

# 基于通信视角的移动边缘计算综述

## A Survey on Mobile Edge Computing Based on the Communication Perspective

作者: XXX

学号: XXX

专业: XXX

日期: 2020-05-15

## 关键词：

移动边缘计算 移动云计算 通信

## 摘要：

在物联网和5G通信愿景的驱动下，近年来移动计算出现了模式转变，从集中式移动云计算转向移动边缘计算(MEC)。MEC的主要特点是将移动计算、网络控制和存储推到网络边缘(如基站和接入点)，从而在资源有限的移动设备上实现计算密集型和延迟关键型应用。MEC承诺大幅降低延迟和移动能耗，解决实现5G愿景的关键挑战。MEC承诺的收益已经激励了学术界和工业界在开发这项技术上的广泛努力。MEC研究的一个主要方向是无缝地融合无线通信和移动计算这两个学科，从而产生广泛的新设计，从计算卸载技术到网络架构。本文以联合无线电和计算资源管理为重点，全面综述了目前的MEC研究现状。我们还讨论了MEC研究的一系列问题、挑战和未来的研究方向，包括MEC系统部署、支持缓存的MEC、MEC的移动管理、绿色MEC以及隐私感知的MEC。这些方面的进展将促进MEC从理论到实践的转变。最后，我们介绍了最近MEC的标准化工作以及一些典型的MEC应用场景。

# 目录

- 一、引言
- 二、研究历史
  - 2.1 移动计算从云到边缘
  - 2.2 移动边缘计算和移动云计算
    - 2.2.1 低延迟
    - 2.2.2 移动节能
    - 2.2.3 内容感知
    - 2.2.4 隐私和安全性增强
- 三、研究现状与热点
  - 3.1 计算和通信模型
    - 3.1.1 计算任务模型
    - 3.1.2 通信模型
  - 3.2 MEC系统中的资源管理
    - 3.2.1 双时间尺度资源管理
    - 3.2.1 在线任务分区
    - 3.2.1 大规模优化
- 四、研究趋势
  - 4.1 大规模MEC系统部署
  - 4.2 移动管理
- 五、总结
- 六、参考文献

# 一、引言

近十年来，云计算逐渐作为一种新的计算模式开始流行，它的愿景是云计算、存储和网络管理的集中化，可以利用云中的大量可用资源来交付弹性计算，支持资源受限的终端用户设备的电源和存储。云计算一直推动着许多互联网公司的快速增长。例如，10年腾讯云正式对外提供云服务，18年腾讯云的前三季度收入就超过了60亿元;如今，腾讯云已跻身全球七大首选云服务商，滴滴与快的大战的成功很大程度上依赖于腾讯云。

然而近年来，随着云的功能日益向网络边缘<sup>[1]</sup>移动，计算领域出现了一种新的趋势。据估计，在不久的将来，将有几百亿台边缘设备投入使用，它们的处理器速度将呈指数级增长。获取分布在网络边缘的大量空闲计算能力和存储空间可以产生足够的能力，在移动设备上执行计算密集型和延迟关键型任务，这个模式被称为移动边缘计算(MEC)。相比于云计算长期传播延迟的主要缺点,MEC以相近的访问能力被广泛认为是实现下一代互联网技术各种愿景的关键技术,如触觉互联网<sup>[2]</sup>,物联网(IoT)<sup>[3]</sup>等。目前，学术界和产业界的研究人员都在通过追求移动计算和无线通信两个学科的技术和理论的融合积极推动MEC技术的发展。本文旨在从通信的角度对这一新兴领域的主要研究进展进行综述，并且还将提出一个包括一系列MEC有前景的研究方向的研究展望。

