



移动边缘计算： 架构、应用和挑战

Mobile Edge Computing: Architectures, Applications and Challenges

高志鹏/GAO Zhipeng, 尧聪聪/YAO Congcong, 肖楷乐/XIAO Kaile

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)
(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要: 通过对移动边缘计算(MEC)的概念、框架、应用场景等详细阐述,认为 MEC 作为一种新的计算范式,一方面可以满足用户设备飞速增长的计算需求,另一方面也可以提高用户体验的质量。另外,MEC 的及时性和即时性等特征为时延敏感应用的发展提供了良好的基础。

关键词: MEC; 架构; 5G; 物联网; 车联网; 安全和隐私; 增强现实

Abstract: Through detailed descriptions of the concepts, frameworks, and application scenarios of mobile edge computing (MEC) in this paper, we believe that MEC, as a new computing paradigm, can meet the computational demands of user equipment, and improve the quality of user experience. What's more, the timeliness and immediacy of MEC provide a good foundation for the development of delay-sensitive applications.

Key words: MEC; architecture; 5G; Internet of things; Internet of vehicles; security and privacy; augmented reality

DOI: 10.12142/ZTETJ.201903004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190529.1506.002.html>

网络出版日期: 2019-05-29

收稿日期: 2018-12-30

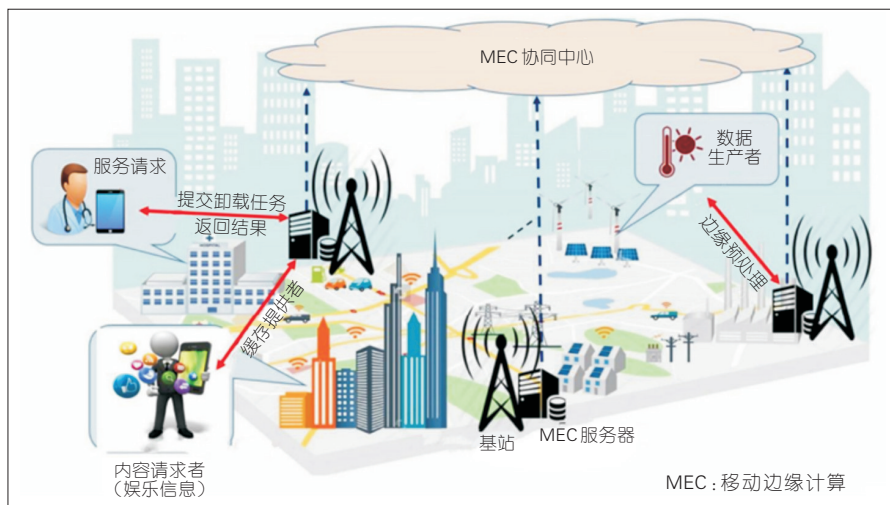
1 移动边缘计算的诞生和发展

在过去的十几年中,云计算把计算能力、存储能力和网络管理集中化,其中网络管理指的是对数据中心网、骨干 IP 网以及蜂窝核心网络的管理。云计算通过云中大量可用的资源对资源受限的终端用户设备提供弹性计算和数据存储功能。云计算推动了许多互联网公司的快速增长,例如软件即服务^[1]被广泛应用到谷歌、Facebook、Twitter 等著名信息技术(IT)企业的

数据中心;云业务已经成为亚马逊盈利最大的部门;Dropbox 的成功很大程度上也取决于亚马逊的云服务。然而近些年来,万物互联时代带来了数据传输带宽、时延,以及应用和服务性能、可靠性等方面的新需求。据估计,在不久的将来,数亿台边缘设备将被部署,按照摩尔定律,它们的处理器速度也将呈指数级增长。通过把这些大量分布在网络边缘的空闲计算能力和存储空间整合,使其无缝为移动设备提供计算和存储支持,一种新的计算范式——移动边缘计算^[2](MEC)被提

出。MEC 系统如图 1 所示,关键组件包括 MEC 服务器和移动设备(也称为终端用户、客户端、服务订购方)。MEC 服务器通常是由电信运营商进行部署的、与终端用户非常接近的小型数据中心,通过网关经由互联网连接到数据中心,并且可以与无线接入点进行协同合作。移动设备和服务器可以使用先进的无线通信和网络技术建立可靠的无线链路。

MEC 的出现使得传统电信蜂窝网络和互联网业务得到了深度融合,减少了移动业务交付时的端到



▲ 图1 MEC 系统

端时延,挖掘出无线网络的潜在能力,进而提升用户体验。MEC模式将给电信运营商在运作模式上带来一系列全新的变革,继而推进电信运营商建立新型的产业链和网络生态圈。

移动边缘计算的出现同时推动了物联网、5G和运营商个性化业务的发展。

(1) 物联网的高速发展。

未来是万物互联的时代,国际数据公司(IDC)的统计数据显示:预计2020年将有500亿的智能终端和设备接入互联网^[3-4]。连接设备的数量的快速增长,不仅代表着海量数据的产生,接入网的设备往往还需要进行一定的智能计算。物联网的核心理念是万物互联^[5],是为了让每个物体都能够智能地连接和运行。MEC遵循“业务应用在边缘,管理在云端”的计算模式^[6],完成了把计算、网络和存储能力从云延伸至物联网网络边缘的转变。通过在近网络边缘进行数据分析处理,MEC使得物联网中物与物之间

