视频剪辑）而导致网络拥塞。在这项工作中，采用了具有多个MEC服务器的智能块链平台来有效地解决网络拥塞。MEC还可以应用于基于智能IOT的制造，以改善边缘设备、网络通信、信息融合以及与云计算的协作机制。[239]在此基础上，可以显著提高制造系统的实时性、满意度和能耗性能。[240]. 通过对MEC的研究，可以提高IIOT系统的缓存管理。[241]提出了一种适用于MEC的IIOT系统的高速缓存体系结构，可以实现更高的实时性和实时性。[242]在边缘处实现人工智能的协调，从而显著提高IIOT设备的范围和计算速度。所提出的人工智能和基于MEC的IIOT框架能够通过适当地调整占空比和TPC不同于常规方法来提高能量效率和电池寿命在可接受的可靠性（0.95）。

### Vi-C6 零售

在零售业中，物联网技术发挥着重要的作用，其中包括但不限于将电子客户连接到商店窗口、电子商务网站的销售助理。凭借边缘/云计算资源的力量，物联网还能够收集和分析大型零售相关数据，以有效地管理经营策略，并将零售商定位和跟踪库存的方式转变为接近100%的准确度。[243, 244]. 然而，学术界发表的研究论文数量有限，明确地指出了零售业实施MEC使物联网的必要性。[245]. 最近，[246]提出了一个有针对性的广告在零售（TAR）框架，以了解客户的利益在商店使用精确的跟踪相机。结果表明，焦油在两个不同的实际部署中达到90%的精度，比文献中的解决方案好20%。设计了一个基于MEC的电子优惠券分发系统，即Aggio。[247]这使得分布的本地化，有针对性的优惠券，同时最大限度地减少带宽和能源使用。在该机制中保证了用户的隐私和安全，因为包括兴趣和购物决策在内的客户信息被存储在边缘设备中，消费者的移动设备和优惠券集线器之间的隐私保护通信被大量使用。开发了一种新的鲁棒性零售点（POS）系统，该系统利用Buffic链和边缘计算技术。[248]其中事务记录被存储在具有分布式POS边缘计算服务器的BuffSink网络中，以处理意外的网络中断。[249]开发了一个自动枣果分类系统，以满足智能城市中的消费者。在该框架中，利用深度学习方法和边缘计算和缓存技术，有效地将日期水果图像提供给客户的低延迟和实时传输。

### Vi-C7 可穿戴的物联网、AR和VR

与移动增强现实、虚拟现实（AR/VR）和可穿戴设备相对应的新兴应用，例如智能玻璃和手表，预计是迄今为止在无线网络上最苛刻的应用之一，但是仍然缺乏足够的能力来执行复杂的数据处理算法。为了克服这些挑战，MEC和5G技术的出现将带来更长的电池寿命、强大的计算和存储资源集和低的端到端延迟。[250]共享这个视图，[251]提出了一种从用户的环境中探索可用的计算资源的出口系统，例如从附近的智能电话、平板电脑、计算机、Wi-Fi AP等，以形成用于从可穿戴设备执行卸载任务的移动计算边缘。通过出口实现的有希望的性能，例如，在最佳性能的97.6%到99.5%的封闭性中，已经证明了使边缘计算技术成为可穿戴IOT系统的优点。[252]提出了一个精确和普遍的人机工程学平台在医疗可穿戴式物联网系统中进行实时风险评估。在该平台中实现移动计算层，用于同步和预处理从可穿戴传感器收集的数据。然后，将处理后的数据存储在服务器层以进行进一步的分析。利用MEC上下文，系统可用性规模达到76.6。[253]提出了一种应用硬核斥力的非齐次Poisson点过程模型来构造可行的MEC基础设施部署。利用所提出的方法，移动网络运营商知道在哪里定位MEC点的存在（POPs）和相关的基站来支持给定的服务集合。提出了一种利用MEC在无线网络上传输VR视频的有效方案。[254]在时延约束下，提出了一种最小化通信资源消耗的任务调度策略。这项工作还展示了在通信、计算和缓存之间的有趣的权衡。还考虑了基于MEC的移动VR。[255]. 具体地，提出了一种在移动VR设备上启用视域缓存和后处理过程的新的交付框架，以优化资源分配。研究结果表明，所提出的框架能够在满足低时延需求的前提下节约通信带宽。在VR业务中采用边缘计算和毫米波传输 [256]提出了一种新颖的框架，通过采用主动计算和缓存来预先计算和存储用户的高清视频帧来最小化计算延迟。仿真结果表明，边缘计算和毫米波传输可以减少30%的端到端时延。考虑使用边缘服务器提高VR设备的性能。[257]. 在这项工作中，李等人。建议让边缘服务器自适应地记住一个用户的VR帧渲染的先前结果，并将它们大量地重用给其他人以减少计算负载。在Android OS和Unity VR应用引擎上的实现表明，MEC能够令人印象深刻地减少超过90%的计算负担，并且超过95%的VR帧数据被发送到移动设备。

### Vi-C8 物联网机械化农业

物联网兴起了低成本硬件（传感器/微控制器）的应用，5G通信技术开辟了土壤培育的新纪元，即：“智能农业”[258, 259]. MEC使IOT能够为智能农业提供先进的能力，例如作物的预测分析、天气预报或智能物流和仓储。[260]. 近年来，农业中出现了MEC和物联网的一些著作。特别地，[261]考虑到水监测平台，在智能IOT为基础的农业中的一个重要问题。本文提出了一种利用先进的移动边缘计算（MEC）技术有效地管理传感器系统实时采集的数据的智能农业水监测系统。作为欧盟排水项目的一部分，[262]提出了一个本地/边缘/云三层平台，用于监测和管理无土壤农业在全循环温室使用适度盐水。在这个平台中，边缘平面被部署，以提高系统可靠性，以防止网络访问失败，而数据分析模块位于云中。保护葡萄园上的植物，[263]在VILAFAM Es（Casele\*, 西班牙）市使用低成本传感器实施疾病预警平台。在该平台上，采用边缘计算的方法，提高了对气象现象采集（温度、湿度等）的监测能力，从而开发出一种藤本植物病害预警模型，提高了产品质量。

### Vi-C9 环境灾害监测

如今，通过监测环境条件（空气质量、噪声检测、废物管理、水污染）等多种威胁，进行灾害检测，已成为避免或减少自然灾害和人为灾害造成的基础设施损害、货币成本、灾难、伤亡的主要问题。[264]当灾害发生时，迅速采取行动对减轻灾害的潜在危害至关重要，确保对受害者的及时和适当的援助，并实现有效和快速的恢复。在这些场景中，MEC使能的IOT技术在信息分析的大数据可以动态地在系统边缘上执行的情况下具有非常有用的潜力。[265]提出了一种适合大规模移动人群感测服务的边缘计算体系结构，其中大量的可穿戴传感器监测大地理区域的环境条件。由MEC支持的系统便于多个设备之间的协调，可以减少与通信和信息收集有关的等待时间。关于智能手机，[266]开发了一种基于蜂窝的多接入边缘计算网络，以收集智能手机可以同时与蜂窝网络和IOT设备交互的环境信息。还讨论了海洋环境与物联网，包括云，雾和边缘计算机制。[267]. 对于灾害管理，作者提出了一种拥挤源灾害管理雾计算（CDFMC）。[268]利用雾计算平台。在该系统中，提出了一种块链数据卸载机制，用于在常规通信链路被破坏时将IOT数据发送到雾层。[269]研究了一种基于边缘计算的系统，其配备有传感器和增强现实设备，以支持在中型或大规模事故场景中的操作。所提出的系统能够协调消防队的团队来管理资源，尽量减少开发本地和外部信息的时间，并且还考虑安全性和可靠性问题。马蒂亚斯等人。进入 [270]利用协同检测技术实现了无线传感器网络中的协作边缘框架，以避免误报警告，并主动识别危险区域中的人。实现了基于机器学习的分类，大大减少了总功耗，提高了传感器的响应时间和内存需求。研究了一种检测坑洼和道路监测的平台。[271]为了应对交通安全季节雨季的洪水。

## VI-D 教训和潜在的作品

处理边缘网络中的大量数据能够导致显著的优势。这些优点包括但不限于减少无线电资源消耗（即，12%）。[194] 缩短反应时间（即10%）。[194] 减少系统延迟（即14%）。[194] 90%英寸 [116]），并降低总能耗（即12.35%）。[194] 此外，MEC也有助于卸载在IOT设备的计算负担，这导致延长其电池寿命（即，60%英寸）。[116] 提高任务处理的准确率（即提高癫痫发作检出率98%以上）。[116] 减轻传输数据量（即95%）。[155]），并降低计算负荷（即90%）。[155] 然而，为了最大限度地提高MEC在IOT应用中的益处，需要更有效地管理MEC资源和接入网络，以及IoT组件或元件的能力和性能。这些需求为有效地管理物联网系统中的MEC开辟了许多潜在的研究方向。考虑到IOT和MEC的技术方面的未来工作，即可扩展性、通信、计算卸载和资源分配、移动性管理、安全性、隐私和信任管理，已经在最近的一些MEC-IOT调查中得到很好的指示和体现，例如，[13, 186, 188, 191, 192, 193] 下面，我们将讨论MEC使能的IOT系统中的关键性开放问题，这与所提到的挑战性的技术方面不同。

- **密集型MEC基于物联网的有效协作：**目前，每个MEC服务器由边缘基础设施提供商（EIP）部署，以在IOT网络边缘向特定的分布式边缘IOT节点提供计算和无线电接入服务。此外，在分布式MEC服务器上安装了包括数据分析、压缩、缓存、路由等的计算或联网功能的集合，以从其应用方面为其设备提供服务。在密集的基于IOT的智能城市中，大规模异构的IOT设备运行与城市生活的各个领域相对应的各种高级服务。[171] 在一个相同的地理区域中，虽然MEC通过将原始数据卸载到云处理来支持一组功能服务需求，但这会导致不同的EIP部署的非协作边缘服务器可能导致资源的严重利用不足，因此，协作边缘计算环境可以为多种类型的边缘计算服务器打开资源，以满足密集IOT网络中的各种需求。然而，为了实现边缘节点之间的合作以最大化其收益，需要解决几个特定的问题：云与边之间的权衡；分布式和有限边缘资源上的服务放置的优化；计算密集型边缘服务与有限边缘资源之间的矛盾。这导致大量来自不同EIP定位的服务需求不同的设备。[171]。
- **在基于MEC的物联网系统中应用人工智能技术：**近年来，基于Im/DL的人工智能技术被认为是IOT环境下处理大数据的重要工具，在网络边缘的机器/深层学习和人工智能算法的集成，可以提供有效的数据分析、准确的决策、网络边缘的任务预测、移动边缘缓存、计算卸载、维护网络安全和数据隐私等。此外，采用面向对象技术的MEC技术，可以在不同时间和场景中提取物理/网络资源和用户的行为，动态监控和调整网络资源的配置，实现批量的实时数据采集，高效的计算处理，从而可以优化异构IOT设备的智能服务。[172] 然而，为了将经常需要大量数据处理的人工智能技术应用到边缘节点上，这些节点通常配备有限的计算、存储资源，因此需要一种基于分布式计算和数据访问的新的基于ML/DL的算法，这对于未来的工作是一个具有挑战性的问题。

## 七密集异构网络中的MEC

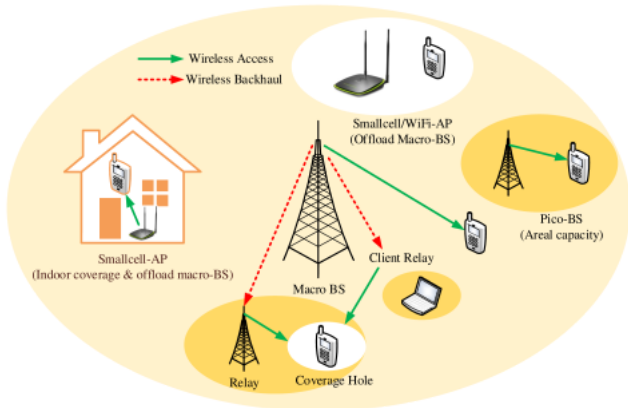


图11: 异构网络体系结构 [173]。

## VII- AHETNET基础

为了应对网络流量的空前增加和大量连接的设备，网络加密已经成为5G网络的基石，其中增加了更多的基站和接入点，并利用空间频谱复用。HETNET被定义为更高层的宏单元和较低层的小单元的集成，例如，如图Fig.所示的微微蜂窝、毫微微蜂窝基站和中继节点。[12] 换言之，HetNETs是通过将小单元集成到现有蜂窝网络中以提供无缝设备到核心网络连接而创建的。[174] HETNET中的节点可以在授权和非授权频带上采用不同的接入技术，例如，一个节点可以使用LTE作为接入技术，而另一个节点可以使用WiFi。根据[174] HETNET体系结构的最低要求如下：

- **可扩展性**由于成千上万的小单元可以部署在一个单一的网络中，新的体系结构应该支持足够的可扩展性。
- **透明集成**这个要求意味着对现有蜂窝网络部署小单元应该是容易和透明的。
- **安防**小单元通常部署在不安全的环境中，因此新的架构应该为移动网络 and 用户提供足够的安全性。
- **有限回程能力**随着网络密集化的增加，由于有线回程链路安装障碍，采用有线回程部署所有小小区将不是可行且成本有效的解决方案。[11] 这促使了对小小区的无线回程的采用，以便能够以无线方式接收和发送数据流量到宏基站（MBS）的小小区。

由于许多原因，HETNET得到了发展。HETNET的主要优点概括如下 [175]：

- **更好的覆盖和容量**随着越来越多的小单元集成到HETNET中，发射机和接收机之间的距离变短。因此，HETNETs可以延长电池寿命并获得更高的信干噪比（SINR），从而导致更大的容量。[175] 小小小区的数目越大，可以在相同频谱的区域中服务的用户的数量越高，因此，HETNET可以提高频谱效率或网络容量。
- **改进宏单元可靠性**通过流量卸载，宏蜂窝可以保留自己的资源，为用户提供更好的质量。
- **成本效益**部署小小区可以降低蜂窝网络运营商的运营支出和资本支出。[176] 根据 [177] 费用规模从每宏蜂窝60000美元/年到每毫微微蜂窝200美元/年。
- **减少用户营业额**当小小区可用时，移动用户不受宏小区覆盖不良的限制，从而消除了保持有线连接或切换到其他MNOS的趋势。



里，“密集”一词指的是一个极值点，其中部署的BSS的数量变得高于活动用户的数量。有几个点使得密集HetNETs不同于常规HetNet和传统网络。[\[二百七十九\]](#). 首先，用户的密度大于BSS的密度，因此移动用户处于多个小eNB的覆盖范围内是可能的。在这种情况下，用户关联需要用户确定合适的eNB关联，并且在优化操作和提高密集HETNET的性能方面起着重要的作用。然而，网络密集化的不利后果是频繁切换，这显著影响即时性能。[\[四十七\]](#). 更具体地说，每次切换都需要用户和eNB之间的信息交换，如果切换操作失败，则可以删除连接。[\[二百八十\]](#). 其次，转发和接收（即回程）大流量从小eNBS到宏eNB和核心网络是具有挑战性的。事实上，小单元的回程包括有线和无线回程。[\[比十\]](#). 选择这些回程解决方案将取决于几个因素，例如实现回程连接的成本、流量负载强度、等待时间和移动用户的服务需求。由于在5G网络中密集地部署小小区，因此对于许多小小区实施有线回程将是不可能的，甚至是可行的。在此背景下，无线回程已经成为一种可行的解决方案，受到学术界和工业界的极大关注。[\[二百八十一\]](#)，[二百八十二](#)，[二百八十三](#). 第三，干扰是密集HETNET的限制因素。随着网络密度的增大，小单元之间的距离变小，但干扰变得更严重。与传统网络相比，在（密集）HetNETs中引入了新类型的干扰：宏到小小区干扰、小到小小区干扰和小到宏小区干扰。由于容量的基本限制和可实现的数据速率主要取决于接收的干扰，新的和有效的干扰管理方案，例如，小的eNB开/关和频率复用，对于保证网络性能具有重要意义。最后，在密集的HETNET中需要更复杂和实用的传播模型。[\[二百七十九\]](#). 虽然用户和eNB被定位在传统网络和常规HetNETs中的2D平面中，但是它们可以分布在密集HetNETs中的水平空间和垂直维度上，例如在具有许多摩天大楼的城市区域。在这种情况下，移动用户足够接近目标eNBS来建立视线（LoS）连接。另一方面，移动用户的接收信号在很大程度上可以由LoS干扰链路控制。这使得在普通HETNET中使用的单斜率路径损耗模型不适用于密集HETNET中的传播模型。[\[二百八十四\]](#).