## 二、研究历史

### 2.1 移动计算从云到边缘

在过去的十年中，移动设备的普及和移动互联网流量的指数增长推动了无线通信和网络的巨大进步。高速率、高可靠的空中接口允许在远程云数据中心运行移动设备的计算服务，从而形成了被称为移动云计算(MCC)的研究领域。但是，MCC有其固有的局限性，即终端用户到远程云中心的传播距离较长，导致移动应用程序的传播延迟时间过长。因此，MCC不适用于对延迟很关键的各种新兴移动应用程序。目前，正在设计一种新的网络架构以便更好地将云计算的概念集成到移动网络中。在5G无线系统中，将部署超密集的边缘设备，包括小细胞基站(BSs)、无线接入点(APs)、笔记本电脑、平板电脑和智能手机等，因此大量的设备在任何时刻都将处于空闲状态。特别是，它将在网络边缘获得巨大的计算和存储资源，这将足以支持无处不在的移动计算。简而言之，无线系统的主要目标是追求越来越高的无线速度，以支持从以语音为中心的通信到以多媒体为中心的通信的过渡。随着无线网速接近有线网速，5G的任务变得不同，也更加复杂，即支持ICT和互联网的爆炸性发展。在功能方面，5G系统将支持通信、计算、控制和内容交付(4C)。在应用方面，针对5G的大量新应用和新服务正在涌现，如实时在线游戏、虚拟现实(VR)和超高清(UHD)视频流，这些都需要前所未有的高访问速度和低延迟。现在仅仅依靠云计算不足以实现5G计算和通信所需的毫秒级延迟。此外，终端用户和远程云之间的数据交换将使数据海啸达到饱和并导致回程网络瘫痪。这使得有必要用MEC作为云计算的补充，将流量、计算和网络功能推向网络边缘。这也符合下一代网络的一个关键特征，即信息越来越多地在本地生成和本地消费，这源于物联网、社交网络和内容交付<sup>[4]</sup>应用的蓬勃发展。

MEC的概念最早在2014年提出，被定义为一个新的平台，“在无线接入网络(RAN)中提供IT和云计算能力，接近移动用户”。MEC的最初定义是指使用BSs从移动设备上卸载计算任务。此外，边缘设备的定义越来越广泛，这导致了雾计算概念的出现。作为MEC的一种广义形式，雾计算和MEC的领域是重叠的，并且这两个术语经常互换使用。MEC研究的一个主要焦点是开发通用的网络技术，使它们能够在网络边缘实现。越来越多的新兴移动应用程序将从MEC中受益，它们将计算密集型任务转移到MEC服务器上执行云执行。

下面我们提供一个如图1所示的人脸识别应用的例子来说明MEC的基本原则。它通常由图像采集、人脸检测、预处理、特征提取和分类<sup>[5]</sup>五个主要计算部分组成。图像采集组件需要在移动设备上执行，以支持用户界面，其他组件可以卸载进行云处理，云处理包含信号处理和机器学习算法等复杂的计算。通过这种方式，移动用户可以从MEC中获得各种好处，如延迟减少和节能。