的传感、交互和控制变得更加容易。具备计算和存储能力的智能终端使得在网络边缘完成数据的分析处理成为可能。

(2) 5G 网络技术需要 MEC 的支持。

移动互联网和物联网的快速发展推动了5G网络技术^[7]的诞生,5G技术要求网络实现“大容量、大带宽、大联结、低延迟、低功耗”。在当前的网络架构中,核心网部署在远端,导致传输时延比较大,无法满足低延迟业务需求。MEC部署在网络边缘,融合了无线网络和互联网技术,并在无线网络侧增加了计算、存储等功能模块。通过把5G应用程序和业务部署在移动边缘,MEC可以减少数据传输过程中的转发和处理时间,明显降低端到端时延,并且在满足低延时要求的情况下,降低了功耗。

(3) MEC助力运营商推出个性化业务。

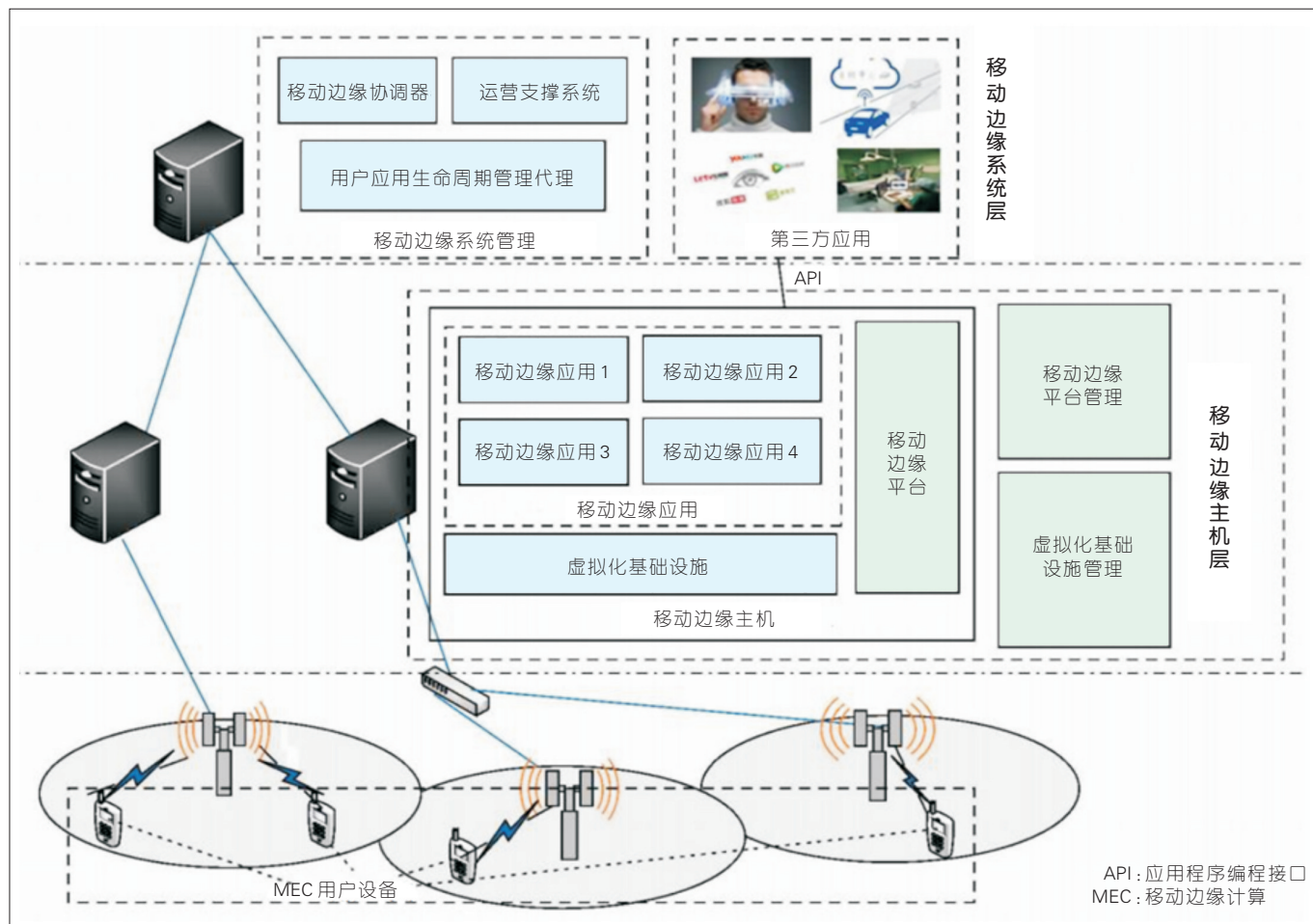
传统的运营商网络是非智能的。包月套餐大量存在,难以满足

不同用户的需求差异;资费相同的情况下,带来的结果是流量使用少的用户补贴流量使用多的用户;业务缺少优先级的区分,导致对实时性要求高的业务无法获得优先保障。与非智能的网络形成对比的是通信网络正在承载着更多基于新型智能终端、基于IP的多媒体应用,运营商商业模式和资费的单一,让运营商在业务和用户的掌控力上显得不足。MEC的关键技术包含了业务和用户的感知能力,因为边缘网络靠近用户,能够实时获取用户真实的信息。MEC可以通过大数据分析用户的特征实现用户画像。用户画像有利于对用户需求和行为进行预测,为不同的用户定制个性化业务,带来更好的用户体验。

2 MEC 的架构

在欧洲电信标准化协会(ETSI)制定的“MEC全球标准003版本”(GS MEC 003)中,ETSI定义了移动边缘计算基于网络功能虚拟化(NFV)的参考架构^[8]。根据ETSI的定义,移动边缘计算侧重的是在移动网络边缘给用户提供IT服务的环境和云计算的能力,意在靠近移动用户来减少网络操作和服务交付的时延。移动边缘计算架构分为3级:系统层、主机层和网络层,如图2所示。ETSI提出的系统架构中展示了MEC的功能要素和每个功能要素之间的参考节点。

其中,系统层结构由MEC系统级管理、用户和第三方实体组成。MEC系统级管理用于掌握部署的MEC主机、可用资源、可用MEC服



▲ 图2 欧洲电信标准化协会定义的 MEC 架构