为了对密集HETNET进行建模、优化和分析，在现有文献中已经使用了若干性能度量，包括SINR分布/中断概率、速率覆盖率和速率中断、平均频谱效率（SE）、区域SE、网络吞吐量、能量效率和公平性和优先级。可以使用几种技术来解决密集HETNET的挑战，例如集中式优化、随机几何、博弈论和机器学习。有关这些度量和数学工具的更多信息，我们请读者进一步参考以下参考文献[\[二百七十八\]](#)，[二百八十五](#)，[二百八十六](#)，[二百八十七](#)。

## VII—B 动机与挑战

虽然HETNET的概念已经引入了近十年，边缘计算和MEC的概念最近已经由ETSI自2014以来。一方面，HETNET的主要思想是将业务从宏小区卸载到小小区，以减少宏小区中的拥塞，以及提高用户QoS和网络性能。另一方面，MEC是将计算能力和存储资源从核心移动到网络边缘。尽管不同的发展原因和目标，HetNet和MEC有着各种相似之处和互补性。首先，这两个概念的目的是使管理资源接近终端用户，无线资源与HETNET和计算资源与MEC。两个术语，*交通卸载*和*计算卸载*，在HetNet和MEC中非常普遍。具体而言，前者表示业务数据从更高层的宏小区到较低层的小小区的卸载过程，后者意味着MEC的典型使用情况，因为计算任务可以从本地资源贫乏用户卸载到远程MEC服务器。其次，智能手机的普及和交通量的空前增加，促使了许多新兴服务和应用的繁荣，这通常对计算密集型、延迟敏感、超可靠和高数据速率有着严格的要求。MEC和HetNet的组合不可避免地符合这些要求。我们考虑IOT与几千个用户具有低延迟和计算密集型应用作为一个例子。与宏eNB并置的MEC服务器将不能服务于大量的IOT设备，因为MEC服务器通常具有有限的计算资源。此外，由于尺寸小，电池能量不足，许多IOT设备很小，不能直接与宏eNB并置的MEC服务器连接。在这种情况下，小区的存在不仅可以使存储和计算资源更接近用户，而且可以减少IOT设备和MEC服务器之间的传输范围，从而支持直接连接和减少等待时间。第三，合并MEC与密集部署的小型eNB是一种潜在的解决方案，使用云功能在真实接近和低延迟的方式。由于稀疏的无线电资源，将太多的计算任务卸载到单个宏MEC服务器是非常低效的。如果没有可用的无线电资源，用户必须等待直到资源块可用以卸载其计算任务。与传统的网络设置相比，将计算能力集成到小型eNB中可以增加卸载用户的数量，其中MEC服务器仅与宏eNB并置。最后，将MEC集成到HETNET中，促进异构MEC（HET MEC）系统的设计。[\[三\]](#) 其中，具有各种通信和计算能力的MEC服务器被放置在不同的层，即宏MEC和小型MEC服务器。值得注意的是，MEC和MCC是两个互补的技术，在这个意义上，集中式云可以提供巨大的计算资源，但长的等待时间，而分布式MEC可以实现较低的延迟和更高的可靠性，但有限的计算能力。在这样的多层和分级的MEC系统中，移动用户可以利用具有不同计算能力的各种计算服务器，从而能够运行更复杂的应用，并且相同、甚至不同的层的MEC服务器可以协作执行巨大的计算，并降低峰值计算工作量，从而提高计算性能。[\[二百八十八\]](#)。

随着网络加密的概念和计算硬件的最新进展，可能存在多个MEC服务器，每个MEC服务器连接到一个小的eNB并与之搭配。最近，很少有工作考虑到多个服务器在MEC网络中存在的各种问题，例如联合调整单个用户到多个MEC服务器的计算速度和卸载子任务。[\[六十八\]](#) 多服务器MEC网络的联合计算卸载和资源分配[\[二百八十九\]](#)，[四十四](#) 和最小数量的活动MEC服务器[\[二百九十一\]](#). 与单服务器MEC网络相比，具有多个MEC服务器的MEC可以提供如下巨大的好处[\[二百八十九\]](#)，[四十四](#)：

- 由于经济和可扩展的部署，MEC服务器通常具有有限的计算资源。此外，据预测，未来十年移动流量将增加1000倍，连接用户数量将在2020达到500亿，单一的MEC服务器可能会严重重载。相比之下，移动用户可以将他们的计算卸载到几个可用的MEC服务器中，从而减少来自单个MEC服务器的计算负担。
- 在多个MEC服务器的覆盖下，每个用户可以将计算任务卸载到具有更有利的信道增益和计算能力的MEC服务器上。因此，移动用户可以节省传输能量消耗（从而消耗总能量）并缩短执行延迟。
- 在部分卸载的情况下，每个用户可以将其计算任务划分为多个部分，并将它们卸载到不同的MEC服务器，从而减少执行延迟。MEC服务器可以协调交换信息以减少在相邻MEC服务器上卸载用户之间的ICI，并提高资源分配效率。此外，不同的MEC服务器之间的协作可以有助于潜在地增加集群资源，从而负担得起支持更高的计算需求的应用。

除了额外的好处，在HET MEC系统中存在一些挑战，可以由密集HETNET的特性、MEC的特性、用户位置的不确定性以及运行的应用程序和服务引起。下面，讨论了HET MEC系统面临的主要挑战。[\[四十四\]](#)，[二百九十一](#)，[二百八十六\]](#)。

- 多个MEC服务器和/或小型eNB的可用性使得卸载决策问题特别复杂。每一亩都必须决定*I*什么是最佳运行模式：*卸载或不卸载*和（二）应该选择哪些小的eNB和MEC服务器来关联和卸载，从而在满足资源分配和计算任务的约束的情况下实现所获得的性能最大化。
- 由于ICI的存在，HET MEC网络中的资源分配问题比均匀MEC系统中的资源分配问题更具挑战性。[\[二百八十九\]](#). 为了减轻这种影响，可以将每个小区内的频谱资源划分为正交子信道，该子信道应该被有效地分配给移动用户（即，用户应该使用哪个子信道来将其计算任务卸载到MEC服务器）。通过联合优化子信道分配和调整移动用户的发射功率，可以进一步提高网络性能。
- 一方面，可以预见的是，在不久的将来，大量的MEC服务器将被分布式部署，这在大小（计算单元）和配置（计算速度）上可以明显不同。另一方面，用户与MEC服务器之间的关联很大程度上依赖于MEC服务器的部署位置，例如，特定区域可以由大量MEC服务器进行加密，而在其他区域仅部署一个服务器。移动用户可以运行具有不同优先级和安全级别的应用程序和服务，例如，由于安全考虑，某些服务只能在私有MEC服务器中运行。此外，计算任务在输入数据大小、计算工作量和执行期限方面可能不同。因此，联合资源分配问题应该考虑到上述性质和特征。
- 在资源分配方面，计算复杂性是最关键的问题之一。与传统的MEC系统不同，在密集的HET MEC系统中，通常有一个MEC服务器和几十个移动用户，需要优化的变量的数目与活动用户的数量呈指数增长，部署的ENBS、MEC服务器和大量资源。在密集的HET MEC系统中考虑了各种类型的资源，包括不仅传统的无线资源（例如，子信道、发射功率、时间和空间），而且还包括新引入的无线资源（例如回程频谱、获取的能量、计算能力和缓存存储）。密集的HET MEC系统面临的主要挑战是用户关联、计算卸载、干扰管理和资源分配。更重要的是，这些问题是紧密耦合的，必须同时解决。在这样密集的HET MEC系统中，如何在低复杂度和小信令开销的分布式方式中设计高效的算法是具有挑战性的，因此需要来自社区的巨大努力。

现有的研究大多集中在单服务器MEC网络上。典型的网络设置是**I**) 单小区网络，其中MEC服务器集成到BS和二单服务器MEC HETNET，其中多个小单元覆盖在宏单元中，宏BS配备MEC服务器，MU通过小BSS将任务卸载到MEC服务器。图**十二**提供这两个网络设置的图解说明。上述文献的相似性是在单个MEC服务器和/或固定用户关联的假设下，即使在MU覆盖多个BSS的情况下。



图12: 单服务器MEC网络的两种典型网络设置 [二三八十八]。

## VII—C1单服务器Het MEC

将MEC与密集eNB的密集部署相结合可以提供许多好处；然而，由于小区间干扰的存在，计算卸载和资源分配方案变得非常复杂。在密集的HET MEC系统中已经有几篇关于干扰管理的论文。[二八九十二, 二八九十三, 二八九十四, 二八九十五, 二八九十六, 二八九十七]. 进入 [二八九十二]，作者研究了无线电和计算资源的联合问题，以在发射功率预算、等待时间和最大计算能力约束下最小化所有移动用户的总能量消耗。由于小区间干扰的存在，用户的发送协方差矩阵都被耦合，从而导致高度非凸问题，即使在单个用户的特殊情况下。为了解决原始问题，我们考虑了两种主要方法。[二八九十二]. 第一个解决方案是应用连续凸近似（SCA）的思想，其中原始问题被强凸问题的序列所取代，而另一个替代方案是将原始问题分解为在小EnB上并行求解的子问题，在小EnB和中心云之间具有有限的信号交换。数值模拟 [二八九十二] 结果表明：（1）联合优化优于不相交方案，其中无线电和计算资源分别优化，（2）计算负荷高、比特数小的计算任务对卸载和远程执行更为有利，因为分配给每个卸载用户的计算能力与计算任务的工作量成正比。同样，Al Shuwaili 等进入 [二八九十三] 考虑单服务器多小区HET MEC系统中的若干问题：（1）上行链路和下行链路干扰的管理，（2）任务卸载的回程容量的分配，以及（3）云计算能力的分配以卸载用户。在这种情况下，考虑优化上行链路/下行链路预编码、计算资源分配和上行链路/下行链路回程分配的优化问题，然后基于SCA方法求解。仿真 [二八九十三] 显示了计算和回程资源的联合分配的有效性，并证明了回程容量对卸载能耗的重要性。

在多个用户的存在下，MEC服务器必须能够同时执行多个计算任务，并且稀缺的无线带宽需要在多个用户之间共享。与资源丰富的云相比，MEC服务器通常具有有限的资源，并且不能满足所有用户的计算需求。因此，卸载决策和资源分配的联合优化是MEC系统中提高网络性能的一个重要研究问题。[七十一]. 这种联合优化在文献中得到了广泛的研究。[七十一, 二八九十四, 二八九十五]. 张等提出了用宏eNB、小型eNB和MEC服务器解决HETNET中的卸载决策和无线资源优化问题的三步算法。在第一步中，用户被分成三组，例如“卸载”、“本地执行”和“未指定”。其次，基于时延约束、无线资源和卸载能量增益，确定了用户的不同优先级。最后，根据它们的优先级将无线信道分配给移动用户。提出的算法 [二八九十四] 是迭代方案，其中迭代更新第二和第三步骤，直到满足收敛条件。进入 [二八九十四] 在小型eNB和宏eNB之间有一个回程，使得通过小ENB从用户卸载的计算由于有限的回程容量而招致额外的延迟。不同于 [二八九十四] Pham 等进入 [七十一] 优化了无线接入和无线回程传输之间的卸载决策、回程划分因子以及MEC服务器上的计算资源。针对NP难问题，提出了一种迭代算法，其中基于匹配理论的思想找到了卸载决策，并且资源分配问题是凸的和可分解的。进行的结果 [七十一] 指出在无线回程中，带宽划分对于计算MEC中的卸载至关重要。另一方面研究了计算卸载和资源分配的联合问题。[二八九十五]. 在资源类型方面，作者考虑了移动用户的上行子信道、移动用户的发射功率以及MEC服务器上的计算资源。不像 [七十一, 二八九十四] 卸载策略 [二八九十五] 制定了一个分布式的潜在游戏。基于卸载决策，提出了两种解决子信道分配的方法：考虑用户之间的干扰，基于匈牙利方法和图着色方法，在用户之间不存在干扰和分数频率重用的统一零频率重用方法。

为了实现密集的HET MEC网络的潜在利益，一个新的技术挑战是移动性管理。根据 [二八九十八, 二八九十九] HET MEC系统中的移动性管理有几个关键问题。首先，当用户在不同的小规模和小覆盖的小蜂窝/MEC服务器上移动时，用户可能经历频繁切换，从而增加开销并中断MEC服务。事实上，切换允许用户从源到目标MEC服务器传递它们的连接，同时保持连续的计算并确保QoS。然而，在小小区MEC服务器之间频繁切换可以增加切换失败，并且对于高移动性用户可能是不必要的。[三百]. 其次，在密集的HET MEC系统中不断发现切换测量和处理需要发现新的目标MEC服务器，这是功率和无线电资源消耗，特别是对于电池受限的用户。第三，在传统的密集HETNET中，切换决策主要基于用户和潜在的eNB之间的无线信号质量。事实上，在密集的HET MEC系统中使用传统的切换决策准则是不合适的，因为（i）使用MEC服务既需要无线电和计算资源，又（ii）在正常和MEC服务器之间需要共享稀少的无线电频谱；（iii）MEC系统中存在新的挑战，例如异构计算能力和各种计算工作负载。此外，由于缺乏未来的信息，例如信道条件、可用的计算资源、任务到达，卸载和切换决策应该在没有先验信息的情况下被知晓并以长期的方式被优化。[二八九十七]。

由于其重要的重要性，在文献中已经提出了大量的工作来解决传统密集HETNET中的移动性管理的挑战。[二八九十八, 二八九十九, 三百, 三百零一, 三百零二, 三百零三, 三百零四, 三百零五]. 例如，在密集HETNET中提出了两种本地化的移动性管理方案。[二八九十八] 研究了一种基于缓存的MMWET微波HETNET移动性管理框架。[二八九十九] 讨论了各种节能电池发现技术。[三百零一] 对移动管理进行了全面回顾。[三百零二] 并介绍了分布式移动管理的应用。[三百零三]. 虽然有趣，工作的身体 [二八九十八, 二八九十九, 三百, 三百零一, 三百零二, 三百零三, 三百零四, 三百零五] 仅专注于HETNET中的移动性管理。考虑密集型HET MEC系统中移动性管理的挑战 [二八九十七] 优化关联（MEC服务器被选择用于远程执行）和切换（即，当需要任务迁移）时，以最小化长期能量预算约束的平均延迟。仿真 [二八九十七] 指出在没有完整的未来信息的情况下，所提出的高效节能移动性管理算法在保证长期能量预算约束的前提下，仍能获得接近最优的性能。

## VII—C2多服务器HET MEC

多服务器HET MEC系统中的多样性为用户提供了更好的机会来接收更好的MEC服务，但同时引入了新的技术问题，包括服务器选择、服务器协作和服务迁移。[三].