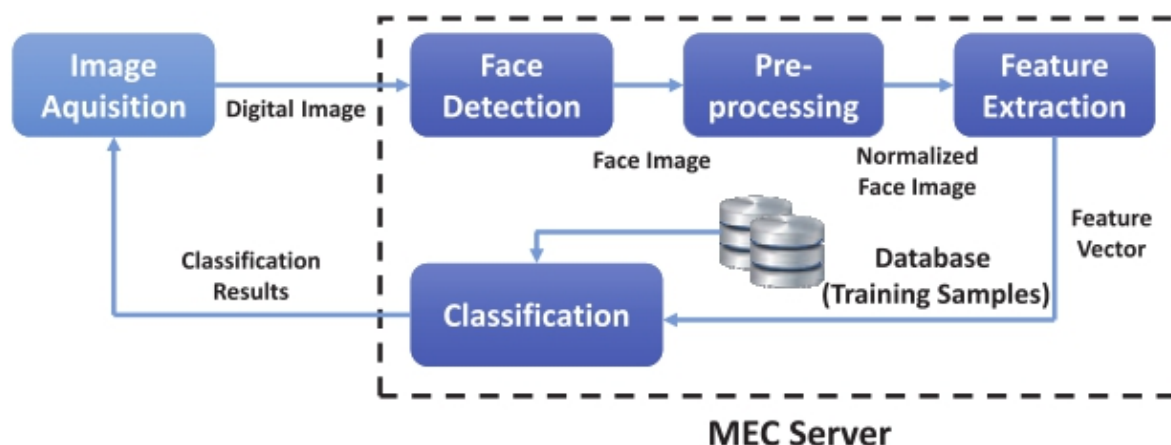


图1 人脸识别应用中的主要计算组件

### 2.2 移动边缘计算和移动云计算

MEC和MCC系统在计算服务器、到最终用户的距离和典型延迟等方面存在显著差异。与MCC相比，MEC具有以下优点:实现更低的延迟、为移动设备节省能源、支持上下文感知计算、增强移动应用程序的隐私性和安全性。下面将通过一些示例和应用程序简要描述这些优点。

#### 2.2.1 低延迟

移动服务的延迟由三部分组成：传播、计算和通信延迟，分别取决于传播距离、计算能力和数据速率。

首先，对于密集的小单元网络或设备到设备之间的传输，MEC的信息传播距离通常为数十米，一般情况下一般不超过1公里。相比之下，云计算需要从终端用户向核心网络或数据中心的节点传输数据，传输距离从几十公里到跨洲传输。这使得MEC的传播延迟比MCC短得多。

其次，MCC要求信息通过多个网络，包括无线接入网络、回程网络和因特网，在这些网络中，流量控制、路由和其他网络管理操作可能会导致过度延迟。由于网络边缘的通信受限，MEC不存在这些问题。

最后，对于计算延迟，云具有比边缘设备高几个数量级的巨大计算能力。然而，与边缘设备相比，云必须由更多的用户共享，从而减少计算延迟的差距。总的来说，实验表明MCC的总延时在30-100ms之间。这对于许多对延迟要求很高的移动应用程序来说是不可接受的，比如实时在线游戏、虚拟运动和自动驾驶，这些应用程序可能需要触觉速度，延迟接近1ms<sup>[6]</sup>。相比之下，由于传输距离短、协议简单，MEC有潜力实现对延迟敏感的5G应用的战略性延迟。

### 2.2.2 移动节能

由于其紧凑的外形，物联网设备的能量存储有限，但有望合作完成复杂的任务，如监测、人群感知和健康监测。考虑到频繁的电池充电或更换是不现实的，为数以百亿计的物联网设备供电仍然是设计物联网的一个关键挑战。

通过有效地支持计算卸载，MEC是延长物联网设备电池寿命的一个有前途的解决方案。具体来说，计算密集型任务可以从物联网设备卸载到边缘设备，以减少其能源消耗。实验证明，MEC使得不同AR应用程序<sup>[7]</sup>的电池寿命增加了30-50%。

### 2.2.3 内容感知

MEC与MCC的另一个重要区别是，MEC服务器能够利用边缘设备的接近性来跟踪终端用户的实时信息，如行为、位置和环境。基于这些信息的推理允许向最终用户<sup>[8]</sup>交付上下文感知服务。例如，对于博物馆视频导览，AR应用，可以根据用户在博物馆的位置，预测用户的兴趣，自动发送与艺术品、古董等相关的内容。

### 2.2.4 隐私和安全性增强

与MCC相比，MEC增强移动应用程序的隐私和安全的能力显著增强。在MCC系统中，云计算平台是远程的公共大型数据中心，由于用户信息资源的高度集中很容易受到攻击。另外，在MCC中用户数据的所有权和管理是分离的，这会导致私有数据泄漏和丢失<sup>[9]</sup>的问题。使用邻近的边缘服务器提供了一个有希望的解决方案，可以绕过这些问题。一方面，由于分布式部署、小规模以及有价值信息的集中度较低，MEC服务器成为安全攻击目标的可能性要小得多。其次，许多MEC服务器可以是私有云，这将缓解对信息泄漏的担忧。需要在最终用户和服务器之间交换敏感信息的应用程序将受益于MEC。例如，MEC的企业部署可以帮助避免将受限制的数据和材料上传到远程数据中心，因为企业管理员自己管理授权、访问控制，并且不需要外部单元就可以对不同级别的服务请求进行分类。