务和整个网络拓扑;加载用户或第三方应用程序包,包括检查包的完整性和真实性,验证应用程序的规则和要求,必要时进行调整以满足运营商策略;记录加载的数据包并准备虚拟基础架构管理器以进一步处理应用程序,以便它可以根据应用程序处理的要求管理虚拟化基础架构,例如分配、管理和释放虚拟化基础架构的虚拟化资源;基于延迟、可用资源等选择或重新选择适当的 MEC 主机应用程序。

主机层架构主要包括 MEC 主机级管理和 MEC 主机。MEC 主机级管理包括移动边缘平台管理器

和虚拟化基础架构管理器;而 MEC 主机由移动边缘平台移动、移动边缘应用和虚拟化基础架构3部分组成。MEC 主机级管理主要进行移动边缘平台管理和虚拟化基础架构管理,移动边缘平台和移动边缘应用可以提供或使用彼此的服务,例如,移动边缘应用发现和使用移动边缘平台提供的无线网络信息、用户和其他相关的位置信息、带宽管理等服务,同时通知平台可以为用户提供服务。移动边缘平台为移动边缘应用程序提供运行环境,同时接收来自管理器、应用程序或服务的行业规则进而对数据执行

对应的指令,进行业务路由。移动边缘平台还从其管理员的域名解析系统接收记录,并配置域名系统(DNS)代理/服务器以管理移动边缘服务。例如,可以在移动边缘平台上的服务列表中注册应用程序,使其成为平台提供的移动边缘服务之一。此外,还可以通过移动边缘平台访问永久存储和时间信息。虚拟化基础设施使用通用硬件来提供底层硬件的计算、存储、网络资源和硬件虚拟化组件,以运行多个移动边缘应用程序,从而减少了处理成本,有限的资源也可以灵活有效地重复使用和共享;移动

边缘应用是基于虚拟化基础设施形成的虚拟应用程序,通过标准应用程序接口和第三方应用程序对接,并为用户提供服务。

英特尔对 MEC 的整体架构也做了定义^[9]: MEC 处于无线网络接入点和有线网络之间,因为传统的无线接入网拥有业务本地化和近距离部署的优势,从而带来的是高带宽和低时延的传输能力。MEC 模式下通过将网络业务“下沉”到更加接近用户的无线网络接入侧,直接的好处就是用户能明显感受到传输时延减小,网络拥塞情况被显著控制。MEC 提供应用程序编程接口(API),对第三方开放基础的网能力,使得第三方可以根据业务需求完成按需定制和交互,具体如图3所示。

3 MEC 的应用案例

(1) 增强现实(AR)^[10]

