



综述

移动边缘计算综述

李子姝, 谢人超, 孙礼, 黄韬
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 移动边缘计算(MEC)技术将IT服务环境和云计算技术在网络边缘相结合,提高边缘网络的计算和存储能力,减少网络操作和服务交付时延,提升用户服务质量体验,因此受到了广泛关注,并且已经作为关键技术被纳入5G标准。首先介绍了MEC的基本概念、参考架构和技术优势,然后从学术界、产业界和标准制定3个角度出发概括了MEC的研究现状,随后详细介绍了MEC的关键技术、应用场景以及具体的部署方式,最后对MEC的移动性、安全和计费以及隐私保护等现存问题进行了归纳和展望。

关键词: MEC; 5G; 低时延; 参考框架; 应用场景

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018011

A survey of mobile edge computing

LI Zishu, XIE Renchao, SUN Li, HUANG Tao

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Mobile edge computing (MEC) technology integrates IT service environment and cloud computing technology at the edge of the network, improving the capacities of computing and storage of the edge of network, reducing network operation and service delivery delay and further enhancing the quality of experience (QoE) of users. Thus, MEC has attracted extensive attention and has been added in the 5G standard as a key technology. Firstly, the basic concept, reference architecture and technical advantages of MEC were introduced, and the current research state of MEC were summarized from three perspectives: academia, industry and standard setting. Then, the key enablers, application scenarios and specific deployment methods of MEC were introduced in detail. Finally, the existing problems of MEC, such as mobility, security and billing, as well as privacy protection, were discussed.

Key words: MEC, 5G, low latency, reference architecture, application scenario

1 引言

指数式增长的数据流量、不断增加的终端种

类和越来越多样化的服务场景是当下传统的4G网络架构面临的难题,这催生了5G时代的来临。在5G时代,移动网络服务的对象不再是单纯的手

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61501042); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2015AA016101)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61501042), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2015AA016101)

2018011-1



机,而是各种类型的设备,如平板电脑、移动车辆和各种传感器等。服务的场景也越来越多样化,比如移动宽带、大规模机器类型通信、任务关键型互联网等^[1]。因此,在移动性、安全性、时延性和可靠性等多个方面,移动网络都必须满足更高的要求。

为了满足移动网络高速发展所需的高带宽、低时延的要求,并减轻网络负荷,未来的 5G 网络提出了如下演进目标:基于 SDN/NFV 进行虚拟化,进行扁平化扩展与增强,核心网用户面功能下沉到基站。在此背景下,由于通过将 IT 服务环境与云计算在网络边缘相结合,从而构建更加智能的移动网络,MEC 被视为向 5G 过渡的关键技术和架构性概念^[2,3]。MEC 正在推动传统集中式数据中心的云计算平台与移动网络的融合,将原本位于云数据中心的服务和功能“下沉”到移动网络的边缘,在移动网络边缘提供计算、存储、网络和通信资源。MEC 强调靠近用户,从而减少网络操作和服务交付的时延,提升用户体验。同时,通过 MEC 技术,移动网络运营商可以将更多的网络信息和网络拥塞控制功能开放给第三方开发者,并允许其提供给用户更多的应用和服务。

本文主要对 MEC 技术进行系统性的概述和介绍,首先介绍了 MEC 的基本概念,并详细介绍了 MEC 的参考框架。然后对 MEC 技术的优势加以详细阐述,从学术界、工业界和标准制定 3 个角度介绍 MEC 的研究现状。随后进一步介绍实现 MEC 的 3 个关键技术和 MEC 技术的应用场景以及 MEC 服务器在现网和未来 5G 下的部署方案,并总结不同部署方案的优缺点。最后对 MEC 现存的几个尚待解决的问题做进一步归纳和总结。

2 基本概念及架构

欧洲电信标准化协会(ETSI)对 MEC 的定义是:在移动网络边缘提供 IT 服务环境和云计算能力。移动边缘计算可以被理解为在移动网络边

缘运行云服务器,该云服务器可以处理传统网络基础架构所不能处理的任务,例如 M2M 网关、控制功能、智能视频加速等。需要注明的是,在研究初期 MEC 中的“M”是“mobile”之意,特指移动网络环境。随着研究的不断推进,ETSI 现在将“M”的定义扩展为“multi-access”,旨在将边缘计算的概念扩展到 Wi-Fi 等非 3GPP 接入的场景下,“移动边缘计算”的术语也逐渐被过渡为“多接入边缘计算(multi-access edge computing, MEC)”^[4]。但是目前业界乃至 ETSI 等标准制定组织研究的重点仍然是移动场景下的边缘计算,因此现在业界仍多以“移动边缘计算”称之。本文对边缘计算的讨论也主要集中在移动接入的场景下。