## 三、研究现状与热点

### 3.1 计算和通信模型

在本节中，我们将介绍典型MEC系统的关键计算组件和通信组件的系统模型。这些模型提供了将各种函数和操作抽象成优化问题的机制。对于图2所示的MEC系统，其关键组件包括移动设备(又称终端用户、客户端、服务订阅者)和MEC服务器。MEC服务器通常是由云和电信运营商部署的小型数据中心，与终端用户距离很近，可以与无线APs协同使用。服务器通过网关通过因特网连接到数据中心。移动设备和服务器通过空中接口分开，使用先进的无线通信和网络技术可以建立可靠的无线连接。在接下来的小节中，我们将介绍MEC系统的不同组件的模型，包括计算任务、无线通信信道和网络的模型，以及移动设备和MEC服务器的计算延迟和能耗模型。



图2 MEC系统的体系结构

#### 3.1.1 计算任务模型

在对计算任务进行建模时，有许多重要的参数，包括延迟、带宽利用率、上下文感知、通用性和可伸缩性<sup>[10]</sup>。虽然精确的模型是非常复杂的，但是也存在一些简单的模型，它们是合理的而且具有可追踪性。在本节中我们将介绍两种在MCC和MEC文献中广泛使用的计算任务模型，它们分别对应于二进制和部分计算卸载。

第一种是二元卸载任务模型，高度集成或相对简单的任务不能被分割，必须作为一个整体在移动设备上本地执行或卸载到MEC服务器，称为二进制卸载。这样一个任务可以由 $A(L, \tau_d, X)$ 表示。其中 $L$ 是任务的信息输入数据大小， $\tau_d$ 是完成期限， $X$ 是CPU周期每一点的计算负载与强度的比值。这些参数与应用程序的性质有关，可以通过任务分析器进行估计。这三个参数的使用不仅捕获了移动应用程序的基本属性，如计算和通信需求，还简化了对执行延迟和能源消耗性能的简单评估。

第二种是部分卸载任务模型，在实践中，许多移动应用程序由多个组件组成，这使得实现细粒度(部分)计算卸载成为可能。具体来说，程序可以分为两部分，一部分在移动设备上执行，另一部分卸载以进行边缘执行。用于部分卸载的最简单的任务模型是数据分区模型，其中的任务输入位是按位独立的，可以任意地划分为不同的组，并由MEC系统中的不同实体执行，例如，在移动电话和MEC服务器上的并行执行。然而，不同的组件之间的依赖关系在许多应用程序中不容忽视，因为它大大影响执行的程序和计算卸载，因为函数的执行顺序或例程不能任意选择的，其次，由于软件或硬件的限制，一些功能或例程可以被卸载到服务器进行远程执行，而一些功能或例程只能在本地执行，如图像显示功能。这要比上面更复杂的任务模型，该模型可以捕获应用程序中不同计算函数和例程之间的相互依赖性。其中一个模型称为taskcall图。图是一个典型的有向无环图(DAG)，它是一个没有有向环的有限有向图。我们将它表示为 $G(V, E)$ ，其中顶点集合 $V$ 表示应用程序中的不同过程，而边集合 $E$ 指定它们的调用依赖关系。子任务有三种典型的依赖模型，即顺序、并行和一般依赖项<sup>[11]</sup>，如图3所示。由流动电话启动的应用系统，第一步和最后一步，例如收集输入输出数据和在屏幕上显示计算结果，通常需要在本地执行。