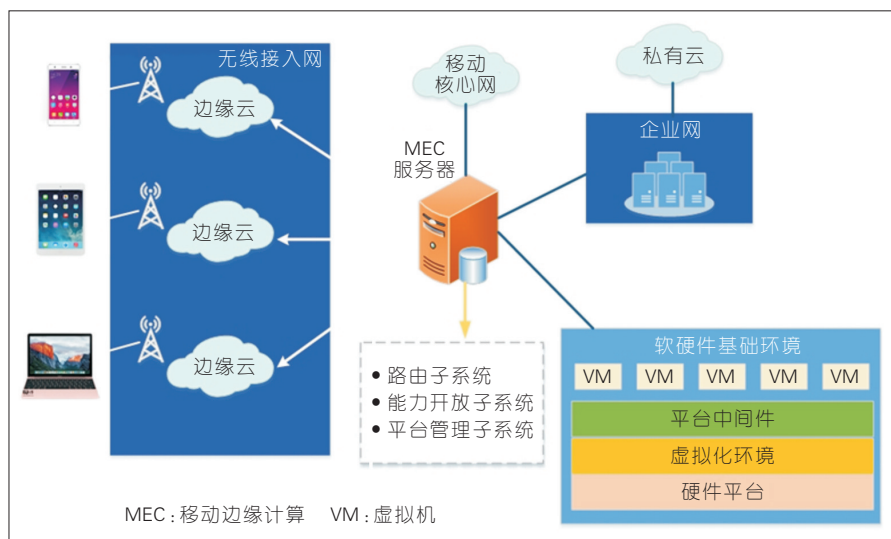
当一个支持高数据传输速率和低延迟计算的移动网络被部署的时候,新应用的出现变成了可能。AR 就是要求有着高数据传输速率和低延迟计算的应用场景。AR 技术是将真实世界环境和虚拟信息高度集成,生成被人类感官所感知的信息,

来得到超越现实的感官体验。AR 可用于智能手机、智能眼镜和平板电脑等移动设备上,以支持新的应用和新的服务,例如3D电影、虚拟游戏等^[11]。AR 技术需要使用终端设备的相机或者定位技术,通过分析拍摄的图像来确定用户所处的位置和朝向。由于 AR 在对视频、图像等任务复杂性很高的数据进行处理的同时,还要实现和用户的实时互动,所以对时延极为敏感,对数据传输速率也有了很高的要求。MEC 将延迟敏感的 AR 任务卸载到附近的边缘计算服务器中执行,能够让应用得到更快的响应速度,同时又降低了任务的处理延迟。图4显示

了一个基于 MEC 的增强现实应用系统,其中 MEC 服务器能够通过准确地分析输入数据来区分请求的内容,然后将增强现实数据发送给最终用户。

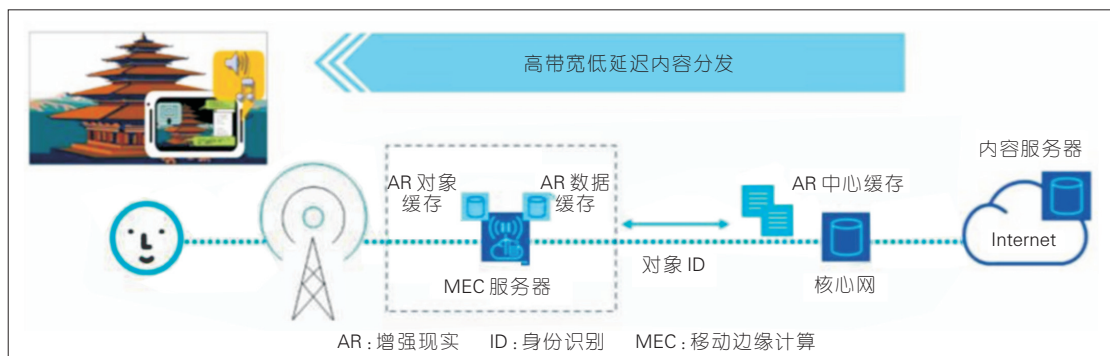
(2) 视频优化加速。

近年来,网络速度的不断提升,带动了视频流量的飞速增长。据思科的统计,全球视频流量从2012—2017年,增长了接近2.5倍。随着5G商用的临近,网速将进一步得到提升,同时刺激视频流量的飞速增长。到2021年,移动视频将占总移动流量的78%。移动视频流量猛增的同时,解决网络延迟的问题就变得刻不容缓。MEC 具有高带宽和



▲ 图3 英特尔定义的 MEC 架构

图4
增强现实服务场景



低时延的特征,同时在本地产拥有一定的计算能力,特别适合用来对视频播放进行加速^[12],提高用户体验。如图5所示,MEC通过运用本地缓存技术,将视频内容缓存到靠近无线侧的MEC服务器上,用户一旦发起视频请求,MEC服务器首先去检查本地是否有该内容,若有则直接提供服务,否则MEC服务器从Internet服务器提供商获取内容下载到本地,供其他用户访问。由于MEC服务器和Internet服务商是通过有线数据传输的,所以速度传输速率很快,减少了用户直接访问的时延。