(UA)的概念。目前，服务器选择主要有两个方向：(i) *用户联想*当移动用户处于多个MEC服务器的覆盖范围内时，(ii) *服务器选择*当MEC和云服务器的合作需要处理异构计算。进入[64][65]针对具有单用户和多个MEC服务器的MEC系统，研究了本地CPU频率和计算卸载的联合问题。目标是最小化计算开销，该计算开销被定义为总能量消耗和执行等待时间的加权和，并且约束确保每个计算任务只能由一个MEC服务器处理。由于NP难问题，采用穷举搜索法求解最优解，提出了一种基于半定松弛法的多项式时间近似最优解和低复杂度求解方法。特兰 等进入[306][307]探讨了服务器选择和资源分配的问题，其中资源是子信道用于卸载计算到目标服务器，移动用户的发送功率，以及在MEC服务器上的计算资源。主要的挑战来自二进制计算卸载和子信道分配，这使得优化问题NP困难。为了解决这些问题，作者将底层问题分解为两个较小的计算卸载和资源分配问题，并分别提出了一种新的启发式方法和凸优化技术来求解这两个子问题。仿真结果表明，考虑到多个MEC服务器，即使在小区间干扰的存在下，也可以改进与该方案相比的性能，其中在每个MEC服务器上独立地优化计算卸载和资源分配。这项工作进一步改进。[44][45]利用匹配理论实现了卸载决策和子信道分配。结果表明，该算法能够在保证收敛性和性能差异的情况下，以分布式的方式找到卸载决策。最近，在MEC的小小区网络中进行了相关的研究，例如，利用遗传算法和粒子群优化相结合的方法解决了卸载决策和资源分配的联合问题。[307][308]并研究了一种分布式卸载方案。[309]

受MEC和MCC两种互补技术的启发，最近提出了几种解决计算模式缺陷的方法，并从计算卸载的角度进一步提高了用户性能。[41][310]. 进入[311][41][311]提出了集中式云和分布式MEC服务器共存的混合光纤无线（FiWi）网络的总体结构。具体而言，FiWi网络包括两部分，包括（1）在用户和中心云之间连接的光学回程，（2）前端段，为用户提供无线访问。此外，采用所提出的网络架构，作者研究了协作计算卸载方案，其中计算可以卸载到分布式MEC服务器或集中式云服务器。推广了具有MEC能力的FiWi网络的设计。[312]. 为了说明MIEC在FiWi网络上的应用，对无线前端（无线局域网、4G LTE、LTE-A HETNET）三种典型的RAN技术进行了讨论。此外，提出了一种基于H2H和MEC业务共存的两层时分复用的资源分配方案，其中第一层设计为光回程段，第二层调度移动用户的传输。最近的一些研究扩展了这项研究。[312]资源管理[313][314]虚拟化FEWI网络与MEC[315]概念证明的论证[316]一种新的面向对象技术的MEC体系结构[317]. 其他最近的研究[317][318][319]在MEC服务器和远程云的三层MEC设置中导出卸载决策和资源分配。具体地说，在[317]制定了一个优化问题，以最小化总的系统成本，被定义为总能量消耗、卸载和处理成本以及传输和处理延迟的加权和。这个问题在[318]对于多用户MEC设置和[319]针对多用户多任务场景。由于所考虑的问题都是非凸的，因此通常是NP难的，因此采用基于半定松弛和随机化映射方法设计的启发式算法求解卸载决策。

b) *服务器协作*：传统上，MEC概念没有描述不同MEC服务器之间的协作和协同。由于每个MEC服务器的资源有限，仅通过一个服务器就难以处理来自大量移动用户的所有计算密集型任务。[320]. 超过MEC服务器的最大计算能力的计算必须卸载到集中式云，从而产生额外的等待时间和计算开销。因此，依赖于单个MEC进行计算可以限制MEC系统的性能。近年来，在文献中已经提出了一些关于协同MEC的研究工作。[319][321][322]. 进入[319][321]三个MEC案例研究展示了MEC服务器之间协作的好处，包括移动边缘编排、协作视频缓存和处理以及两层干扰消除。作者还提供了一些挑战和开放的研究问题，在协作MEC，如资源管理，互操作性在不同的MEC基础设施供应商，以及服务发现和同步。王 等进入[322]提出了一种新的车辆网络边缘计算框架。由于SDN提供了许多优点，例如，部署和开发新业务的低成本、网络状态的全局知识以及以厂商独立的方式进行控制的能力，因此作者提出使用SDN来控制协作MEC的操作。为了使MEC协作的概念成为现实，NFV、SDN、智能协作网络、Band链被识别为协同车辆边缘计算框架的三个使能技术。

最近，Ndikumana 等进入[322]指出在处理大数据和边缘分析时，MEC系统中出现了各种各样的问题和挑战：（i）用户卸载其计算任务并与有限或无限流的MEC服务器对应，（ii）需要附近的MEC服务器之间的协作以减少用户和远程云之间的数据交换和处理大数据，以及（iii）大数据MEC需要集成通信、计算、缓存和控制的新模型。为了解决这些挑战，作者首先提出了一种新的算法来将MEC服务器分组到不同的协作空间中，这是基于重叠k-均值法的。[323]. 在每个簇内，提出了一个优化问题，以最大限度地节省带宽和最小化总延迟，这是很难解决的，因为它的非凸性。而不是最优地解决问题，应用块连续上限最小化（BSUM）来实现能够以次线性收敛速度收敛的次优解。这项工作[324]自驾车汽车，其中MEC服务器部署在路边单元（RSUS）。结果表明，所提出的算法[324][325]与现有方案相比，可以减少总时延。基于协同MEC的概念，最近已经提出了若干研究，例如，协作缓存分配和计算卸载，其中MEC服务器与附近的邻居协作以执行计算和缓存。[325]一种自适应比特率视频（ABR）缓存和处理方案，其中MEC服务器与其他人合作，用于缓存和转码ABR视频。[326]智能城市协同边缘计算的一种新的可生存虚拟网络嵌入框架[327][328]基于联盟博弈理论框架，设计了一个社会信任的超密集边缘计算网络平台，允许用户选择目标小的eNB，并在MEC服务器之间设计安全感知的激励协作。[329].

c) *服务迁移*：MEC系统中的一个关键问题是网络边缘的动态，这主要是由用户移动性和小规模MEC服务器的有限覆盖引起的。当移动用户从源MEC服务器的服务覆盖范围移动到其他时，有两个选项来确保服务连续性。[330]（1）从源MEC服务器迁移到接近当前用户位置的目标服务器，（2）继续在源MEC服务器上执行计算，然后通过目标MEC服务器将结果转发给用户。一方面，计算迁移具有保证MEC服务连续性和改善用户QoS（例如，较低延迟）的优点。另一方面，必须为计算迁移支付额外的成本，例如迁移执行成本、向目标MEC服务器的激励支付以及由于无线电资源使用而导致的传输成本。由于以下原因，计算迁移中出现了一些挑战[331]. 首先，计算任务何时从源服务器迁移？下一步，当需要计算时，目标服务器是执行任务的目标服务器吗？这个问题变得非常具有挑战性，因为超密集部署小规模MEC服务器预计在5G网络和其他。最后，如何处理计算迁移？当考虑到各种QoS要求时，这是关键的，并且考虑QoS改善和迁移成本之间的折衷。计算迁移的原理在Fig.中得到了说明。[33]，其中移动用户最初卸载到源MEC服务器。当用户移动到接近新服务器的新位置时，从源到目标MEC服务器的计算迁移是确保MEC服务连续性。

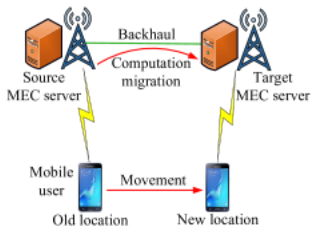


图13：计算迁移说明

的计算迁移问题转化为马尔可夫决策过程（MDP）。[332]其中，移动用户遵循1-D非对称随机游走移动模型。虽然提出的问题的最优策略是通过MDP的标准算法来解决的。[332]后来扩展到[333]推导基于阈值策略的机制[333]考虑一般成本模型、2-D移动性模型和应用到真实世界的跟踪，以及[334]删除马尔可夫假设并处理动态服务到达和离开。进入[335]针对MEC中的计算迁移问题，提出了三层框架。传统的框架包括两层，即基础层和实例层，而另外的应用层具有应用程序的空闲版本和任何特定于应用程序的数据，以减少迁移停机时间。所提出的三层的主要优点是，它是基于现有技术（例如，虚拟机和容器）设计的，从而可以在没有任何内部修改的情况下快速部署新的计算迁移。有关边缘计算中的服务迁移的更多细节，感兴趣的读者可以参考最近的调查报告。[331]。

## VII- D 教训和潜在的作品

由于MEC和HETNET所提供的巨大好处以及它们的互补性质，相信MEC和密集HetNet的结合是不可避免的。虽然密集的HET MEC系统中的各种问题和问题已被深入研究，但仍有若干挑战。在下文中，我们讨论了一些挑战，在密集的HET MEC系统，并勾勒出开放的研究方向。

- *计算复杂度和信令开销*显然，与分布式方法相比，集中式优化通常容易实现，并且可以提供具有期望性能保证的最优/接近最优解。然而，由于移动用户、eNBS和MEC服务器数量的激增，这种集中式方法是不可扩展的。因此，需要一种轻量级和有效的算法。在这些方案中，分布式方法可以提供许多好处，因为它不需要任何中心实体，并且算法仅基于本地信息或少量信令开销。然而，由于缺乏完整的信息，很难用分布式的方法来保证解决方案的最优性。因此，需要在计算复杂度和解最优性之间进行权衡。一种有效的方法是将整个网络分解成多个区域，并将执行该算法的责任分配给分布式MEC服务器，也就是将底层问题分解成子问题，这些子问题在不同的MEC服务器上分布式地执行。这将大大减少中心实体和所有用户之间需要交换的信息量，因此，网络开销也会降低。
- *移动性管理*在考虑用户移动性的同时，通过计算卸载来确保移动用户的利益是一个具有挑战性的问题。大多数现有的研究（密集的HET-MEC）系统忽略了用户移动性的影响，因为它的困难和难处理性。由于移动性，用户可以在使用MEC服务时改变其位置，例如，它们可以移出其源MEC服务器的覆盖区域，并且处于其他服务器的服务覆盖范围。在这种情况下，MEC需要知道用户移动性，以维持服务连续性。这是重要的，因为有各种类型的用户具有不同的移动性水平，包括静态用户（例如，环境传感器）、低移动性用户（例如，行人用户）和高移动性用户（例如，高速列车）。处理用户移动性的一个可能的解决方案是使MEC服务器连续更新用户上下文，然后设计上下文感知算法。而不是使用单镜头优化，长期优化可以用来解决用户移动性的挑战。为了说明这一点，我们考虑以下移动用户的示例，该移动用户位于远离MEC服务器的位置。计算卸载决策的短期优化不是卸载，即局部执行。然而，固定该短期决策并不总是最优的，因为用户可以移动到具有更好信道质量的新位置。此外，短期卸载决策不仅影响即时性能，而且影响长期能量预算。综上所述，密集型HET MEC系统的移动性管理研究空间很大。
- *干扰管理*从密集的HETNET继承，在密集的HET MEC系统的干扰管理的挑战仍然需要解决的原因很多。首先，用户、eNBS和MEC SUPER的超密集部署使得任何两点之间的距离变短，因此，干扰变得更严重，从而降低整体性能。第二，移动用户和MEC服务器的异构性使得由于上行链路中的用户的各种发射功率预算和下行链路中的MEC服务器的干扰问题更具挑战性。其次，各种计算任务特性要求用户在访问无线电和MEC资源时有不同的优先级。最后，干扰管理与其他领域高度耦合，如资源分配和网络规划。因此，将结合高密度HETNET和MEC系统的特征的更复杂的干扰管理方案对于提高MEC服务的用户QoS将是非常需要的。
- *无线回传*在HET MEC中，大部分的研究工作都是在两个小型eNB和宏eNB之间进行有线回程链路的假设，从而忽略了回程传输时延。在论文写作的时候，只有一个研究集中在无线回程的MEC上。[34]然而，在该文献中的网络设置是简单的，包括一个小的eNB和一个位于宏eNB的MEC服务器。这项工作作为作为一个更复杂的框架的基础研究，例如，扩展到密集的HET MEC系统和考虑混合无线和有线回程链路。

## 八MEC与机器学习

本节回顾了机器学习（ML）的基本原理及其在无线通信和网络环境中的优点。然后，我们回顾ML在解决各种MEC问题中的应用：边缘缓存、计算卸载、联合优化、安全和隐私、大数据分析和移动群集感测。最后，我们指出了一些挑战和潜在的研究方向，以激励进一步研究ML在MEC中的应用。

### 维亚亚无线网络中的机器学习综述

机器学习源于模式识别和计算机能够在不被明确编程的情况下学习的概念。最近，ML已经被应用于无数的应用中，例如，虚拟个人助理、视频监控、社交媒体服务、电子邮件垃圾邮件和恶意软件过滤、搜索引擎结果精炼和产品推荐。机器学习算法越来越多地被使用有几个原因：1）ML使系统能够自动适应和定制自己的个人用户，2）ML可以从大数据库中发现新知识，3）ML可以模仿人类并替换某些单调的任务，这需要一些智能，4）ML可以开发手工构建的困难和昂贵的系统，因为它们需要特定的具体技能或知识，调谐到特定的任务，最后5）计算能力的巨大增长，可用的算法和理论发展的研究者的进步，以及越来越多的行业支持。一般来说，ML被分为三种核心类型：无监督学习、有监督学习和强化学习。在监督学习中，训练数据包括输入和标签（输出），并且目标是估计将已知输入映射到已知标签的未知模型，而在无监督学习中，训练数据不包括标签，因此目标是学习一组未知输入的更有效表示。[336]. 在强化学习中，代理没有被告知采取什么行动，而是不断地与环境互动，并试图遵循一个良好的政策，从而获得最佳回报。[337, 336]. 深度学习（DL）已经被引入作为一种突破性的技术和机器学习的巨大进步，可以实现更简单的基于更高级别的表示。深度学习的工作原理与人脑处理信息和学习的方法相似，并以统计学和应用数学为基础。[338]. 图中示出了机器学习在移动和无线网络中的分类和应用，以及MEC和其他边缘计算范例。[14]. 最近，机器学习的一些调查和教程[339]深邃的学习[340]（深）强化学习[341, 342, 343]及其在通信和网络中的应用[344, 345, 346]已经出来了，读者可以参考上述文献以获得更多的细节。

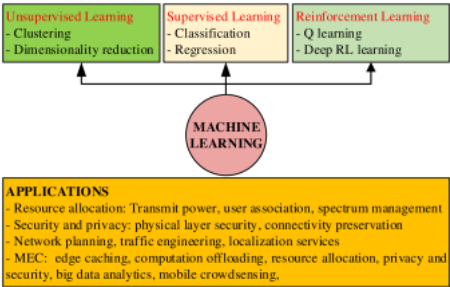


图14：移动通信和无线网络中ML的分类与应用

由于无线通信和网络的迅速发展，一般认为人工智能特别是ML将在下一代无线网络中起到至关重要的作用（即5G网络及其他）。[347, 348]. 一般来说，ML可以提供以下优点：





米，在无线网络中自然地学习到数据的重要性（移动数据是巨大的（即，数据量非常大并且预期在未来几年内增加），2）移动数据以递增的速率（来自移动宽带服务的数据）产生，3）移动数据是非平稳的（即，数据有效性的持续时间可以相对短），4）移动数据质量不保证（即，所收集的数据可以是低质量的和有噪声的），和5）移动数据是异构的（即，数据可以从许多来源产生，例如移动用户和物联网设备，并且在不同类型中）。[三百四十九]. 例如，ML和神经网络可以用于信道估计和信号检测。[三百五十，三百五十一]基于信道状态信息的定位[三百五十二，三百五十三]和信道解码[三百五十四]这都表明ML是无线通信中一种很有前途的工具。

- 第二，无线网络的设计和优化在没有已知信道和移动性模型的情况下是足够有挑战性的。在这样的网络中，通常用于资源分配、移动性预测和干扰管理的常规优化技术通常以离线、启发式或迭代的方式执行，这不能保证性能最优或不适合于动态和时变系统。最近，ML被认为是一种很有前途的工具，用于无线网络中的各种问题，使得网络操作可以随着时间的推移通过学习优化，从而不断提高网络性能。例如，在4G蜂窝网络中，可以使用ML来控制发送功率来管理上行链路干扰。[三百五十五]这表明上行链路数据速率有了显著的改善。

- 第三，新兴的5G网络及其超越不仅支持通信，而且还支持计算、缓存和控制，因此4C（例如，通信、计算、缓存和控制）的联合优化由于大的状态和动作空间、异构网络设备和各种QoS要求而变得极其复杂。在这种情况下，ML能够提供在线和/或完全分布式的算法。此外，无模型无线网络引入了各种问题的信道建模，问题的制定，以及封闭形式的解决方案，但是，可以有效地解决ML方法。

- 接下来，ML应该部署在IOT设备级和大规模分布式网络上，而不侵犯用户的数据隐私。在2017，谷歌引入了一种附加的ML方法，称为“联合学习”，它使单个设备能够在保持本地数据的同时，协作地学习共享预测模型，从而提高了训练效率和数据隐私。由于网络将是高度密集和异构的，联合学习有望成为超越5G蜂窝网络的主要工具。Android系统中谷歌学习板中联合学习的应用[三百五十六]在采用联合学习的无线网络中，存在着广泛的应用和问题。例如，在超可靠低延迟（URLLC）车辆网络中[三百五十七]联邦学习使得每个车辆用户能够从本地可用的训练数据估计网络队列长度的尾部分布，这可以实现非常高的精度并且减少交换数据的量79%。

- 最后，由于边缘计算将在提供低延迟动作中发挥重要作用，并且大多数智能应用将部署在网络边缘，边缘学习的出现是不可避免的。一方面，利用边缘学习从大量的移动数据中提取有用的信息可以扩展小型IOT设备的能力，并能够在边缘处部署计算密集型和低延迟的应用。[三百五十八，三百五十九]. 另一方面，边缘学习可以通过学习模型复杂度和训练时间之间的权衡来规避云AI和设备AI的缺点。[三百六十].