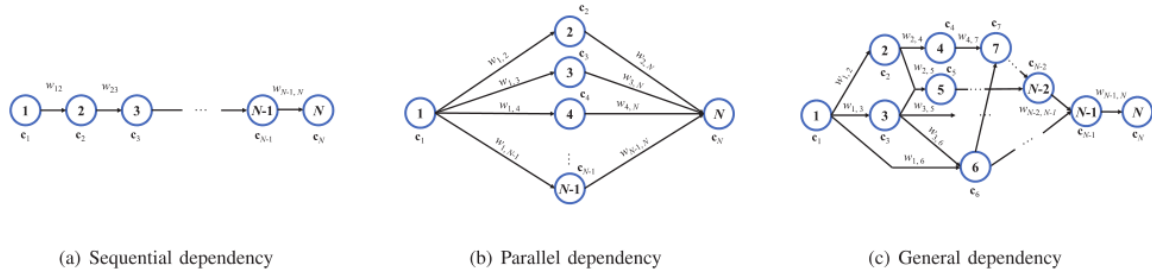


图3 典型的任务调用图

### 3.1.2 通信模型

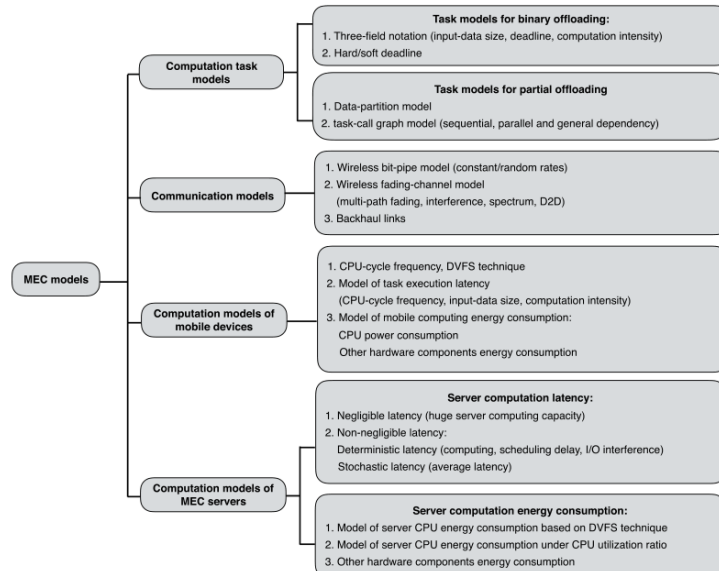
	NFC	RFID	Bluetooth	WiFi	LTE	5G
Max. Coverage	10cm	3m	100m	100m	up to 5km	Excellent coverage
Operation Freq.	13.56MHz	LF: 120-134kHz HF: 13.56MHz UHF: 850-960MHz	2.4GHz	2.4GHz, 5GHz	TDD: 1.85-3.8GHz FDD: 0.7-2.6GHz	6-100GHz
Data Rate	106, 212, 414kbps	Low (LF) to high (UHF)	22Mbps	135Mbps (IEEE 802.11n)	DL: 300Mbps UL: 75Mbps	Indoor/dense outdoor: up to 10Gbps Urban/suburban: > hundreds of Mbps

图4 典型无线通信技术的特点

移动设备和云服务器之间的通信通道通常被抽象为具有固定速率或具有给定分布的随机速率的比特管道。这样的粗模型是为了便于处理，MCC系统的重点是解决核心网络中的延迟和大规模云的管理，而不是无线通信延迟。MEC系统的情况有所不同。考虑到小规模边缘云和针对延迟关键的应用程序，通过设计一个高效的空中接口来减少通信延迟是主要的设计重点。因此，上面提到的位管模型是不够的，因为它们忽略了无线传播的一些基本特性，而且过于简化，无法实现先进的通信技术。

无线传输的广播特性导致一个信号被其他占用相同频谱的信号干扰，从而降低它们各自的接收信号的干扰-噪声比(SINRs)，从而导致检测中出现错误的概率。为了应对性能下降，干扰管理成为无线通信系统最重要的设计问题之一，引起了广泛的研究<sup>[12]</sup>。