(3)视频流分析。

视频流分析在车牌识别、人脸识别、家庭安全监测控制等领域有着广泛的应用,视频流分析的基本操作包括目标检测和分类。视频分析算法通常具有较高的计算复杂度,因此可以将分析工作从视频捕获设备(如摄像机)中移开以简化设备设计和降低成本。如果在中心云中去处理这些计算复杂度高的任务,视频流会被路由到核心网络中,这将消耗大量的网络带宽。通过在靠近边缘设备的地方

进行视频流分析,系统不仅具有了低延迟的优点,还可以避免大量视频流上传导致的网络拥塞问题。基于MEC的视频流分析系统如图6所示^[13],其中边缘服务器应该具有视频管理和视频分析的能力,并且只需将有价值的视频片段或者截图备份到云数据中心就可以完成。

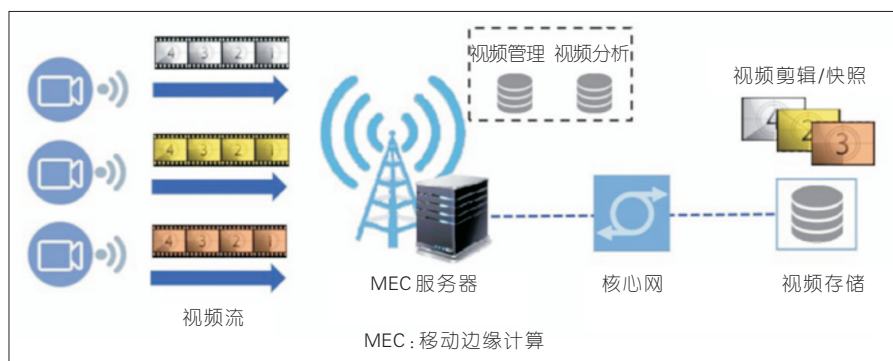
(4)物联网(IoT)。

为了使IoT设备的硬件复杂性降低并延长设备的电池寿命,可以把原本需要远程处理的计算密集型任务卸载到边缘服务器中去执行,并在服务器处理完后将结果返回给用户。另外,一些IoT应用程序需要获得系统的分布式信息用于执行计算任务。MEC能帮助IoT设备很好地解决这个问题。MEC服务器自身承载着高性能的计算

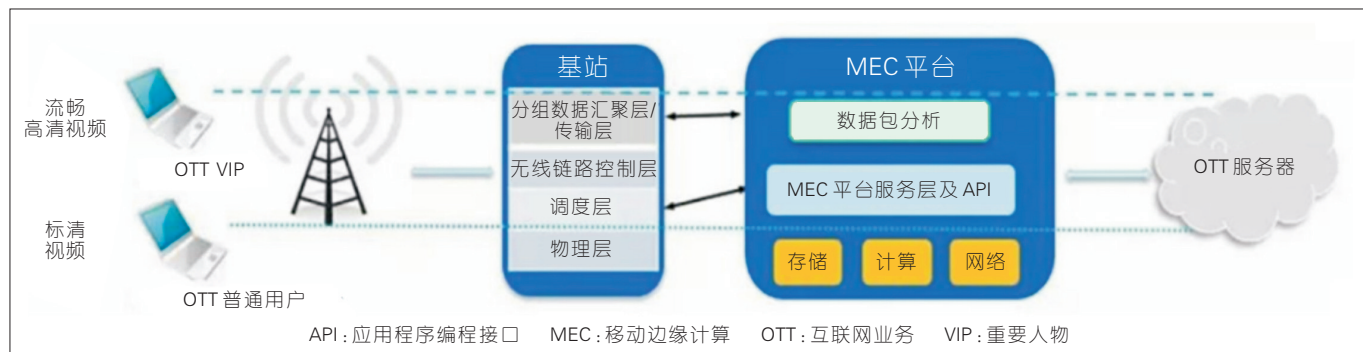
能力并能够收集分布式的信息,所以通过它们的部署能够显著简化IoT设备的设计复杂度。IoT设备可以不需要具有强大的处理能力,也不需要自己从多个数据源接收信息用来执行比较复杂的计算。IoT的另一个重要特征是运行设备的异构性,不同的终端设备运行着不同形式的协议。所有的设备应该是由一个低延迟聚合点(网关)完成管理工作,MEC服务器就可以充当这个网关的角色,如图7所示。

(5)车联网。

车联网技术^[14]可以通过各种传感器来感知车辆的行为和路况,提高车辆的安全性,减轻交通拥堵的程度,也能带来一些增值服务的机会,比如车辆定位、寻找停车位置等。这种技术还没有达到成熟,车