## VIII—B用于多址边缘计算的机器学习

优化MEC面临的几个挑战缓存布局，分配无线电和计算资源，分配计算任务，以及联合优化的4C资源。现有文献已经研究了与ME有关的一些问题，例如ME，例如计算卸载。[三百六十一，三百六十二，一百三十二，三百六十三，三百六十四，三百六十五，三百六十六，三百六十七]缓存[三百六十八，三百六十九，三百七十，三百七十一，三百七十二，三百七十三，三百七十四]联合4C优化[三百七十五，三百七十六，三百七十七，三百七十八，三百七十四，三百七十九]安全与隐私[三百八十，三百八十一，三百八十二，三百八十三，三百八十四，三百八十五，三百八十六，三百八十七，三百八十八]大数据分析[三百八十九，三百八十四，三百八十五，三百四十九]和移动人群感知[三百九十]. 在下文中，我们总结了相关的ML的方法在这些方面的应用的艺术。

### VIII—B1边缘缓存

集中的信息管理和有限的无线接入和回程连接的能力推动了网络边缘高速缓存的发展。对移动边缘缓存的研究主要集中在缓存、缓存和缓存三个方面。[二十]. 在缓存位置方面，最新技术表明，所请求的内容可以在宏eNB、小eNB和/或最终用户缓存，其中附近移动设备的存储资源被用于内容缓存，而设备到设备（D2D）通信用于内容检索。[三百九十一]. 为了决定要缓存什么，最著名的度量之一是内容流行度，该内容被定义为特定内容的请求数量与特定区域内的所有用户在一段时间内的请求总数的比率。调查报告[二十]显示了五种主要的算法：内容替换策略，如最不频繁使用（LFU）和最近最少使用（LRU）、基于用户偏好的策略、基于学习的策略、非合作缓存和协作缓存。

随着内容的普及是时变的，不能预先知道，在边缘计算网络中，基于机器学习的缓存策略的研究工作越来越多。由于DRL能够在没有任何预定义的网络模型和明确的假设的情况下自动学习缓存策略，因此现有的大部分工作都专注于DRL的主动缓存应用。例如，作者在[三百六十八]探讨了边缘缓存的关键挑战，并回顾了与基于学习的缓存策略和算法相关的最新技术。他们表明，移动边缘缓存方案可以分为两种主要方法：*基于流行度预测的方法*其中，流行度估计和缓存策略是分开学习的，*基于强化学习的方法*这两个术语是作为一个整体来处理 and 学习的。其他基于（深度）强化学习的缓存算法的研究可以在[三百六十九，三百七十二，三百七十三，三百七十四，三百九十二，三百九十三]. 以上文献中的所有实验结果证明了增强学习算法在平均缓存命中率、训练精度和能量成本方面与基线方法如LFU、LRU和FIFO（先进先出）相比的有效性和巨大性能。除了历史数据之外，还可以广泛地利用移动用户的社会和地理数据之间的相关性来提供更准确的内容流行度预测。因此，作者在[三百七十一]提出了使用大数据分析技术来推进边缘缓存设计，并通过Enb缓存和设备缓存两个案例研究证明了这些技术的有效性。尽管有很大的好处，大数据分析，特别是机器/深度学习机制，有几个挑战性的实施问题。[三百九十四]巨大的计算资源需要处理高维大数据，缺乏合适的预测模型，用于各种类型的DL模型，优化DL参数，例如，深度神经网络的深度，类型的层（例如，卷积，递归和完全连接的层），和学习速率。

### VIII—B2计算卸载

通过计算卸载，MEC有可能缩短等待时间，延长移动设备的电池寿命，减少交通拥堵。由于从用户角度计算卸载的重要性，因为它使资源贫乏的移动用户运行计算饥饿的应用和创新服务，如3D游戏和AR/VR/ASR，近年来已经看到了许多关于计算卸载的研究工作。在下面，我们将总结现有的基于ML的计算卸载问题。进入[三百六十二]作者提出了Ad Hoc移动云用户作为MDP的计算卸载决策问题。更具体地，在系统状态中考虑用户和云团之间的信道增益和用户和云团的队列状态，该动作是任务分配决策（即，本地处理多少任务和卸载到每个云团的任务），并且定义奖励函数以最大化用户效用并最小化所需支付的成本、能量消耗、延迟和任务丢失概率。仿真结果表明，在不同的任务到达率下，基于DQN的卸载决策算法性能良好。进入[一百三十二]作者提出了一种“热启动”Q-学习相结合的方法。——HooGooT Q学习技术利用类似场景中的经验来初始化Q函数值，以便在学习开始时节省探索时间。深入了解能量获取中物联网的计算卸载决策。在这项工作中，卸载策略包括目标MEC服务器的选择和卸载速率，即卸载到目标服务器的计算工作量，并且根据每个MEC设备的先前无线电带宽和所获取的能量的预测量以及当前电池电平来实现。在物联网中计算能量卸载的另一个研究是在能量收集中找到的。[三百六十七]. 工作在[三百六十三]将卸载决策问题归结为一个多标签分类问题，然后利用深度监督学习来最小化计算和卸载开销。仿真结果表明，与无卸载、随机卸载、总卸载和基于多标签线性分类器的卸载方案相比，所提出的基于深度学习的卸载方案平均可以将系统成本平均降低49.24%、23.87%、15.69%和11.18%，并且可以实现更高的卸载精度。利用DQN算法解决了单服务器多用户MEC系统带宽分配和卸载决策的联合优化问题。[三百九十五]基于分布式DL的卸载算法[三百九十六，三百九十七]. 文学[三百六十四]联合研究了卸载策略（即，工作量被卸载到远程处理的集中式云）和自校正策略（即，MEC服务器的数量被激活）在能量收集MEC系统中，这可以通过后决策强化学习算法来学习。进入[三百六十五]DQN被部署为学习具有代表性的移动用户在超密集切片RAN中的卸载决策和能量分配。在所考虑的MDP框架中，状态的特征在于能量队列长度、计算任务队列、MU-BS关联和信道增益质量，并且即时奖励是任务执行延迟和计算任务下降的满意度的加权和，任务排队延迟，执行计算任务失败的惩罚，以及访问MEC服务的支付。工作在[三百六十六]利用强化学习联合考虑交通和计算卸载在雾计算中的工业应用。

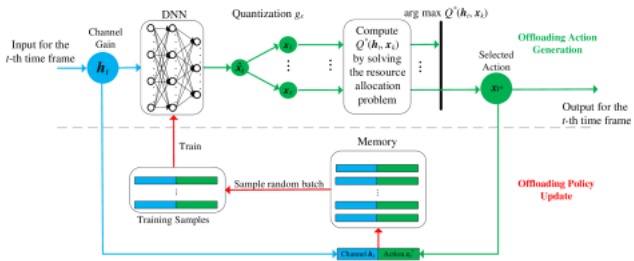


图15: 基于DRL的在线卸载算法体系结构 [3845]。

VIII- B3联合优化

由于1）需要联合4C优化来改善网络性能，2）传统方法不能有效地解决具有大动作和状态空间的优化问题，最近的MEC研究已经解决了关于联合4C优化的各种问题。例如，作者在[374]研究了两种用于车辆边缘缓存和计算的深度Q学习模型。为了减少原问题的计算复杂度，规避车辆的高迁移率约束，作者进一步提出了在两个不同的时间尺度上部署两个DQN模型。特别地，每个历元被划分成多个时隙，然后在每个时间段执行大时间尺度深Q-学习模型，而在每个时隙执行小时间尺度模型。我们注意到，多时间尺度控制的概念已经被应用于一些现有的研究工作，例如跨层优化。[98, 21]. 工作在[375]在单服务器MEC系统中优化了卸载决策和计算资源分配。为了解决NP-难非凸问题，并将所提出的算法应用于具有无线信道随机变化的动态MEC系统，研究了两种学习模型：一种是基于经典Q-学习，另一种是基于DQN方法。作者在[376]观察到现有的基于MEC网络的基于DRL卸载的工作考虑离散信道增益作为输入数据，因此在高量化精度的情况下遭受维数灾难和慢收敛。因此，他们提出了一种基于DRL的无线电力MEC系统中的计算卸载和资源分配的连续控制框架。如图Fig.所示15，提出的算法[376]由两个交互阶段组成：卸载动作生成和卸载策略更新。

- 卸载动作生成DNN的输出  $\mathbf{X}_T$  是一种宽松的卸载行为，因此不适用于二进制卸载。然后将放松的动作量化成多个二进制卸载动作。  $\mathbf{X}_K$ 。
- 卸载策略更新最佳卸载动作  $\mathbf{X}_T^* = \text{阿尔马克斯 } Q^* (H_T, \mathbf{X}_K)$  在量化的基础上，使用基于DRL的开创性工作来更新DNN。 [341]。

最近，有一些作品研究联合优化的计算，缓存和网络（即通信）。例如，工作在[377]研究了具有边缘缓存和计算能力的雾天IOT分层网络资源分配的联合优化问题。进入[378]作者提出了一种用于联网车辆网络的网络、缓存和计算的集成框架，并表明所提出的基于DRL的算法优于现有的静态方案和那些没有虚拟化、MEC卸载或边缘缓存的算法。除了边缘计算、网络缓存和D2D通信的集成外，工作还包括[379, 380]同时考虑移动用户之间的社会关系，以提高移动社交网络中资源共享和交付的可靠性和效率。他们认为移动用户的信任值是基于直接和间接观测的组合来计算的。仿真结果表明，与没有边缘计算、D2D通信和间接观测的DRL算法相比，DRL算法的有效性更高。

VIII- B4安全与隐私

许多挑战需要完全研究，以创建一个边缘生态系统，其中所有的网络参与者（即，物联网用户，服务/基础设施提供商，和移动运营商）可以从边缘服务中受益。下面的原因解释了为什么安全和隐私是最大的挑战。[99]. 首先，由于MEC有许多可行的技术，有必要不仅保护个人启用技术，而且协调不同的安全算法。第二，MEC的分布式特性导致许多新的网络情况，例如移动用户的异构计算能力和边缘设备之间的协作，需要新的安全机制。第三，在IOT这样的超连接网络中，大规模网络可能受到网络组件的安全威胁的严重影响。最后，有许多场景和方面可以受到隐私和安全威胁的影响，例如，由车载传感器和紧急应急系统生成的私有数据。在边缘计算范例中，有许多安全和隐私威胁，例如，无线干扰、拒绝服务、中间人、欺骗攻击、隐私泄漏、虚拟机操作和信息注入。[99, 382]。

近年来，MEC的安全性和隐私性在MEC中得到了多方面的研究。在边缘网络中使用深度学习来进行网络攻击检测。[381]实验表明，在学习精度、检测率和误报率方面，基于深度学习的模型优于浅模型。由于大多数现有的MEC安全解决方案是基于固定网络和攻击模型的，作者在[382]提出了基于不同增强学习的抗干扰移动卸载、物理认证和友好干扰的MEC安全机制。考虑移动用户与雾节点之间的无线信道的随机性和变异性，文献[383]研究了基于Q-学习的光纤陀螺物理层安全性，通过动态环境学习，提高了模拟检测攻击和接收机的准确性。工作在[386]研究了一种新的基于机器学习的隐私保护多功能数据聚合框架，以克服现有方法的缺点，即计算开销大、通信效率高、以及单个聚合函数计算。进入[387, 388]研究了MEC支持的IOT中的隐私感知计算卸载，其中决策后学习与标准DQN结合使用，以加快学习速度。

VIII—B5大数据分析





(ESI) 等不准确和延迟的状态信息。

- 评估通常根据安全/隐私增益和保护成本（例如，计算和通信延迟和能量成本）估计的奖励函数。

- 学习初期不良的安全政策（试错法的基础），可以通过迁移学习技术有效地解决。

- 隐私和性能增益之间的紧密耦合，因此需要优化隐私感知计算卸载和资源分配方案。

- 存储和计算负担由于大数据维数的诅咒。

- 资源受限的MEC服务器与大规模DL模型之间的折衷。

- 群集感测数据缺乏隐私和安全保护方案。

- 用于收集训练数据的高计算开销，即，DL模型需要大量数据来重新训练由于边缘动态而导致的学习模型。

- 缺少可部署在较低层设备上的高效DL方法，例如计算接入点[三百一十八]和移动用户，并检测污染或虚假数据。

表五：机器学习技术可以解决的关键MEC问题的总结。

## VIII—C挑战与未来工作

显然，ML技术将是移动和无线网络中的各种问题的重要工具，特别是在网络边缘的预测任务，以优化移动边缘缓存、计算卸载、增强大数据分析、以及保持网络安全和数据隐私。综述了机器学习技术在多址边缘计算中所能解决的关键问题。[Y](#)伴随着重大挑战。尽管基于MEC的MEC研究相当多，但仍有许多关键的开放性问题可以在未来进行研究。

基于机器学习的超密集MEC系统框架人们普遍预期无线和有线回程解决方案将在未来的无线网络中共存。仿真结果[54]结果表明，无线接入和无线回程之间的带宽分配在实现性能上起着重要的作用。在这种情况下，可以基于宏eNB部署基于ML的方法来基于移动用户的CSI和计算特性（例如输入数据的大小和计算强度）来预测适当的带宽划分因子。此外，超密集MEC系统中的一个关键问题是用户关联（即服务器选择）及其与其他方面的联合优化，例如计算卸载和资源分配。然而，用户关联、卸载决策和资源分配的联合问题通常是NP难非凸的，这在时变和动态环境中进一步加剧。在这样的网络中，DRL可以用来提供快速和接近最优的解决方案。

分层异构MEC中的分布式协同ML实现虽然ML在优化MEC资源的分配和增强网络操作方面具有许多潜力，但ML算法的中心实现面临着诸如学习复杂性、存储和计算资源的严重挑战，以及普适计算应用和大规模MEC系统的不适用性。一个潜在的解决方案是分布式ML，其中学习算法的计算被划分成较小的部分，然后这些计算被分配给分布式MEC服务器。然而，当使用分布式ML时，许多问题需要穷尽地回答：哪些计算部分可以被划分？如何将计算分为子任务？如何同步不同MEC服务器之间的输出？以及如何将子部件的输出集成到主模型的输出中？当学习代理（例如，MEC服务器）不能观察全局状态和动作时，分布式ML方法变得特别重要，并且只知道它的本地状态、奖励和动作。

事实上,当资源受限的MEC服务器集中地实现基于ML的机制时,计算能力和学习效率之间存在折衷。因此,在具有大量用户和大量训练数据的MEC服务器上很难有效地实现基于ML的算法。由于人工神经网络(ANN)由多个层(例如,输入、隐藏和输出层)组成的事实。[\[三百四十八\]](#)人工神经网络模型和层次化MEC体系结构应该结合在一起,其中整个ANN模型的直接层可以被卸载到MEC层并由MEC层执行(例如,宏eNB和小eNB的MEC),然后边缘学习的输出被传送到更高层次的云以进行进一步的处理。这种协作学习从减少训练数据大小、开发普适计算和保存用户数据隐私等方面提供了相当大的益处。此外,DL方法可以部署在MEC服务器上,以检测污染和/或伪造数据,从而提高数据质量。例如,李等进入[\[三百五十九\]](#)考虑了采用IOT设备的两层DL视频识别模型。由于MEC服务器与云服务器相比具有非常有限的资源,因此作者提出了确定在边缘层可以处理的最大计算任务数。