无线信道在时间、频率和空间上的随机变化，使得设计高效的MEC系统来无缝集成计算卸载控制和无线电资源管理变得非常重要。例如，当无线信道处于深度衰退时，远程执行所减少的执行延迟可能不足以补偿传输数据速率急剧下降所增加的传输延迟。在这种情况下，最好将卸载延迟到信道增益合适的时候，或者切换到另一个具有更好质量的频率/空间信道进行卸载。此外，增加传输功率可以提高数据速率，但也会导致更大的传输能耗。基于上述考虑，需要对卸载和无线传输进行联合设计，以适应基于信道状态信息(CSI)的时变信道。在MEC系统中，通信通常在APs和移动设备之间，具有直接D2D通信的可能性。MEC服务器是由云计算/电信运营商部署的小型数据中心，可以与无线AP同时部署，以减少资本支出。





## 3.2 MEC系统中的资源管理

MEC系统的资源管理技术仍处于起步阶段，许多关键因素由于简单性而被忽视，这需要在未来的研究工作中加以解决。我认为MEC中的资源管理有三个有待解决的关键研究挑战。

### 3.2.1 双时间尺度资源管理

在现有的大多数工作中，为了简单起见都是假设无线信道在整个任务执行过程中保持静态。然而，当信道一致性时间比延迟要求短得多时，这种假设可能是不合理的。例如，在2GHz的载波频率下，当速度为100km/h时，信道相干时间可小至2.5ms。在这种情况下，任务卸载过程可能跨越多个通道块，因此需要对MEC使用两倍时间资源管理。即使对于具有确定性任务到达的单用户MEC系统，这个问题也是非常具有挑战性的<sup>[13]</sup>。

### 3.2.1 在线任务分区

为便于优化，已有文献处理任务分区问题时忽略无线信道的波动，在执行过程开始前就得到任务分区决策。在离线任务划分决策中，通道条件的改变可能导致卸载效率低下甚至不可行的情况，严重降低计算性能。要开发在线任务分区策略，应该将通道统计信息合并到制定的任务分区问题中，即使在静态通道下，该问题也很容易属于NP-hard问题。对于具有串行和树形拓扑的任务调用图的应用程序，已经推导出了近似的在线任务划分算法，而一般任务模型的解决方案仍未得到利用。

### 3.2.1 大规模优化

多台MEC服务器协作，协同管理资源，同时为大量移动设备提供服务。然而，网络规模的增加使得资源管理成为一个大规模的优化问题，涉及大量的卸载决策以及无线和计算资源分配变量。传统的集中联合无线和计算资源管理算法在应用于大型MEC系统时需要大量的信息和计算，这将不可避免地导致显著的执行延迟，并可能削弱MEC范式带来的潜在性能改进，例如延迟减少。为了实现高效的资源管理，需要设计具有光信令和计算开销的分布式低复杂度大规模优化算法。尽管最近大规模凸优化的进展为无线电资源管理提供了强大的工具，但由于其组合性和非凸性，无法直接应用于优化计算卸载决策，这就需要新的算法技术。

## 四、研究趋势

如上所述，近年来在资源管理方面进行了大量的研究工作。然而，还有许多新兴的MEC研究方向仍然很大程度上是未知的。本章节讨论了一些技术问题、挑战和研究方向，包括大规模MEC系统部署、支持缓存的MEC、移动管理、绿色MEC和MEC中的安全和隐私问题等。

### 4.1 大规模MEC系统部署

MEC的主要动机是将云计算能力转移到网络边缘，以减少由核心网络中的拥塞和传播延迟造成的延迟。但是，对于MEC服务器应该是什么并没有正式的定义，也没有指定系统中的服务器位置。这些调用MEC服务器的站点选择问题，这与传统的BS站点选择问题有很大的不同，因为边缘服务器的最佳位置与计算资源供应是耦合的，并且它们都受到部署预算的限制。此外，MEC系统的效率很大程度上依赖于其架构，架构应该考虑工作负载强度和通信速率统计等各个方面。此外，MEC供应商确定满足服务需求所需的服务器密度非常重要，这与基础设施部署成本和营销策略密切相关。然而，MEC系统的大规模特性使得传统的基于模拟的方法不再适用，因此基于网络规模分析的解决方案是首选。与MEC部署相关的三个有关方向包括MEC服务器的选址、MEC网络架构和服务器密度规划。