▲图6 移动边缘计算平台下的视频流处理



▲图5 基于MEC平台的在线视频系统

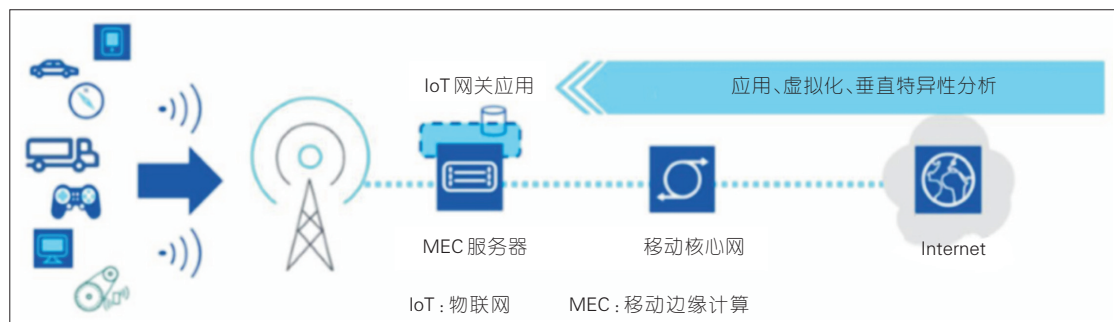


图7
物联网服务场景

到云端的延迟还处于 $100\text{ ms} \sim 1\text{ s}$ 之间,远不能达到要求。MEC通过将连接的车云系统扩展到高度分布的移动基站环境中,使数据和应用程序可以更靠近车辆,这样可以有效地减少数据的往返时间。MEC在车联网中的应用如图8所示,应用程序运行在部署于长期演进(LTE)基站站点的MEC服务器上,提供道路侧的相关功能。通过接收并分析来自邻近车辆和路边传感器的消息,边缘计算能够在20 ms端到端的延迟内传播危险警告和延迟敏感信息。低延迟使得附近的车辆能够在几毫秒内接受到数据,从而让驾驶员可以立即做出反应。

4 MEC 的挑战

MEC作为一个新兴的前沿技术,在为我们带来便利和效益的同时,还存在很多的问题和挑战。为了促进MEC的发展,我们将从安全和隐私、任务资源分配和通信这3个方面重点描述MEC面临的问题和挑战。

4.1 安全和隐私

MEC支持新类型的服务,但是它独有的特性也带来了新的安全性和隐私问题。

(1)信任和认知机制。
信任是一种几乎在每个移动系统中都存在的重要安全机制,其基本的思想是让系统认可与之交互的实体的身份。认证管理作为另一种安全的手段,也提供了一种可能的解决方案来确保“信任”。然而,MEC系统固有的异构性,即不同的边缘服务器可以由多个供应商部署,各种移动终端设备共存,使得传统云计算系统的信任和认证机制不适用。此外,在MEC网络中,边缘服务器将为大量的延迟敏感型应用程序提供服务,这让MEC中的信任

和认证设计比传统的云计算系统复杂得多。因此,构建认证机制和设计分布式策略是亟待解决的问题。

(2)网络安全。

用于支持MEC系统的通信技术,如WiFi、LTE和5G,都有自己的安全协议来保护系统免受攻击和入侵。然而,这些协议不可避免地创建了不同的信任域。MEC系统中网络安全的第一个挑战来自证书分发的困难性,证书是可用于在不同信任域直接进行协商的会话密钥。在现有的密钥分发方案中,证书颁发机构只能将证书分发给位于其自