联邦学习及其在MEC中的应用传统的ML方法要求训练服务器收集单个设备生成的所有数据，并集中学习训练模型。大量的用户可以产生大量的数据，然而，用户可能不愿意与培训服务器和其他用户共享他们的数据。例如，这种共享信息可以是车载传感设备收集的 Any 类型的数据，包括摄像机、雷达、超声波和位置识别传感器。[\[四百零三\]](#) 此外，数据隐私不仅应用于车辆拥有者，还应用于车辆乘员。例如，由车载摄像头捕获的客户的图像/视频可以与集中式云共享，用于缓存预测模型。标准ML不是保护数据隐私的合适方式。联合学习使训练数据分布在单个用户上而不是集中式，从而使他们能够合作地学习共享模型，同时在本地保持自己的数据。[\[四百零四\]](#) 此外，联合学习能够解决分布式学习的主要缺点。[\[四百零四\]](#) (i) 缺乏时间和训练数据，(ii) 由于异构用户能力和网络状态而导致的低性能，(iii) 训练数据样本的不均衡数量，以及 (iv) 用户之间的非独立和相同分布的数据。

联合学习有望成为MEC中各种问题的有力工具。以计算卸载问题为例，大量用户试图将其计算卸载到MEC服务器进行远程执行。传统上，为了确定卸载决策，用户需要向MEC服务器报告其信息，例如信道增益、当前电池电平和计算特性。[\[三百七十六, 三百六十五\]](#)然而，这样的信息可以被窃听者揭示，并且可以非法使用来预测用户位置。应用联合学习，每个用户需要从MEC服务器下载主模型，然后只根据其本地信息学习卸载决策，MEC服务器只负责根据个人用户的更新来更新主模型。在这种方式中，联合学习可以保存数据隐私并提供分布式卸载决策，因此适合于大规模MEC系统。最近，作者在[\[三百五十七\]](#)应用联合学习估计UrLLC车辆通信中的队列尾分布及其应用[\[四百零五, 四百零六\]](#)提出了一种新的异构MEC系统自适应联合学习协议。

# 九杂项研究

## IX-AMEC与其他5G技术

除了可以与MEC系统结合的上述关键技术外，还可以将其他5G技术与MEC系统结合起来，以提高系统性能。在这些技术中，（大规模）MIMO和毫米波技术在能量效率、频谱效率、健壮性和可靠性方面提供了巨大的优势。在这一部分中，我们将重点研究（大规模）MIMO，以及MMWAVE技术与MEC系统的结合。



- 基于MIMO的MEC系统由于MIMO系统能够有效支持多用户在MEC系统中的卸载传输，为了深入挖掘多天线的信道质量，MIMO技术已被应用于MEC系统中。[\[四百零七\]](#), [\[四百零八\]](#). 可以得出结论，与SISO或MISO使能的MEC系统相比，MIMO使能的MEC系统可以节省移动用户更多的能量消耗。[\[十三\]](#). 研究了MIMO使能MEC系统的功率最小化问题。[\[四百零七\]](#)提出了一种联合优化发射功率、每个符号比特数和CPU周期的方法，以最小化移动侧的功耗。不同于幂最小化，作者在[\[四百零八\]](#)通过对MIMO使能的MEC系统进行联合优化，即多用户的预编码矩阵和多个用户的频率，来研究整个用户的能量消耗最小化。提出了一种基于连续凸逼近的迭代算法来求解局部最优解。此外，如果在MEC系统中利用MIMO，则可以更频繁地卸载计算。最近，作者在[\[四百零九\]](#)通过考虑信道状态信息和不完全CSI估计，研究MIMO基MEC的计算任务和通信资源分配问题。在这项工作中，最大加权能量消耗最小化所提出的最优和次优算法。

虽然对于MIMO使能MEC系统已经做了一些可数的研究工作，但在该领域仍有一些潜在的工作。一个潜在的工作是干扰管理。在更复杂的网络中，即多小区网络，可以利用MIMO来减轻小区间干扰。基于MIMO的MEC系统的另一个主要挑战是实现MIMO以平衡时延最小化和卸载数据速率最大化。例如，天线数目和预编码矩阵设计是进一步研究的重要问题。

- 基于大规模MIMO的MEC系统对于大规模MIMO在MEC系统中的应用，基于MEC服务器的基站可以配备大规模的天线系统。在从移动设备到BS的卸载传输中，移动用户基于估计的CSI发送导频。在下行链路传输中，计算结果将从MEC服务器下载到移动用户。BS发送导频波形。两种传输方案都能降低功耗。[\[四百一十\]](#).

大规模MIMO在MEC系统中的应用还存在一些挑战。高度依赖于空间复用MIMO的大容量MIMO可以提高数据的卸载和下载速率，通过优化波束形成可以相对减少任务延迟。开发基于大规模MIMO的MEC系统的低复杂度波束形成算法在5G中提出了可能的研究挑战。

### IX-A2基于MMWAVE的MEC系统

为了满足5G对数据速率的爆炸性增长需求，提出了一种提供千兆/s数据速率传输的毫米波。[\[四百一十一\]](#). 它被认为是有前途的技术在5G由于其高频率带（30千兆赫至300千兆赫）。为了提高MEC的计算能力，作者在[\[二百二十二\]](#)提出将MMWAVE和MEC系统集成到5G网络体系结构中。这种集成可以支持需要高数据速率卸载、低延迟和高移动性支持的应用。[\[四百一十二\]](#)在基于毫米波的MEC系统中仍然存在一些挑战和潜在的工作。

- 天线波束形成设计众所周知，MMWAVE冲刷严重的阴影。[\[四百一十三\]](#). 天线波束形成设计可补偿毫米波频率下的过多路径和穿透损耗[\[四百一十四\]](#). 一个合适的波束形成方案设计对于有效地改善系统性能具有重要意义。因此，在MEC系统中可以研究低复杂度波束形成算法，用于室外毫米波卸载和下载传输。
- 精确毫米波信道模型具有毫米波传输的系统需要适应信道的空间动态特性。如果在发射机和接收机上提供了完美的CSI，则可以获得最佳波束形成设计，以提高阵列增益。因此，适当的CSI估计设计是基于毫米波的MEC系统的重要研究兴趣。
- 联合计算与通信资源分配当MMWAVE应用于MEC卸载和下载传输时，资源分配对提高系统性能起着重要的作用。由于不同的信道模型，计算和通信资源优化是另一个潜在的研究工作。当它适用于更复杂的网络，例如异构网络时，这一点尤其重要。在性能提升和复杂度降低之间找到最优解或折衷是更具挑战性的。

### IX-BMEC测试平台及其实现

几乎所有现有的研究工作已经验证了思想，概念和算法的数值模拟。然而，已经有一些努力致力于实施MEC以及其他边缘计算范例在实践中。下面，我们来看看这样的研究。

### IX-B1基于单板计算机的边缘云

有很多方法来创建边缘服务器；然而，单板计算机作为边缘云的实现被认为是一种高效和成本有效的解决方案。单板计算机（SBC）的普及（例如，Raspberry Pi（RPI）、华硕修补板S、ARDUINO MEGA 2560、松树A64-LTS和香蕉PI M64）的普及是由于其低成本、低能量、足够的资源用于各种应用，不仅在教育领域广泛应用，而且在工业、爱好者、原型建设者和游戏玩家中广泛使用。[\[四百一十五\]](#), [\[四百一十六\]](#). SBCS的可用性引入了一种新的概念，即一次性计算，这样我们就可以在任何边缘服务不可用或当前边缘服务器被丢弃并且需要被新的服务器替换的任何位置部署SBCS作为边缘服务器。SBCS的另一个优点是它对应急应用和安全危机的潜在用途。例如，SBCS可用于立即构建用于部署在该位置的救援任务的边缘服务器，其中基础设施已经被自然灾害，例如地震、风暴、洪水摧毁。

埃尔哈蒂布等[\[四百一十七\]](#)考虑“微云”的概念，并使用四个度量来检查基于RPI的微云的适用性和性能权衡：服务等待时间、托管能力、内存写入/读取的成本和启动时间。实验评价[\[四百一十七\]](#)证明基于RPI的微云能够服务于足够大数量的用户，具有低延迟和启动时间，但是具有相对高的读写成本。然而，它表明，较新的RPI模型可以进一步降低成本与亚马逊弹性计算云相比。进入[\[四百一十八\]](#)作者提出了一种智能医疗信息系统的IOT边缘云框架，其中边缘服务器是由SBC构建的，它收集病人的信息以进行本地存储，处理收集的数据，并在必要时向医生生成警告消息。作者在[\[四百一十九\]](#)用OpenAirInterface实现MEC框架<sup>二二</sup>OpenAIR接口是一个开源的软硬件项目，致力于商用商用硬件上的5G蜂窝堆栈的开发。详情请访问[http://www. OpenActudio.org /](http://www.OpenActudio.org/). 并通过大量的实验结果评估了其原型框架与流式人脸检测的应用。已经进行了其他研究来实现SBCs在网络边缘上的各种应用：AR应用的快速准确的对象分析[\[四百二十\]](#)基于实时图像的实时视频目标跟踪[\[四百二十一\]](#)社会感应应用[\[四百二十二\]](#)和等待时间感知的视频分析[\[四百二十三\]](#).

### IX-B2用于边缘计算的轻量级平台

由于MEC和D2D通信都是卸载概念的应用。[\[十三\]](#), [\[四百二十四\]](#)，作者在[\[四百二十五\]](#), [\[四百二十六\]](#)与标准MEC相比，提出了不同的MEC体系结构，进一步提高了网络性能。提出了一种基于D2D的MEC体系结构。[\[四百二十五\]](#)其中每个中继网关可以充当本地云。此外，D2D通信被用于建立中继网关和移动用户之间的直接连接，以便提供边缘服务，并在两个相邻中继网关之间平衡它们之间的通信量和计算需求。工作在[\[四百二十六\]](#)介绍了一种新的概念“MEC D2D”，它包括多种计算和通信技术。更具体地说，*D2D MEC*启用移动用户与MEC服务器之间的直接链接，*相邻D2D*帮助用户与其他MEC服务器连接，如果他们不满意本地MEC服务器，*协作中继*可以扩展MEC服务，*常规MEC*通过配置的eNB向用户提供服务，以及*远程*云让所有使用互联网接入的移动用户使用云服务。实验结果表明，D2D和MEC的集成可以显著提高能量效率，并大幅降低响应时间。

王等[\[四百二十七\]](#)提出了一种基于单板服务器、轻量级虚拟交换和轻量级容器虚拟化的轻量级边缘计算平台。考虑到边缘服务的QoS需求和底层硬件的部署成本和状态，考虑了在网络边缘的服务部署的轻量级平台。[\[四百二十八\]](#). 为了评估所提出的边缘计算平台的性能，作者开发了RPIS作为边缘服务器，并且识别了一组系统参数，例如，可以同时的边缘服务器上部署的服务的数量和服务可以支持的用户的数量。工作在[\[四百二十九\]](#)提出了一种开放的运营商接口，提供公平的付费使用业务模型，并以分布式和自治的方式提供边缘服务。OCI是在NFV基础设施的网络服务提供商的中心办公室的顶部实现的，并且可以为许多延迟关键和带宽匮乏的应用获得良好的性能。