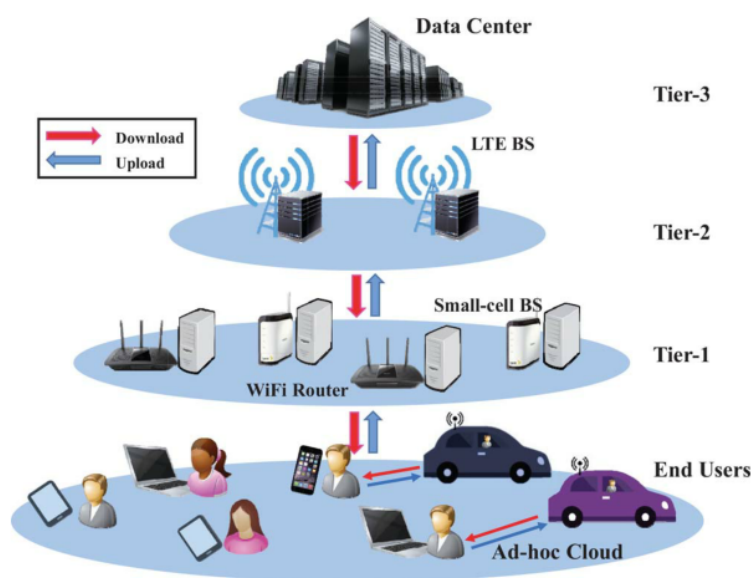


图6 一个三层异构的MEC系统

### 4.2 移动管理

移动性是许多MEC应用的固有特征，例如AR辅助博物馆参观以增强游客体验。在这些应用中，用户的移动和轨迹为边缘服务器提供位置和个人偏好信息，提高了处理用户计算请求的效率。另一方面，移动性也对实现无处不在和可靠的计算提出了重大挑战。由于MEC通常将在HetNet架构中实现，该架构由多个宏、小单元BSs和WiFi APs组成。因此，用户的移动需要在小覆盖的边缘服务器之间频繁切换，如图7所示，由于系统配置和用户-服务器关联策略的不同，这是一个非常复杂的过程。其次，用户在不同的小区之间移动会产生严重的干扰和导频污染，这会大大降低通信性能。最后，频繁的切换会增加计算延迟，从而影响用户体验。

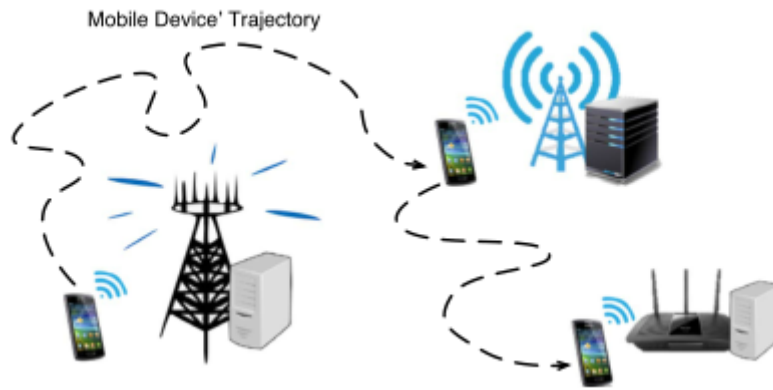


图7 MEC系统的移动管理

移动管理在传统的异构蜂窝网络中得到了广泛的研究。在以往的研究中，根据用户移动速度等信息，采用连通性概率或链路可靠性对用户移动进行建模。基于这些模型，为了实现高数据速率和低误码率，提出了动态迁移管理。但是，这些策略不能直接应用于移动用户的MEC系统，因为它们忽略了边缘服务器上的计算资源对切换策略的影响。因此，设计移动感知的MEC系统也是一个值得努力的方向。