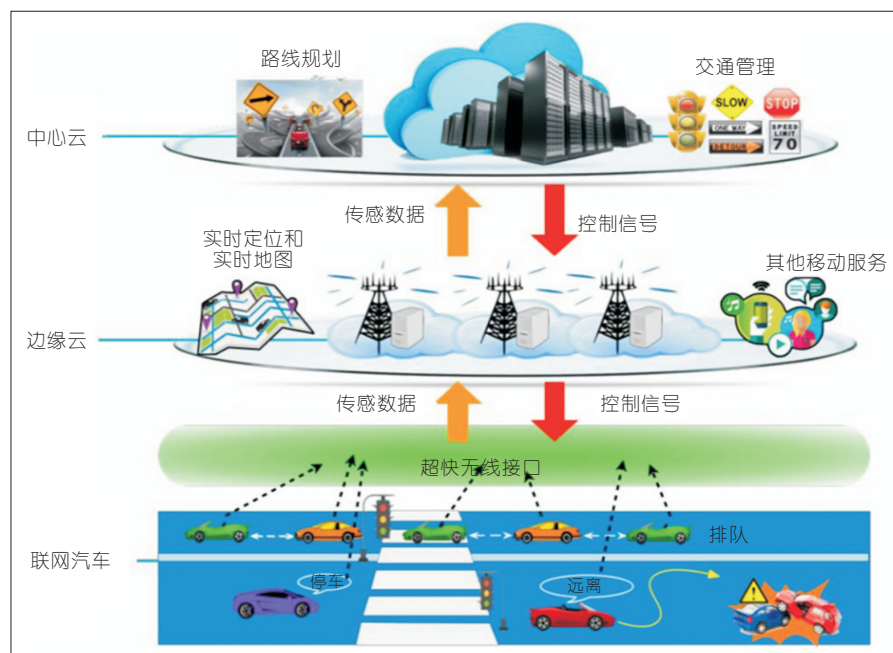


图8 移动边缘计算在车联网中的应用

身信任域内的实体,这难以保证不同信任域之间的通信隐私和数据完整性。为了解决这个问题,我们可以使用加密属性作为凭据,以便交换会话密钥。我们也可以使用联合内容网络的概念,定义多个信任域协商和维护域间凭据。此外,将软件定义网络(SDN)和NFV等技术引入MEC系统,以简化网络管理,并提供隔离也是一种有效的方法。但是,以上的这些技术本质上都是软件,因此很容易受到攻击。并且,MEC系统存在着大量的设备和实体,增加了攻击者成功攻击单个设备的机会,单个设备被攻击可能造成整个系统的崩溃。所以,我们需要更加新颖和健全安全机制,例如管理程序内省、运行时内存分析和集中式安全管理等,以保证MEC系统的安全联网环境。

(3)安全和私有计算。

将计算密集型应用程序迁移到边缘计算服务器是构建MEC系统的重要功能和动机。在实践中,任务输入数据通常包含敏感的私人信息,如个人临床数据和商业财务记录。因此,在将这些数据卸载到边缘计算服务器,特别是不信任的服务器之前,应该对其进行适当的预处理,以避免信息泄露。除了信息泄露之外,边缘计算服务器还可能由于软件缺陷或经济的激励而返回不准确甚至不正确的计算结果,特别是对于具有巨大计算需求的任务。为了实现安全且私有的计算,边缘平台可以通过加密算法和可验证技术实现执行计算任务而不需要知道用户的原始数据,并且验证计

算结果的正确性。

4.2 任务资源分配

(1)MEC资源的分布与管理。

边缘计算中一个很重要的研究领域就是如何协调边缘节点的计算资源。为了保证所有希望使用MEC资源的用户都能够得到无处不在的服务,MEC服务器和计算/存储资源应该分布在整个边缘网络中。因此,MEC服务器在物理位置的放置上应该以分层的方式相互补充,这将使得计算资源和存储资源得到有效的利用,同时极大地满足用户服务质量(QoS)和体验质量(QoE)的要求。在此背景下,一个重要的挑战是根据预期的用户需求找到在物理上放置边缘计算服务器的最佳方式,同时考虑运营成本。

我们还应该为MEC资源的合理管理设计高效的控制程序,这包括信令消息的设计、信令的交换以及信令开销方面的优化。控制信息应该能够传送状态信息,例如单个计算节点的负载和无线/回程链路的质量,以便有效地编排MEC内的计算资源。如果传送的状态信息很少被交换,那么我们应该在与状态信息频繁交换有关的高信令开销和由于状态信息老化而对MEC性能的影响之间找到平衡点,并且提出有效的信令机制,以确保MEC中的控制实体信息能即时更新,同时使得获得这些信息的成本最小化。

(2)计算资源的分配。

针对卸载到MEC的应用程序的计算资源如何有效分配的问题,目前的研究没有考虑网络的动态

性。更确切地说,现在的分配策略是将应用程序卸载到MEC之前预先选择计算节点,然后假定相同的计算节点处理卸载的应用程序。然而,MEC在处理完给定应用程序时会释放一些额外的计算资源,这些资源是还可以给其他任务提供服务的,以便进一步加速卸载的计算过程。因此,在MEC中处理卸载的应用程序期间动态地分配计算资源是未来需要解决的一个研究挑战。

4.3 通信

引入的MEC服务器对第3代合作伙伴计划(3GPP)^[15]网络体系结构和现有的接口中应该具有透明性。用户设备(UE)和核心网络元件在符合现有3GPP规范前提下应该不受MEC服务器和托管在服务器上的应用程序的影响。3GPP协议和程序应该在不影响服务协议(SLA)的情况下操作和运行。

(1)应用可移植性。

在MEC中,对应用程序的一个基本要求就是程序能被无缝地在不同供应商提供的MEC平台中加载和执行。应用的可移植性消除了平台基础上进行复杂的开发和集成工作,减少了软件应用程序开发人员的很多麻烦。移动边缘计算允许在MEC服务器之间快速地进行服务迁移,从而优化了服务器资源。应用平台提供的可弹性扩展服务是确保应用程序可移植性的关键。平台管理的框架需要在不同的解决方案之间保持一致,来确保即使在不同的管理环境下应用程序开发者也能简单地进行移动边缘计算方面的

工作。用于部署和管理应用程序的工具和机制也需要在各个平台和供应商之间保持一致,一致性使得软件应用开发人员能确保他们的应用程序管理框架无缝集成。

(2)移动性。

移动性问题又可以分为以下2种场景:

- 用户在一个MEC服务器之下,从一个基站移动到另一个基站。服务器需要保证用户到应用的连接性能,需要跟踪用户当前的连接节点来确保下行数据的路由。
- 用户从一个MEC服务器移动到另一个MEC服务器。这个过程需要基于应用的能力、原始服务器和目标服务器的负载信息等情况来决策采用的移动性机制。