### IX-B3用于边缘计算的中间件











2019年-第2005页, 2018年3月。

- 〔159〕S. Zhang, Y. Zeng和R. Zhang, “蜂窝式无人机通信: 连通性约束下的轨迹优化”*2018 届IEEE 国际通信会议*, 堪萨斯城, 穆村, 美国, 五月2018。
- 〔160〕Y. Huang、J. Xu、L. Qiu和R. Zhang, “联合轨道和动力控制的无人机认知通信”*2018 IEEE 19 国际无线通信信号处理进展研讨会 (SPAWC)*, 卡拉马塔, 希腊, 2018月6日。
- 〔161〕M. Chen, W. Saad和C. Yin, “回声状态学习为无线虚拟现实资源分配在无人机启用LTE-U网络,”在*IEEE IEEE 国际通信会议 (ICC)*, 堪萨斯城, 穆村, 美国, 2018年5月。
- 〔162〕F. Zhou, Y. Wu, H. Sun和Z. Chu, “无人机支持的移动边缘计算: 卸载优化和轨迹设计”*2018 届IEEE 国际通信会议*, 堪萨斯城, 穆村, 美国, 五月2018。
- 〔163〕X. Cao, J. Xu和R. Zhang, “移动边缘计算的蜂窝连接Duav: 计算卸载和轨迹优化”, 在*2018 IEEE 19 世纪无线通信信号处理进展国际研讨会*, 卡拉马塔, 希腊, 2018月6日。
- 〔164〕伊万斯: “物联网: 互联网的下一代进化是如何改变一切的”*思科白皮书*4月2011日
- 〔165〕B.K.基姆, *互联网国际化: 影响与技术的共同演进*. 英国彻特纳姆市: 爱德华·埃尔加, 2005, OCLC: 249811959。
- 〔166〕*物联网综述*国际电信联盟, 2012, 推荐ITU-T Y.2060。
- 〔167〕A. Al Fuqaha、M. Guizani、M. Mohammadi、M. Aledhari和M·艾亚什: “物联网: 关于使能技术、协议和应用的调查”*IEEE 通信调查教程*, 第17卷, 第4期, 第2347页-第2376页, 第四季度2015页。
- 〔168〕J. Lin, W, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang, W. Zhao, 《网络事物的调查: 体系结构、使能技术、安全与隐私、应用》*IEEE 物联网网杂志*, 第4卷, 第5期, 第1125页-第1142页, 10月2017日。
- 〔169〕B. N. Silva、M. Khan和K. Han: “物联网: 对技术、架构和挑战的全面回顾”*技术概论*, 第35卷, 第2期, 第205页-第220, 2018页。
- 〔170〕Y- C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher, V. Young, “移动EggECMPUT:5G的关键技术”*ETSI White 纸*, 第11号, 第1—16页, 9月2015日。
- 〔171〕T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta和D. Sabella, “Onmulti访问边缘计算: 对新兴的5G网络边缘云架构和编排的调查”*IEEE 通信测量系统*, 第19卷, 第3期, 第1657页-第1681页, 第第三季2017页。
- 〔172〕B. Liang *移动边缘计算*. 剑桥大学出版社, 2017版, 第76页第91页。
- 〔173〕M. Agiwal, A. Roy和N. Saxena, “下一代5G无线网络: 综合调查”*IEEE 通信调查教程*, 第18卷, 第3期, 第1617页-第1655页, 第第三季2016页。
- 〔174〕S. Barbarossa、E. Ceci、M. Merluzzi和E.Calvina StimaTi, “使用毫米波链接进行有效的移动边缘计算”*IEEE IEEE 研讨会 (ICC 研讨会)*, 巴黎, 法国, 2017年5月。
- 〔175〕S. Barbarossa、E. Ceci和M. Merluzzi, “在MMW移动边缘计算中过度预订无线电和计算资源以减少信道间歇性的脆弱性”*2017 届欧洲网络与通信会议*, 奥卢, 芬兰, 2017月6日。
- 〔176〕B. P. Rimal, D. P. Van和M. Maier, “移动边缘计算集中云计算融合的FiWi接入网络,”*IEEE 网络与服务管理事务*, 第14卷, 第3期, 第498页-第513页, 9月2017日。
- 〔177〕F. Samie, V. Tsoutsouras, L. Bauer, S. Xydis, D. Soudris和J. Henkel, “计算卸载和资源分配的低功耗物联网设备”, 在*2016 IEEE 第三世界物联网论坛 (WF IOT)*, 雷斯顿, VA, 美国, 12月2016日。
- 〔178〕R. Roman, 洛佩兹和M. Mambo, “移动边缘计算, 雾等: 安全威胁和挑战的测量和分析”*未来一代计算机系统*, 第78卷, 第680页-第698页, 1月2018日。
- 〔179〕P. Garcia Lopez, A. Montresor, D. Epema, A. Datta, T. Higashino, A. Iamnitchi, M. Barcellos, M. Barcellos, 和, “边缘为中心的计算: 愿景和挑战”*计算机通信评论*, 第45卷, 第5期, 第37页-第42页, 10月2015日。
- 〔180〕J. Granjal、E. Monteiro和J. S. Silva: “物联网安全: 对现有协议和开放性研究问题的调查”*通讯调查指南*, 第17卷, 第3页, 第1294页-第1312页, 第2015章第2015页。
- 〔181〕Z. Yan、P. Zhang、A. V. Vasilakos: “物联网信任管理研究”*网络与计算机应用杂志*, 第42卷, 第120页-第134页, 6月6日。
- 〔182〕S. Li, L. D. Xu和S. Zhao, 《5G物联网: 调查》*工业信息集成杂志*, 第10卷, 第1页-第9页, 6月6日。
- 〔183〕N. Ansari和X. Sun, “移动边缘计算授权物联网”*IEICE 通信事务*, 卷E101-B, 第3号, 第604 - 619页, 第2018卷。
- 〔184〕S. Verma、Y. Kawamoto、Z. M. Fadlullah、H. Nishiyama和N. Kato, “大规模IOT数据实时分析和开放研究问题的网络测量方法”*IEEE 通信调查教程*, 第19卷, 第3期, 第1457页-第1477页, 第第三季2017页。
- 〔185〕X.孙和N. Ansari, “Edgeiot: 移动互联网的边缘计算”*IEEE 通讯杂志*, 第54卷, 第12期, 第22页-第29页, 第2016卷。
- 〔186〕N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi和T. Skeie, “移动边缘计算: Asurviy”*IEEE 物联网杂志*, 第5卷, 第1期, 第450页- 465页, 2月2018日。
- 〔187〕D. Sabella、A. Vaillant、P. Kuure、U. Rauschenbach和F. Giust: “移动EdgCeMcCuffy体系结构: MEC在物联网中的作用”*IEEE 消费电子杂志*, 第5卷, 第4期, 第84页-第91页, 2016年10月。
- 〔188〕G. Premsankar、M. D. Francesco和T. Taleb: “物联网的边缘计算: 一个案例研究”*IEEE 物联网杂志*, 第5卷, 第2期, 第1275—1284页, 4月2018日。
- 〔189〕G. Manogaran, R. Varatharajan, D. Lopez, P. M. Kumar, R. Sundarasekar, ANC. THOTA, “一种新的物联网和大数据生态系统架构, 用于保障智能医疗监控和警报系统,”*未来的计算机系统*, 第82卷, 第375页-第387页, 2018年5月。
- 〔190〕Y. Ai, M. Peng和K. Zhang, “互联网的边缘计算技术: 入门”*数字通信与网络*, 第4卷, 第2期, 第77—86页, 4月2018日。
- 〔191〕M. Capra, R. Peloso, G. Masera, M. Ruo Roch和M. Martina, “边缘计算: 对物联网世界中硬件需求的调查”*未来互联网*, 第11卷, 第4期, 4月2019号。
- 〔192〕C. Puliafito, E. Mingozzi, F. Longo, A. Puliafito, O. Rana, 《物联网迷雾计算: 调查》*网络技术交流会*, 第19卷, 第2页, 第18-1页-18:41, 4月2019日。
- 〔193〕J. Ni, X. Lin和X. S. Shen, “走向边缘辅助物联网: 从安全和效率的角度来看”*IEEE 网络*, 第33卷, 第2期, 第2019至第50页, 第2019卷。
- 〔194〕S. S. Gill, P. Garraghan和R. Buyya, “路由器: 基于雾的智能家居IOT设备的基于云的智能资源管理方法”*系统与软件杂志*, 第154卷, 第125页-第138页, 8月2019日。
- 〔195〕A. Yassine, S. Singh, M. S. Hossain和G. Muhammad, “IOT大数据分析为智能家居与雾和云计算,”*未来一代计算机系统*, 第91卷, 第563页-第573页, 2月2019日。
- 〔196〕M. Amadeo、A. Giordano、C. Mastroianni和A. Molinaro, *信息中心网络与雾计算集成在智能服务中的应用*. Cham: 斯普林格国际出版社, 2019, 第75页至第93页。
- 〔197〕P. Verma和S. K. Sood, “雾助IOT使智能家居患者健康监测”*IEEE 物联网杂志*, 第5卷, 第3期, 第1789 - 1796页, 6月2018日。
- 〔198〕FRIZ-M, P. Fraga Lamas, L. Castedo, “基于MQTT和ZigBee WiFi传感节点的IOT家庭自动化系统的设计、实现和实用评估”*传感器*, 第18卷, 第8期, 8月2018号。
- 〔199〕M. A. Rahman, M. M. Rashid, M. S. Hossain, E. Hassanain, M. F. Alhamid和M. Guizani, “基于SUP和IOT的智能城市共享经济服务认知框架”*IEEE 接入*, 第7卷, 第18页第611页-第18章621页, 1月2019日。
- 〔200〕Y. Liu、C. Yang、L. Jiang、S. Xie和Y. Zhang, “智能城市能源管理智能化”*网络工程*, 第33卷, 第2期, 第2019至第111页, 第2019卷。
- 〔201〕L. P. Qian, Y. Wu, B. Ji, L. Huang, D.H.K.Tang., “Hybridiot: 分层多址接入和计算卸载基于智能城市的集成”*IEEE 网络*, 第33卷, 第2期, 第2019至第6页, 第2019卷。
- 〔202〕L. Zhao、J. Wang、J. Liu和N. Kato: “智慧城市中的人群管理路径: 深层强化学习视角”*通讯杂志*, 第57卷, 第4期, 第88—93页, 4月2019日。
- 〔203〕T. Zhu、M.H.Yu和P. Riezebos, “智能研究框架”。*智能学习环境*, 第3卷, 第1期, 第4页, 2016年3月。
- 〔204〕A.N.PrATAMA, A. Zainudin和M. Yuliana, “实施基于iOFOT的乘客监测智能学校应用”, 在*2017 年国际工程技术与应用电子研讨会 (IES-ETA)*, 泗水, 印度尼西亚, 2017月9日。
- 〔205〕Z. Samia, D. R. Khaled和Z. Warda, “多智能体系统和本体支持智能学校管理系统”*2018 3RD- 模式分析与智能系统国际会议*, Tebessa, 阿尔及利亚, 十月2018日。
- 〔206〕A. Pacheco、P. Cano、E. Flores、E. Trujillo和P. Marquez, “基于深度学习和渗透式物联网计算的ASMARE教室”*2018 国际国民大会*, 波哥大, 哥伦比亚, 十月2018日。
- 〔207〕D. Amaxilatis, O. Akrivopoulos, G. Mylonas和I. Chatzigiannakis, “基于Aniot的解决问题的解决方案, 以监控能源效率为重点的教育建筑群”。*传感器*, 第17卷, 第10期, 10月2017日。
- 〔208〕H. Pinjari, A. Paul, G. Jeon和S. Rho, “上下文驱动的使用雾计算的移动学习”*2018 届平台技术与服务国际会议*, 济州, 韩国, 2018。
- 〔209〕S. K. Sood和K. D. Singh, “基于教育游戏的光学雾辅助EEG虚拟现实框架, 用于增强电子学习”*计算机在工程教育中的应用*, 第26卷, 第5期, 第1565页- 1576页, 9月2018日。
- 〔210〕Y. Chang和Y. Lai: “基于物联网路灯节点的校园边缘计算网络”*IEEE 系统杂志*, 2018, 在出版社。
- 〔211〕Z. Gao, Z. Cheng, X. Yang, H. Lu, M. Ye和W. Diao, “EcU:NealEngEngress Cype Engress Eng教育”, 在*2018 届第九届国际医学与教育信息技术会议*, 杭州, 中国, 十月2018日。
- 〔212〕O. Akrivopoulos, N. Zhu, D. Amaxilatis, C. Tselios, A. Anagnostopoulos和I. Chatzigiannakis, “一个以雾计算为导向, 高度可扩展的IOT框架, 用于监视公共教育建筑”*IEEE 2018 届国际通信会议*, KansasCity, 穆村, 美国, 2018年5月。
- 〔213〕A. M. Rahmani、T. N. Gia、B. Negash、A. Anzanpour、I. Azimi、M. Jiang、安普。Liljeberg, “在医疗保健网络边缘开发智能电子健康网关: 一种迷雾计算方法”*未来一代计算机系统*, 第78卷, 第641页-第658页, 1月2018日。
- 〔214〕X. Li、X. Huang、C. Li、R. Yu和L. Shu, “EdgCeal:用于移动医疗系统中的协同数据管理的边缘计算”*IEEE 接入*, 第7卷, 第22页第011页-第22章025页, 2月2019日。

于2019年9月7日生成，第13页，第117页，第401页-第409页，17/2019页。

- 〔216〕A. A. Abdellatif, A. Emam, C.F.CySalina, 穆罕默德, A. Jaoua, 安德鲁. Ward, “基于边缘的智能医疗系统的压缩和分类: 概念、实现和评价”*专家系统及其应用*, 第117卷, 第1页-第14页, 第2019期。
- 〔217〕S. Oueida、Y. Kotb、M. Aloqaily、Y. Jararweh和T. Baker, “基于边缘计算的智能医疗资源管理框架”*传感器*, 第18卷, 第12期, 第12卷2018页。
- 〔218〕X. Li, R. Ding, X. Liu, W. Yan, J. Xu, H. Gao和X. Zheng, “COMEC: 计算卸载基于视频的心率检测APP在移动边缘计算,”在*2018 IEEE ITCL CONF与应用并行分布处理、普适计算通信、大数据音频计算、社交计算网络、可持续计算通信 (ISPA/IUCC/BDCOLY/SCONALCOM/STECTCOM)*, 墨尔本, 澳大利亚, 12月2018日。
- 〔219〕3GPP, “增强3GPP对5G V2X服务的 supports的研究”, 12月2018, [在线; 06MAY-2019]上访问。在线可用 <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3108>
- 〔220〕K. Katsaros和M. Dianati 概念5G车载网络体系结构. Cham: 斯普林格国际出版社, 2017, 第595页至第623页。
- 〔221〕F. Giust、V. Sciancalepore、D. Sabella、M. C. Filippou、S. Mangiante、W. Featherstone和D. Munaretto, “多通路边缘计算: 驱动5G连接车的后轮驱动”*IEEE通信标准杂志*, 第2卷, 第3期, 第66页-第73页, 9月2018日。
- 〔222〕V. Frascolla, F. Miatton, G. K. Tran, K. Takinami, A. D. Domenico, E. C. Strinati, K. Koslowski, Pig, y, yand, and. Barberis, “5G MIGEDGE: 5GSTAREII技术的设计、标准化和部署: MEC和MMWAVE共同开发东京2020年奥运会”*2017 IEEE通信和网络标准会议 (CSCN)*, 赫尔辛基, 芬兰, 2017年9月。
- 〔223〕Y. Kabalcı5G移动通信系统: 基础、挑战和关键技术. 新加坡: 施普林格新加坡, 2019, 第329页-第359页。
- 〔224〕N. Bissmeyer, J. V. Dam, C. Zimmermann和K. Eckert, “基于ITS G5、LTE-V和移动EdgCeMePink的安全混合车辆通信”*AUM 2018 -汽车电子会议*, 多特蒙德, 德国, 2018三月。
- 〔225〕J. Zhao、L. Wang、K. Wong、M. Tao和T. Mahmoodi, “密集V2X网络中边缘计算的能量和延迟控制”*科尔*, VA.ABS/1807.023 11, 2018。在线可用[HTTP://ARXIV.ORG/ABS/1807.023](http://arxiv.org/abs/1807.023)
- 〔226〕L. Li, Y. Li和R. Hou, “一种新的基于移动边缘计算的未來蜂窝网络的体系结构”*2017 IEEE无线通信与网络会议 (WCNC)*, 旧金山, CA, 美国, 2017三月。
- 〔227〕A. Ferdowsi, U. Challita和W. Saad, “智能交通系统中可靠的边缘分析的深度学习: 综述”*IEEE车辆技术杂志*, 第14卷, 第1期, 第62页至第70页, 2019年3月。
- 〔228〕H. Ye, L. Liang, G. Y. Li, J. Kim, L. Lu, M. Wu, 《车辆网络的应用: 最新进展和应用实例》*IEEE车辆技术杂志*, 第13卷, 第2期, 第94页-第101页, 2018年6月。
- 〔229〕J. Hochstetler, R. Padidela, Q. Chen, Q. Yang和S.Fu, “Embeddeddeep学习车辆边缘计算”*2018 IEEE/ACME边缘计算研讨会 (SEC)*, 西雅图, 瓦城, 美国, 10月2018日。
- 〔230〕S. Wang、J. Wan、D. Zhang、D. Li和C. Zhang: “面向工业4的智能工厂: 一个基于大数据的反馈和协调的自组织多智能体系统”*计算机网络*, 第101卷, 第158页-第168页, 6月6日。
- 〔231〕布里托、S. Hoque、R. Steinke、A. Willner和T. Magedanz, “Applicationof对智能工厂和网络物理系统的雾计算范例,”*新兴电信技术交易*, 第29卷, 第4期, 第2018页E3184页。
- 〔232〕W. Sun, J. Liu, Y. Yue, H. Zhang, “基于双向拍卖的物联网移动边缘计算资源分配”*IEEE工业信息学报*, 第14卷, 第10期, 第4692页-第4701页, 10月2018日。
- 〔233〕X. Li, D. Li, J. Wan, C. Liu和M. Imran, “SDN基于工业网络的自适应传输优化算法”*IEEE物联网杂志*, 第5卷, 第3期, 第1351页至1360页, 6月2018日。
- 〔234〕G. Li, J. Wu, J. Li, K. Wang和T. Ye, “基于服务普及的智能资源分区, 用于雾计算, 使工业互联网成为可能。”*IEEE工业信息学学报*, 第14卷, 第10期, 第4702页-第4711页, 10月2018日。
- 〔235〕C. Lai, W. Chien, L. T. Yang和W. Qiang, “Lstm和边缘计算的大数据特征识别的工业电气设备,”*IEEE工业信息学学报*, 第15卷, 第4期, 第246- 2477页, 4月2019日。
- 〔236〕J. Xu、S. Wang、B. Bhargava和F. Yang: “移动链计算中的无障碍群体智能生态系统”*工业信息学IEEE交易*, 2019, 在出版社。
- 〔237〕B. Chen、J. Wan、A. Celesti、D. Li、H. Abbas和Q. Zhang, “基于物联网制造的EdgCeMePin”*IEEE通讯杂志*, 第56卷, 第9期, 第103页-第109页, 9月2018日。
- 〔238〕X. Li, J. Wan, H. Dai, M. Imran, M. Xia, A. Celesti, “边缘计算的混合计算解决方案和资源调度策略”。*IEEE工业信息学学报*, 2019, 在出版社。
- 〔239〕X. Li和J. Wan, “为边缘计算启用工业移动无线网络的主动缓存”*未来一代计算机系统*, 第89卷, 第89页-第97页, 第12卷2018页。
- 〔240〕A. H. Sodhro, S.Pirbululaland V.H.C.D.阿尔伯克基, “人工智能驱动的基于边缘计算的工业应用机制”*IEEE工业信息学学报*2019, 印记
- 〔241〕S. K. Sharma和X. Wang, “在无线物联网中使用协作边缘和云处理的实时数据分析”*IEEE接入*, 第5卷, 第4621页- 4635页, 第2017卷。
- 〔242〕IGILLT研究, “零售业MEC的商业案例: 在5G时代的TCO分析和IT简化”, 2017, [在线; 12月-2018年访问][在线]。可用 [HTTPS://BuueId.Inc.COM/DOCS/NETWorkBuffelds/Engult-案例-McQuin零售-A\\_TCO分析和ITS隐含-in -5G-Er.PDF](https://BuueId.Inc.COM/DOCS/NETWorkBuffelds/Engult-案例-McQuin零售-A_TCO分析和ITS隐含-in -5G-Er.PDF)
- 〔243〕B. Cheng, G. Solmaz, F. Cirillo, E. Kovacs, K. Terasawa和A. Kitazawa, “Fogflow: 在智能城市的云和边上的IOT服务的简易编程”*IEEE物联网杂志*, 第5卷, 第2期, 第696页- 707页, 4月2018日。
- 〔244〕X. Liu, Y. Jiang, P. Jain和K.H.基姆, “TAR: 使零售商店细粒度目标广告”, 在*第十六年度移动系统、应用和服务国际会议论文集*, 慕尼黑, 德国, 2018月6日。
- 〔245〕A. Harris, R. Snader和R. Kravets, “Aggio: 隐私保护的智能零售环境的优惠券安全”*2018 IEEE/ACME边缘计算研讨会 (SEC)*, 西雅图, 瓦城, 美国, 10月2018日。
- 〔246〕B. Hu, H. Xie, Y. Ma, J. Wang和L.J.张, “基于Band Stand和边缘计算的健壮的零售POS系统”*国际边缘计算会议*, 西雅图, 瓦城, 美国, 2018月6日。
- 〔247〕M. S. Hossain, G. Muhammad和S.U.阿明, “利用边缘计算和缓存提高智能城市的消费者满意度: 一个日期水果分类的案例研究”*未来一代计算机系统*, 第88卷, 第333页-第341页, 4月2018日。
- 〔248〕M. Erol Kantarci和S. Sukhmani, “在5G的移动增强现实和虚拟现实 (AR/VR) 的边缘缓存和计算,”*Ad Hoc网络国际会议*尼亚加拉大瀑布, 加拿大, 2018。
- 〔249〕L. Tao, Z. Li和L. Wu, “出路: 外包可穿戴计算到环境移动计算的边缘,”*IEEE接入*, 第6卷, 第18页第408至第18期第419期, 第2018卷。
- 〔250〕M. Vega Barbas, J.A.迪亚兹奥利瓦斯, K. Lu, M. Forsman, F. Seoane, 安德夫。“人类工效学平台: 面向可穿戴传感器和边缘计算的精确、普及和个性化人机工程学”*传感器*, 第19卷, 第5期, 第2019期。
- 〔251〕L. Cominardi, C. J. Bernardos, A.德拉奥利瓦, 安达. AZCORA, “为低延迟多媒体服务建模移动边缘计算部署”*IEEE广播事务*, 第65卷, 第2期, 第464 - 474页, 6月2019日。
- 〔252〕X. Yang, Z. Chen, K. Li, Y. Sun, N. Liu, W. Xie和Y. Zhao, “通信约束移动边缘计算系统的无线虚拟现实: 调度和权衡,”*IEEE接入*, 第6卷, 第16页第665页-第16章第677节, 第2018卷。
- 〔253〕Y. Sun、Z. Chen、M. Tao和H. Liu: “移动虚拟现实的通信、缓存和计算: 建模和权衡”*科尔*, VA.ABS/180608928, 2018。在线可用 [HTTP://ARXIV.ORG/ABS/180608928](http://arxiv.org/abs/180608928)
- 〔254〕M. S. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis和K. Doppler, “边缘计算满足毫米波启用的VR: 铺平了切割脐带的方法”*2018 IEEE无线通信与网络会议 (WCNC)*, 巴塞罗那, 西班牙, 4月2018号。
- 〔255〕Y. Li和W. Gao: MUVR: 支持资源受限边缘云的多用户移动虚拟现实*2018 IEEE/ACM边缘计算研讨会 (SEC)*, 西雅图, 瓦城, 美国, 10月2018日。
- 〔256〕C. Perera、C. H. Liu和S.JayavDENA, “从工业角度看新兴市场的互联网: 一项调查”*计算新兴课题IEEE交易*, 第3卷, 第4期, 第585页-第598页, 第2015卷。
- 〔257〕F. J. Ferr-S-NDEZ牧师, J.M.GARC, A, CAMZIZO, M. Nieto Hidalgo, J. Mora Pascual, J.Mura Mald’Nez, “利用物联网开发无处不在的传感网络平台: 在精准农业中的应用”*传感器*, 第16卷, 第7期, 第2016卷。
- 〔258〕X. Shi、X. An、Q. Zhao、H. Liu、L. Xia、X. Sun、Y. Guo: “保护农业的物联网状态”*传感器*, 第19卷, 第8期, 4月2019号。
- 〔259〕D. H. Fan和S. Gao“移动边缘计算在农业水监测系统中的应用”*IOP会议系列: 地球与环境科学*, 第191卷, 第012015页, 11月2018日。
- 〔260〕M.A.萨莫拉, 伊泽奎尔多, J. Santa, J.A.M.S.Nez, V.MaleNez, A. F. Skarmeta, “基于边缘和云计算的智能农业物联网平台”。*生物系统工程*, 第177卷, 第4页-第17页, 1月2019日。
- 〔261〕S.Tres, J. Torres Sospedra, S.S疤Belmonte, F.Z.ZalasaGa SoRIa, G.Z.Z.Z.P.O.T.Rez, J. Huerta, “在智能农业背景下开发开放感测平台: 一个形成霉菌的葡萄园支持系统”*可持续计算: 信息学与系统*, 2019, 在出版社。
- 〔262〕A. Boukerche和R.W.L.CutiNoO, “智能城市灾难智能检测和响应系统”*2018 IEEE计算机与通信研讨会Natal*, 巴西, 2018月6日。
- 〔263〕“M. Marjanovi”, “安东尼”, “P”, “移动众感边缘计算架构”*IEEE接入*, 第6卷, 第10页第662页-第10页第674页, 1月2018日。
- 〔264〕M. Durresi, A. Subashi, A. Durresi, L. Barolli, K. Uchida, “智能手机和物联网环境监测中的多址边缘计算安全通信架构”*环境智能与人性化计算杂志*, 第10卷, 第4期, 第1631页至1640页, 4月2019日。
- 〔265〕G. Xu, Y. Shi, X. Sun, W. Shen, 《海洋环境监测中的物联网: 综述》*传感器*, 第19卷, 第7期, 4月2019号。
- 〔266〕S. A. Zahra, I. Shafique和T. Farid, “物联网”灾害管理*计算机与数学科学杂志*, 第2卷, 第1期, 第77- 85页, 1月- 6月2018日。
- 〔267〕E.C.D.A. Oro, S.CeloMo, M. Gribaudo, M. Iacono, D. Manca和P. Piazzolla, “一个复杂的基于边缘计算的系统的建模和评估: 应急管理支持系统案例研究”*物联网*, 第6卷, 第100054页, 6月2019日。