## 五、总结

为满足前所未有的计算需求的增长和用户体验要求不断提高的计算质量，出现了MEC这种创新的网络模式。它的目标是通过将丰富的计算和存储资源推向网络边缘，使云计算能力和网络服务能够接近最终用户。移动设备和边缘服务器之间通过无线通信的直接交互带来了支持超低延迟需求的应用程序、延长设备电池寿命和促进高效网络操作的可能性。然而，由于复杂的无线环境和MEC服务器固有的有限计算能力等原因，它们带来了各种新的设计考虑和独特的挑战。

在本次综述中，我们从通信的角度对MEC进行了全面的综述和研究展望。为此，我们首先总结了MEC系统关键组件的建模方法，如计算任务、通信和MEC服务器的计算，来描述MEC系统的延迟和性能。在系统建模的基础上，我们利用计算卸载、无线与计算资源联合分配、MEC服务器调度、多服务器选择与协作等概念，对不同系统架构下的MEC资源管理的最新研究成果进行了全面的介绍和综述。然后确定了一些潜在的研究方向，包括MEC部署问题、支持缓存的MEC、MEC的移动管理、绿色MEC，以及MEC中的安全和隐私问题，并对这些方向的关键研究问题和初步解决方案进行了阐述。希望能为进一步深入研究MEC提供有益的参考。

## 六、参考文献

- [1] M. Chiang and T. Zhang, "Fog and IoT: An overview of research opportunities," IEEE Internet Things J., vol. 3, no. 6, pp. 854–864, Dec. 2016.
- [2] G. P. Fettweis, "The tactile Internet: Applications and challenges," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 9, no. 1, pp. 64–70, Mar. 2014.
- [3] A. A. Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 4th Quart., 2015.
- [4] M. Chiang and T. Zhang, "Fog and IoT: An overview of research opportunities," IEEE Internet Things J., vol. 3, no. 6, pp. 854–864, Dec. 2016.
- [5] Z. Q. Jaber and M. I. Younis, "Design and implementation of real time face recognition system (RTFRS)," Int. J. Comput. Appl., vol. 94, no. 12, pp. 15–22, May 2014.
- [6] "Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile," GSMA Intell., London, U.K., Dec. 2014. <https://www.gsmainelligence.com/research/?file=141208-5g.pdf&download>
- [7] B. Shi, J. Yang, Z. Huang, and P. Hui, "Offloading guidelines for augmented reality applications on wearable devices," in Proc. ACM Int. Symp. Multimedia, Brisbane, QLD, Australia, Oct. 2015, pp. 1271–1274.
- [8] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Context aware computing for the Internet of Things: A survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 16, no. 1, pp. 414–454, 1st Quart., 2014.
- [9] Yuli Gao, Jianping Fan, Xiangyang Xue, and Ramesh Jain. 2006. Automatic image annotation by incorporating feature hierarchy and boosting to scale up SVM classifiers. In Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimedia (MM '06). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 901–910.
- [10] M. F. Bari et al., "Data center network virtualization: A survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 15, no. 2, pp. 909–928, 2nd Quart., 2013.
- [11] M. Jia, J. Cao, and L. Yang, "Heuristic offloading of concurrent tasks for computation-intensive applications in mobile cloud computing," in Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM WKSHPS), Toronto, ON, Canada, Apr./May 2014, pp. 352–357.
- [12] C. Li, J. Zhang, M. Haenggi, and K. B. Letaief, "User-centric intercell interference nulling for downlink small cell networks," IEEE Trans. Commun., vol. 63, no. 4, pp. 1419–1431, Apr. 2015.
- [13] W. Zhang et al., "Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4569–4581, Sep. 2013.