到目前为止,对移动性的研究侧重于虚拟机(VM)迁移中的移动性管理,主要考虑的是只有一个计算节点为每个用户设备提供计算服务。因此,当应用程序卸载到多个计算节点时,如何有效地处理VM迁移过程将成为一个挑战。此外,VM迁移给回程链路带来高负载,并导致了高延迟的发生,这使得VM迁移不适合实时应用。因此,开发新的高级技术,实现以毫米级别的速度进行VM的快速迁移是将来的一个研究方向。例如,可以基于一些预测技术达到预先迁移计算,以使用户不会察觉到服务中断。同时,也可以更仔细地研究动态优化和联合考虑所有用于移动性管理的技术(例如功率控制、VM迁移、迁移数据的压缩和路径选择),以便提高用户设备的QoE并

优化总体系统性能。

5 结束语

MEC作为一种新的计算范式,一方面可以满足用户设备飞速增长的计算需求,另一方面也可以提高用户体验的质量。MEC通过将大量的计算资源和存储资源网络边缘化,给用户终端提供类云计算的功能和IT服务。移动设备和边缘服务器之间通过无线通信直接交互,可以支持具有超低延迟要求的应用,延长设备的电池寿命,让网络运营变得高效。

致谢

本研究得到工业和信息化部2018年工业互联网创新发展工程“浪潮云工业互联网平台试验测试项目”的支持。在文章撰写过程中得到北京邮电大学王茜博士的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] MIETZNER R, LEYMAN F. Towards Provisioning the Cloud: On the Usage of Multi-Granularity Flows and Services to Realize a Unified Provisioning Infrastructure for SaaS Applications[C]//2008 IEEE Congress on Services-Part I. IEEE: USA, 2008: 3-10. DOI:10.1109/SERVICES-1.2008.36
- [2] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算:万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924. DOI:10.7544/issn1000-1239.2017.20160941
- [3] 5G愿景与需求(白皮书)[EB/OL]. (2016-04-26)[2019-12-28]. <http://www.docin.com/p-890406206.html>
- [4] NGMN 5G White Paper[EB/OL]. (2016-04-26)[2019-12-28]. <http://www.ngmn.org/5g-white-paper.html>
- [5] ASHTON K. That 'Internet of Things' Thing [J]. RFID Journal, 2009, 22(7): 97-114
- [6] 王宏宇. 边缘计算在智慧城市中的应用[J]. 电脑迷, 2018, (8): 138
- [7] Mobile Edge Computing-A Key Technology Towards 5G[EB/OL]. (2016-04-26)[2019-12-28]. <http://www.etsi.org/technologiesclusters/technologies/mobile-edge-computing>
- [8] 罗雨佳, 欧亮, 唐宏. 基于NFV的边缘计算承载思路[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 153-159

- [9] 俞一帆, 任春明, 阮磊峰, 等. 移动边缘计算技术发展浅析[J]. 2016, 11(11): 59-62
- [10] PANKRATZ F, KLINDER G. [POSTER] AR4AR: Using Augmented Reality for Guidance in Augmented Reality Systems Setup[C]//2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. USA: IEEE, 2015: 140-143. DOI:10.1109/ISMAR.2015.41
- [11] JAIN P, MANWEILER J, CHOUDHURY R R. OverLay: Practical Mobile Augmented Reality [C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. USA: ACM, 2015:331-344
- [12] PATEL M, NAUGHTON B, CHAN C, et al. Mobile-Edge Computing Introductory Technical White Paper[J]. White paper, Mobile-Edge Computing (MEC) Industry Initiative, 2014: 1089-7801
- [13] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Mobile-Edge Computing Introductory Technical White Paper [EB/OL]. (2016-12-03)[2019-12-28]. https://portal.etsi.org/Portals/0/TBpages/MEC/Doc/Mobile-edge_computing_-_Introductory_Technical_White_Paper_V1%2018-09-14.pdf
- [14] GUBBI J, BUYYA R. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Direction [J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(7): 1645-1660. DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010
- [15] 3GPP. Study on Facilitating Machine to Machine: TR 22.868 V8.0.0. 2007.03[S]

作者简介



高志鹏, 北京邮电大学教授、博士生导师, 同时担任国家自然科学基金委、国家发改委、科技部、工信部项目评审专家; 目前研究方向为边缘计算、群智计算与大数据、区块链应用技术、云平台管理、网络管理与通信软件等; 研究成果获省部级科技一等奖3次; 已发表论文50余篇, 拥有20余个国家发明专利、4项国际标准和多项行业/企业标准。



尧聪聪, 北京邮电大学在读硕士研究生; 研究方向为边缘计算系统资源分配机制。



肖楷乐, 北京邮电大学在读博士研究生; 研究方向为边缘计算中的任务卸载和资源分配问题、区块链应用等。