的时边缘计算, *IEEE Access*, 2018. 在线可用<http://arxiv.org/abs/1810.09409>.

- 〔269〕M. R. U. A. Fiannurdin, S. Sukaridhoto, A. Tjahjono和D. K. Basuki, “作为移动传感器网络的IOT和大数据用于洪水灾害引起的波特尔检测的车辆”*IOP系列: 地球与环境科学*4月2019日
- 〔270〕L. Zhao, J. Wang, J. Liu和N. Kato, “基于IOT智能城市的最佳边缘资源分配”*IEEE网络*, 第33卷, 第2期, 第2019至第30页, 第2019卷。
- 〔271〕X. Cao, G. Tang, D. Guo, Y. Li和W. Zhang, “边缘联邦: 走向综合服务供应模型”*科尔, ABS / 1902.09055*2019。在线可用<http://arxiv.org/abs/1902.09055>
- 〔272〕K. Guo, Y. Lu, H. Gao和R. Cao, “基于人工智能的以用户为中心的智能城市的物联网”*传感器*, 第18卷, 第5期, 4月2018号。
- 〔273〕C. Chan和G. Wu, “Pivotal在4G部署中的异构网络角色”*中国中兴技术*一月2010日
- 〔274〕NGO和T. Le Ngoc *小小区网络体系结构及干扰管理*. 施普林格, 2014。
- 〔275〕V. Chandrasekhar, J. G. Andrews和A.采集器, “毫微微蜂窝网络: Asurviy”*IEEE通信美格*, 第46卷, 第9期, 第59页-第67页, 9月2008日。
- 〔276〕E. Mugume和D. K. C.这样说: “密集小区网络的频谱和能效分析”。*2015 IEEE第八十一车辆技术会议 (VTC Spring)*, 格拉斯哥, 英国, 2015年5月。
- 〔277〕M. Heath、A. Brydon和R. Wood, “微微蜂窝和毫微微蜂窝: 室内基站会改变电信业吗?”“*研究分析公司通用域名格式*, 2007
- 〔278〕M. Kamel、W. Hamouda和A. Youssef: “超稠密网络: 一项调查”*IEEE通信调查调查*., 第18卷, 第4页, 第2522页-第2545页, 第四节第2016页。
- 〔279〕M. Ding, H. Claussen, 和A. H. Jafari, “朝向1 Gbps / uein细胞系统: 理解超密集小细胞部署,”*IEEE通信调查教程*, 第17卷, 第4期, 第2078页-第2101页, 第四季2015页。
- 〔280〕C. Hartmann*蜂窝式FD/TDMA智能天线系统中的无线资源管理*. 赫伯特UTZ Velac, 2017, 第23卷。
- 〔281〕Y. Liu, L. Lu, G. Y. Li, Q. Cui和W. Han, “联合用户协会和频谱分配的小蜂窝网络与无线回程,”*IEEE无线通信信函*, 第5卷, 第5期, 第496页-第499页, 10月2016日。
- 〔282〕G. Nie, H. Tian, C. Sengul, P. Zhang, “前馈和回程优化节能高效OFDMA小蜂窝网络”*无线通信IEEE交易*, 第16卷, 第2期, 第1080页-第1093页, 2月2017日。
- 〔283〕T. M. Nguyen、A. Yadav、W. Ajib和C. Assi, “无线回程HETNET中的集中式和分布式能量效率设计”*无线通信IEEE交易*, 第16卷, 第7期, 第4711页-第4726页, 2017卷2017页。
- 〔284〕X. Zhang和J. G. Andrews, “下行链路蜂窝网络分析与多斜率路径损耗模型”*IEEE通信事务*, 第63卷, 第5期, 第1881页-第1894页, 2015年5月。
- 〔285〕D. Liu, L. Wang, Y. Chen, M. Elakashlan, K. Wong, R. Schober和L. Hanzo, “5G网络中的用户联想: 调查和展望”*通讯调查指南*, 第18卷, 第2期, 第1018页-第1044页, 第二季2016页。
- 〔286〕Y. Teng, M. Liu, F. R. Yu, V.C.M.Leon, M. Song, Y. Zhang, “超稠密网络资源分配: 调查, 一些研究问题和挑战”*IEEE通信调查教程*, 2018, 在出版社。
- 〔287〕C. Fan, Y.J.A.Z.和X. Yuan, “机器学习的异构超稠密网络与图形表示,”*ARXIV电子版*, 八月2018日。在线可用<https://arxiv.org/abs/1808.0447>
- 〔288〕V. Pham, 和W.J.Hug, “移动边缘计算授权异质网络: 一种新的架构和潜在的作品”*托运系统杂志*, 2018
- 〔289〕T. X. Tran, A. Hajisami, P. Pandey和D. Pompili, “5G网络中的协同移动EdgCeMetPo:新的范例、场景和挑战”*IEEE通讯杂志*, 第55卷, 第4期, 第54—61页, 4月2017日。
- 〔290〕S. Ranadheera, S. Maghsudi和E. Hossain, “移动边缘计算服务器的计算卸载和激活: 少数游戏”*无线通信信函*, 第7卷, 第5期, 第688页-第691页, 10月2018日。
- 〔291〕T. Z. Oo, N. H. Tran, W. Saad, D. Niyato, Z. Han和C. S. Hong, “Offloadingin hetnet: 一个协调减轻干扰, 用户协会, 和资源分配,”*IEEE移动计算事务*, 第16卷, 第8期, 第2276页-第2291页, 8月2017日。
- 〔292〕S. Sardellitti, G. Scutari和S. Barbarossa, “多小区移动边缘计算的无线电和计算资源的联合优化”*网络信号与信息处理IEEE交易*, 第1卷, 第2期, 第89 - 103页, 6月2015日。
- 〔293〕A. Al Shuwaili, O. Simeone, A. Bagheri和G. Scutari, “联合上行链路/下行优化的回程限制移动云计算与用户调度,”*IEEE信号与信息处理网络会议*, 第3卷, 第4期, 第787页-第802页, 第2017卷。
- 〔294〕K. Zhang、Y. Mao、S. Leng、Q. Zhao、L. Li、X. Peng、L. Pan、L. Pan、Y. 张, “5GHEY网络中移动边缘计算的能量有效卸载”*IEEE接入*, 第4卷, 第5896页-第5907页, 2016年8月。
- 〔295〕J. Zhang, W. Xia, F. Yan, L. Shen, “移动计算环境下异构网络联合计算卸载和资源分配优化”*IEEE接入*, 第6卷, 第19页第324页-第19章第337期, 第2018卷。
- 〔296〕Y. Zhao, V.C.M.Leun, H. Gao, Z. Chen和H. Ji, “基于多频带RF能量收集的移动边缘计算为基础的异构网络中的上行链路资源分配”*2018 IEEE国际通信会议 (ICC)*, 堪萨斯城, 穆村, 美国, 2018年5月。
- 〔297〕Y. Sun, S. Zhou和J. Xu, “EMM: 在超稠密网络中用于移动边缘计算的能量感知移动性管理”*IEEE通信领域选择杂志*, 第35卷, 第11期, 第2637页-第2646页, 11月2017日。
- 〔298〕H. Wang, S. Chen, M. Ai和H. Xu, “5G超稠密网络的本地化移动性管理”*IEEE车辆技术交易*, 第66卷, 第9期, 第8535页-第8552页, 9月2017日。
- 〔299〕O. Semiari, W. Saad, M. Bennis和B. Maham, “缓存满足毫米波通信增强5G网络的移动性管理,”*无线通信IEEE交易*, 第17卷, 第2期, 第779页至第793页, 第2页2018页。
- 〔300〕D. Lopez Perez, I.GuvuC, X. Chu, “3GPH网络中的移动性管理挑战”*IEEE通讯杂志*, 第50卷, 第12期, 第70页-第78页, 第2012卷。
- 〔301〕A. Prasad, O. Tirkkonen, P. Lund, N, O.N.C.YiMaz, L. Dalsgaard, ANC. WijTin, “用于LTE高级异构网络部署的能量有效的频率间小单元发现技术”: *通讯杂志*, 第51卷, 第5期, 第72页-第81页, 2013年5月。
- 〔302〕D. Xenakis、N. Passas、L. Merakos和C. Verikoukis: “LTE高级无线基站的移动性管理: 关键问题和切换决策算法综述”*IEEE通信调查教程*, 第16卷, 第1期, 第64页-第91页, 第一季度2014。
- 〔303〕F. Giust, L. Cominardi和C. J. Bernardos, “未来5G网络的分布式移动性管理: 现有方法的概述和分析”*IEEE通讯杂志*, 第53卷, 第1期, 第142页-第149页, 1月2015日。
- 〔304〕H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami, 和V.C.M.梁, “基于网络切片5G和未来的移动网络: 移动性, 资源管理, 和挑战,”*IEEE通讯杂志*, 第55卷, 第8期, 第138页, 第145页, 8月2017日。
- 〔305〕G. Qiao, S. Leng, K. Zhang和K. Yang, “异构网络中的能量收集小细胞的联合部署和移动管理”*IEEE接入*, 第5卷, 第183页-第196页, 2月2017日。
- 〔306〕T. X. Tran和D. Pompili, “多服务器移动边缘计算网络的联合任务卸载和资源分配”*IEEE车辆技术交易*, 第68卷, 第1期, 第856页-第868页, 1月2019日。
- 〔307〕F. Guo, H. Zhang, H. Ji, X. Li, 和V.C.M.梁, “能量效率计算卸载多址MEC使能小细胞网络”, 在*2018 IEEE通信研讨会国际会议 (ICCWorkSt 铺)*, 堪萨斯城, 穆村, 美国, 2018年5月。
- 〔308〕——“移动边缘计算的DelSELY部署小小区网络的高效计算卸载管理方案”*网络化IEEE/ACM交易*, 第26卷, 第6期, 第2651页-第2664页, 第2018卷。
- 〔309〕L. Yang、H. Zhang、X. Li、H. Ji和V.C.M.Leon, “结合移动边缘计算的小单元网络中的分布式计算卸载策略”*网络化IEEE/ACM事务*, 第26卷, 第6期, 第2762页-第2773页, 第2018卷。
- 〔310〕H. Guo, J. Liu和H. Qin, “协作移动边缘计算卸载IOT通过光纤无线网络,”*IEEE网络*, 第32卷, 第1期, 第66页-第71页, 1月2018日。
- 〔311〕H. Guo, J. Liu, H. Qin和H. Zhang, “在光纤无线网络上进行移动边缘计算的协同计算卸载”*2017国际通信会议*, 新加坡, 十二月2017日。
- 〔312〕B. P. Rimal, D. P. Van和M. Maier, “移动边缘计算授权在5G时代的光纤无线接入网络,”*IEEE通信杂志*, 第55卷, 第2期, 第192页-第200页, 2月2017日。
- 〔313〕——“移动通信的云计算增强型光纤无线接入网”*IEEE无线通信事务*, 第16卷, 第6期, 第3601 - 3618页, 6月2017日。
- 〔314〕——“移动边缘计算与集中式云计算在Acon FiWi接入网络上的对比”*IEEE网络与服务管理事务*, 第14卷, 第3期, 第498页-第513页, 9月2017日。
- 〔315〕J. Liu, G.Sou., Y. Liu, Y. Hu和Z. Guo, “集成多接入边缘计算和光纤无线接入网络的性能评估,”*IEEE接入*, 第6卷, 第30页第269期-第30期第279期, 2018年5月。
- 〔316〕B. P. Rimal, M. Maier和M. Satyanarayanan, “光纤无线宽带接入网络中的EDGECMOPATED实验台”*通讯杂志*, 第56卷, 第8期, 第160页-第167页, 8月2018日。
- 〔317〕M. Chen, M. Dong和B. Liang, “联合卸载决策和资源分配的移动云计算接入点”, 在*2016届IEEE声学、语音和信号处理国际会议*, 上海, 中国, 2016三月。
- 〔318〕——“具有延迟约束的多用户移动电话卸载的计算接入点的资源共享”*IEEE MobileComputing 事务*, 第17卷, 第12期, 第2868页-第2881页, 第2018卷。
- 〔319〕M. Chen, B. Liang和M. Dong, “移动云系统中的多用户多任务卸载和资源分配”*IEEE无线通信事务*, 第17卷, 第10期, 第6790页-第6805页, 10月2018日。
- 〔320〕A. Ndikumana, N. H. Tran, T. M. Ho, Z. Han, W. Saad, D. Niyato, ANC. S. Hong, “BigDATA多路访问边缘计算中的联合通信、计算、缓存和控制”*IEEE MobileComputing 事务*, 2019, 在出版社。
- 〔321〕T. X. Tran, P. Pandey, A. Hajisami和D. Pompili, “Collaborativemulti比特率视频缓存和移动边缘计算网络中的处理”*无线点播网络系统及服务年会*, 2017月2日
- 〔322〕K. Wang、H. Yin、W. Quan和G.Min, “为软件定义的车载网络实现协同边缘计算”*IEEE网络*, 第32卷, 第5期, 第112页-第117页, 9月2018日。