MEC 运行于网络边缘,逻辑上并不依赖于网络的其他部分,这点对于安全性要求较高的应用来说非常重要。另外,MEC 服务器通常具有较高的计算能力,因此特别适合于分析处理大量数据。同时,由于 MEC 距离用户或信息源在地理上非常邻近,使得网络响应用户请求的时延大大减小,也降低了传输网和核心网部分发生网络拥塞的可能性。最后,位于网络边缘的 MEC 能够实时获取例如基站 ID、可用带宽等网络数据以及与用户位置相关的信息,从而进行链路感知自适应,并且为基于位置的应用提供部署的可能性,可以极大地改善用户的服务质量体验。

从 2014 年 12 月开始,ETSI MEC ISG 开始致力于 MEC 的研究,旨在提供在多租户环境下运行第三方应用的统一规范。经过努力,ISG MEC 已经公布了关于 MEC 的基本技术需求和参考架构的相关规范^[5]。在参考文献[5]中,ISG MEC 对 MEC 的网络框架和参考架构进行了定义。图 1 是 MEC 的基本框架,该框架从一个比较宏观的层次出发,对 MEC 下不同的功能实体进行了网络(network)、ME (mobile edge) 主机水平 (ME host level) 和 ME 系统水平 (ME system level) 这 3 个

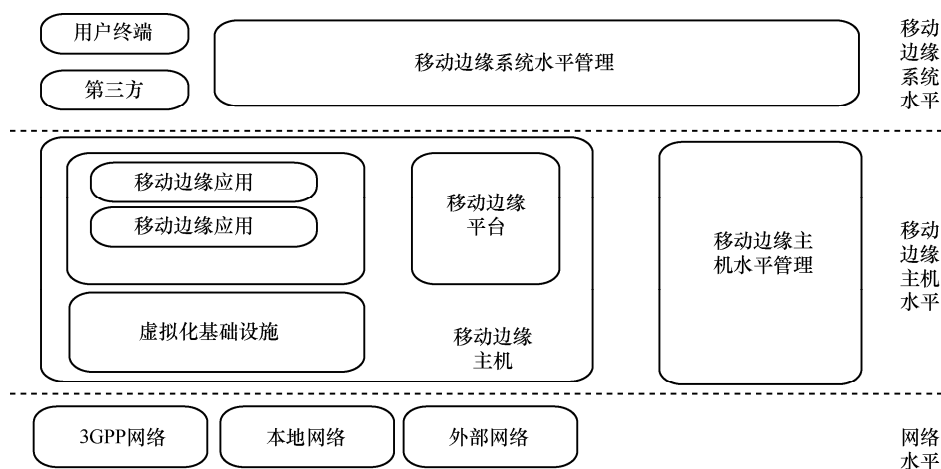


图1 MEC的基本框架

层次的划分。其中，MEC 主机水平包含 MEC 主机（ME host）和相应的 ME 主机水平管理实体（ME host-level management entity），ME 主机又可以进一步划分为 ME 平台（ME platform）、ME 应用（ME application）和虚拟化基础设施（virtualization infrastructure）。网络水平主要包含 3GPP 蜂窝网络、本地网络和外部网络等相关的外部实体，该层主要表示 MEC 工作系统与局域网、蜂窝移动网或者外部网络的接入情况。最上层是 ME 系统水平的管理实体，负责对 MEC 系统进行全局掌控。

图2是一个更为详细的 MEC 参考架构，该架构在图1所示的高水平框架的基础之上还详细定义了各个功能实体之间的相互关联，并抽象出3种不同类型的参考点。其中，Mp代表和ME平台应用相关的参考点，Mm代表和管理相关的参考点，Mx代表和外部实体相关的参考点。

在图2所示架构下，ME 主机由 ME 平台、ME 应用和虚拟化基础设施组成。虚拟化基础设施可以为 ME 应用提供计算、存储和网络资源，并且可以为 ME 应用提供持续的存储和时间相关的