(324) A. Ndikumana, N. H. Tran和C. S. Hong, “移动边缘计算中的协作分配和计算卸载”*阿西大印刊*, 十月2018日。在线可用<https://arxiv.org/abs/181001548>

(325) A. Ndikumana, S. Ullah, T. LeAnh, N. H. Tran和C. S. Hong, “移动边缘计算中的协作分配和计算卸载”*2017第十九亚太网络运营与管理研讨会 (APNOMS)*, 汉城, 韩国, 2017月9日。

(326) T. Tran和D. Pompili, “移动边缘计算网络中的自适应比特率视频缓存和处理”*IEEE MobileComputing 事务*, 2018, 在出版社。

(327) W. Hou, Z.宁, L. Guo, “绿色可生存的协同边缘计算SimalStand”*IEEE 工业信息学学报*, 第14卷, 第4期, 第1594—1605页, 4月2018日。

(328) X. Gong, L. Guo, G. Shen和G. Tian, “虚拟网络嵌入协作边缘计算在光无线网络中,”*光波技术杂志*, 第35卷, 第18期, 第3980页-第3990页, 9月2017日。

(329) L. Chen和J. Xu在“超可信网络中的社会可信协作边缘计算”中*第二届ACM/IEEE边缘计算研讨会论文集*, 圣若泽, 加利福尼亚, 十月2017日。

(330) S. Wang, R. Urgaonkar, T.He, M. Zafer, K. Chan和K. K. Leung, “移动微云中的移动诱导服务迁移”*2014年IEEE军事通信会议*, 巴尔的摩, MD, 美国, 十月2014日。

(331) S. Wang, J. Xu, N. Zhang和Y. Liu: “移动边缘计算中的服务迁移研究”*IEEE接入*, 第6卷, 第23页, 第511页, 第23页第528页, 2018年4月。

(332) A. Ksentini, T. Taleb和M. Chen, “一个基于马尔可夫决策过程的跟随云服务的服务流程”*2014 IEEE国际通信会议 (ICC)*, 悉尼, 新南威尔士州, 澳大利亚, 2014月6日。

(333) S. Wang, R. Urgaonkar, M. Zafer, T.He, K. Chan和K. K. Leung, “移动边缘云中的动态服务迁移”*2015 IFIP网络会议 (IFIP网络)*, 图卢兹, 法国, 2015年5月。

(334) S. Wang, R. Urgaonkar, T.He, K. Chan, M. Zafer和K. K. Leung, “预测未来成本的移动微云的动态服务布局”*IEEE并行与分布式系统事务*, 第28卷, 第4期, 第1002—1016页, 4月2017日。

(335) A. Machen, S. Wang, K. K. Leung, B. J. Ko和T. Salonidis, “活在移动边缘云服务移民”*IEEE无线通信*, 第25卷, 第1期, 第140页-第147页, 2月2018日。

(336) M. Lapan深入强化学习: 应用现代的RL方法, 用深度Q网络、价值迭代、策略梯度、TrPO、Apple GooZo 等. 伯明翰B32PB, 英国: 派克出版有限公司, 2018。

(337) R. S. Sutton和A. G. Barto*强化学习: 介绍*. 邮政信箱1866, MaunVIEW, CA94042, 美国: 麻省理工学院出版社, 2018。

(338) I. Goodfellow, Y. Bengio和A. Courville, *深度学习*, 瑟. 自适应学习与机器学习. 美国马萨诸塞州剑桥: 麻省理工学院出版社, 2016。

(339) O. Simeone, “机器学习与通信系统的应用简介”*IEEE认知通信与网络交易*, 第4卷, 第4期, 第648页-第664页, 第2018卷。

(340) 毛、F. Hu和Q. Hao, “智能无线网络的深度学习: 综合性调查”*IEEE通信调查教程*, 第20卷, 第4期, 第2595页-第2621页, 第第四季2018页。

(341) V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D、银、A. A. Rusu, J. Veness, M. G. Bellemare, A. Graves, M. Riedmiller、Py、Y、Y、Y、Y、Y、Y、Y、Y、Y、Y、和, “通过深度强化学习的人类水平控制”*自然*, 第518卷, 第7540期, 第529页-第533页, 2月2015日。

(342) K. Arulkumaran, M. P. Deisenroth, M. Brundage和A. A. Bharath: “深度学习: 一个简短的调查”*IEEE信号处理杂志*, 第34卷, 第6期, 第26页-第38页, 11月2017日。

(343) Y. Li: “深度强化学习: 综述”*科尔*, VA.ABS/1701.0774, 2017。在线可用<http://arxiv.org/abs/1701.07244>

(344) T.T.T.阮和G. Armitage, “使用机器学习的因特网流量分类技术的调查”*IEEE通信测量系统*, 第10卷, 第4期, 第56页-第76页, 第第四季2008页。

(345) F. Musumeci, C. Rottondi, A. Nag, I. Macaluso, D. Zibar, M. Ruffini和M. Tornatore, “机器学习技术在光网络中的应用综述”*IEEE通信测量系统*, 第21卷, 第2期, 第1383页-第1408页, 第二季度2019页。

(346) N. C. Luong, D. T. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y. Liang和D. I. Kim, “深度强化学习在通信和网络中的应用: 一项调查”*科尔*, ABS / 1810.07862, 2018。[在线]可用: <http://arxiv.org/abs/1810.07862>

(347) Y. Sun, M. Peng, Y. Zhou, Y. Huang和S. Mao: “机器学习在无线网络中的应用: 关键技术和开放性问题”*科尔*, ABS / 1809.08707, 2018。在线可用<http://arxiv.org/abs/180908707>

(348) M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin和M. Debbah: “人工智能无线网络的机器学习: 神经网络教程”*科尔*, ABS / 1710.02913, 2017。在线可用<http://arxiv.org/abs/17100913>

(349) M. A. Alsheikh, D. Niyato, S. Lin, H. Tan和Z. Han, “使用深度学习和Apache Skar的移动大数据分析”*IEEE网络*, 第30卷, 第3期, 第22页-第29页, 2016年5月。

(350) H. Ye, G. Y. Li和B. Juang, “OFDM系统中信道估计和信号检测的深度学习能力”*IEEE无线通信信函*, 第7卷, 第1期, 第114页-第117页, 2月2018日。

(351) H. Huang, J. Yang, H. Huang, Y. Song和G.GUI, “基于深度学习的超分辨率信道估计和基于DOA估计的海量MIMOSMODER”*IEEE车辆技术交易*, 第67卷, 第9期, 第8549页-第8560页, 9月2018日。

(352) X. Wang, L. Gao, S. Mao, S. Pandey, “基于CSI的室内定位指纹图谱: 一种深度学习方法”*IEEE车辆技术交易*, 第66卷, 第1期, 第763页-第776页, 1月2017日。

(353) A. B. Adege, L. Yen, H. Lin, Y. Yayeh, Y. R. Li, S. Jeng和G. Berie, “应用前馈神经网络 (FFNN) 算法进行大规模室内定位的深度神经网络 (DNN), ”*2018 IEEE应用系统发明国际会议 (ICASI)*, 千叶, 日本, 4月2018号。

(354) E. Nachmani, E. Marciano, L. Lugosch, W. J. Gross, D. Burshtein, 安迪. 作为“改进线性码译码的深层学习方法”*IEEE信号处理专题杂志*, 第12卷, 第1期, 第119页-第131页, 2月2018日。

(355) S. Deb和P. Monogioudis, “4G LTE蜂窝系统中基于学习的上行干扰管理”*网络化IEEE/ACM事务*, 第23卷, 第2期, 第398—411页, 4月2015日。

(356) “联合学习: 没有集中训练数据的协作式机器学习。”[在线]。可用[http://A.GoGoLoBug\\_G/2017/04/联邦学习协作-HTML](http://A.GoGoLoBug_G/2017/04/联邦学习协作-HTML)

(357) S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad和M. Debbah, “分布式联邦学习的超可靠低延迟车辆通信,”*科尔*, ABS / 1807.08127, 2018。在线可用<http://arxiv.org/abs/1807.08127>

(358) H. Khelifi, S. Luo, B. Nour, A. Sellami, H. Moun gla, S. H. Ahmed和M. Guizani, “在信息中心的互联网上带来深度学习”*IEEE通信信函*, 第23卷, 第1期, 第52页-第55页, 1月2019日。

(359) H. Li, K. Ota和M. Dong, “学习边缘中的物联网: 对边缘计算的物联网的深度学习”*IEEE网络*, 第32卷, 第1期, 第96页-第101页, 1月2018日。

(360) G. Zhu, D. Liu, Y.Du, C.你, J. Zhang和K. Huang, “走向智能化: 无线通信满足机器学习,”*科尔*, VA.ABS/180990034, 2018。在线可用<http://arxiv.org/abs/180990034>

(361) T. Yang, Y. Hu, M. C. Gursoy, A. Schmeink和R. Mathar, “基于深度增强学习的资源分配在低延迟边缘计算网络中”*第十五届无线通信系统国际研讨会*, Lisbon, 葡萄牙, 2018八月。

(362) D. V. Le和C. Tham, “一种基于强化学习的自组织移动云卸载方案”*IEEE计算机通信研讨会2018届会议火奴鲁鲁*, 你好, 美国, 4月2018号。

(363) S. Yu, X. Wang和R. Langar: “移动EDGECOMPUTIN的计算卸载: 一种深度学习方法”*2017 IEEE第二十八年度个人、室内和移动无线电通信国际会议 (PIMRC)*, 蒙特利尔, QC, 加拿大, 十月2017日。

(364) J. Xu, L. Chen和S. Ren, “在能量收集移动边缘计算中卸载和自动缩放的在线学习”*IEEE认知通信与网络交易*, 第3卷, 第3期, 第361页-第373页, 2017年9月。

(365) X. Chen, H. Zhang, C. Wu, S. Mao, Y. Ji和M. Bennis, “通过深度学习来优化虚拟边缘计算系统的卸载性能”*IEEE物联网杂志*2019, 印记

(366) Y. Wang, K. Wang, H. Huang, T. Miyazaki和S. Guo, “在工业应用中的雾计算中使用增强学习的流量和计算联合卸载”*IEEE工业信息学事务*, 第15卷, 第2期, 第976页-第986页, 2月2019日。

(367) Z. Wei, B. Zhao, J. Su, X. Lu, “动态边缘计算与能量收集的物联网卸载: 一种学习方法”*物联网学报*, 2018, 在出版社。

(368) H. Zhu, Y. Cao, W. Wang, T. Jiang和S. Jin, “对移动边缘缓存的深入强化学习: 回顾、新特性和开放问题”*网络工程*, 第32卷, 第6期, 第50页-第57页, 11月2018日。

(369) C. Zhong, M. C. Gursoy和S. Velipasalar, “一个基于深度增强学习的内容缓存框架”*2018第五十二届信息科学与系统年会*, 普林斯顿, NJ, 美国, 2018三月。

(370) T. Hou, G. Feng, S. Qin和W. Jiang, “利用移动边缘计算迁移学习的主动内容缓存”*GloGe2017—2017 IEEE全球通信会议*, 新加坡, 十二月2017日。

(371) Z. Chang, L. Lei, Z. Zhou, S. Mao和T. Ristaniemi, “学习缓存: 机器学习在大数据时代的网络边缘缓存”*IEEE无线通信*, 第25卷, 第3期, 第28-35页, 6月2018日。

(372) 他, F. R. Yu, N. Zhao, V.C.M.梁和H. Yin, “软件定义网络与移动边缘计算和智能城市缓存: 一个大数据深度强化学习方法,”*IEEE通讯杂志*, 第55卷, 第12期, 第31页-第37页, 第2017卷。

(373) L. Hou, L. Lei, K. Zheng, X. Wang, “基于Q-学习的车辆网络中非安全相关服务的主动缓存策略”*物联网学报*, 2019, 在出版社。

(374) L. T. Tan和R. Q. Hu, “移动感知边缘缓存和计算在车辆工程: 一个深层强化学习,”*IEEE车辆技术交易*, 第67卷, 第11期, 第10页第190期-第10期203期, 11月2018日。

(375) J. Li, H. Gao, T. Lv, Y. Lu, “深度强化学习, 基于MEC的计算卸载和资源分配”*2018 IEEE无线通信与网络会议 (WCNC)*, 巴塞罗那, 西班牙, 4月2018号。

(376) L. Huang, S. Bi和Y. A. Zhang, “在无线供电的移动边缘计算网络中进行在线增强的深度强化学习”*科尔*, ABS / 1808.01977, 2018。在线可用<http://arxiv.org/abs/1808/01977>

(377) Y. Wei, F. R. Yu, M. Song和Z. Han, “使用自然演员A.C.批评家深度强化学习, 对雾启用的物联网的缓存、计算和无线电资源的联合优化”*IEEE期刊网络*, 第6卷, 第2期, 第2061—2073页, 4月2019日。

(378) 他, N. Zhao和H. Yin, “综合网络, 缓存, 和计算连接车辆: 一个深层强化学习方法,”*车辆技术IEEE交易*, 第67卷, 第1期, 第44页-第55页, 1月2018日。





◀回到家

三十七万八千零四