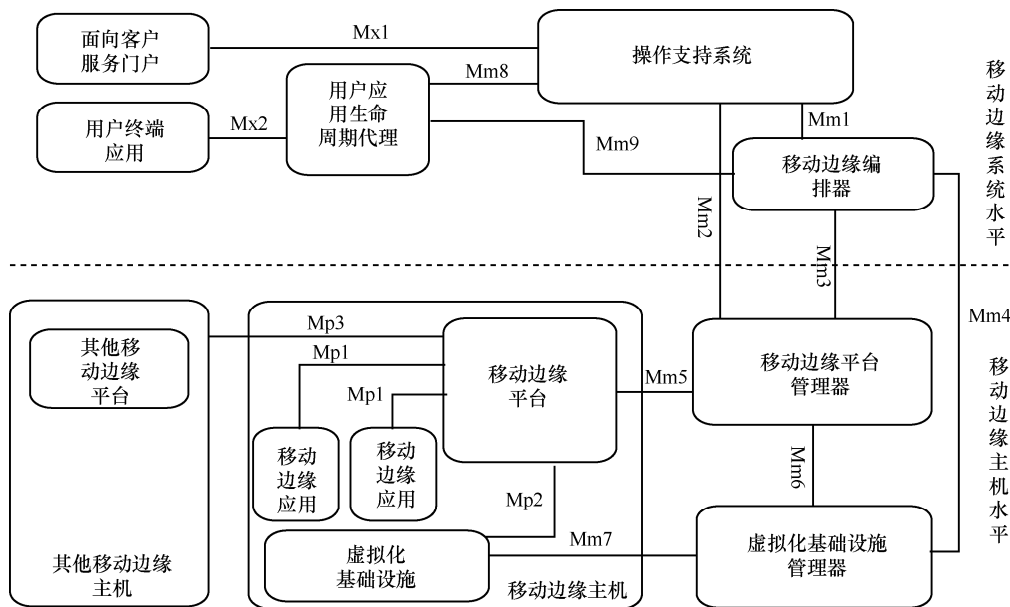


图2 更为详细的 MEC 参考架构



信息,它包含一个数据转发平面来为从 ME 平台接收到的数据执行转发规则,并在各种应用、服务和网络之间进行流量的路由。ME 平台从 ME 平台管理器、ME 应用或 ME 服务处接收流量转发规则,并且基于转发规则向转发平面下发指令。另外,ME 平台还支持本地域名系统(domain name system, DNS)代理服务器的配置,可以将数据流量重定向到对应的应用和服务。ME 平台还可以通过 Mp3 参考点与其他的 ME 平台进行通信,在分布式 MEC 系统的协作机制中, Mp3 参考点可以作为不同 ME 平台互联的基础。

ME 应用是运行在 ME 虚拟化基础设施上的虚拟机实例,这些应用通过 Mp1 参考点与 ME 平台相互通信。Mp1 参考点还可提供标识应用可用性、发生 ME 切换时为用户准备或重定位应用状态等额外功能。

ME 平台管理器 (ME platform manager, MEPM) 具有 ME 平台元素管理、ME 应用生命周期管理以及 ME 应用规则和需求管理等功能。ME 应用生命周期管理包括 ME 应用程序的创建和终止,并且为 ME 编排器 (ME orchestrator, MEO) 提供应用相关事件的指示消息。ME 应用规则和需求管理包括认证、流量规则、DNS 配置和冲突协调等。ME 平台和 MEPM 之间使用 Mm5 参考点,该参考点实现平台和流量过滤规则的配置,并且负责管理应用的重定位和支持应用的生命周期程序。Mm2 是操作支持系统 (OSS) 和 MEPM 之间的参考点,负责 ME 平台的配置和性能管理。Mm3 是 MEO 和 MEPM 之间的参考点,负责为应用的生命周期管理和应用相关的策略提供支持,同时为 ME 的可用服务提供时间相关的信息。

MEO 是 ME 提供的核心功能, MEO 宏观掌控 ME 网络的资源和容量,包括所有已经部署好的 ME 主机和服务、每个主机中的可用资源、已经被实例化的应用以及网络的拓扑等。在为用户选择接入的目标 ME 主机时, MEO 衡量用户需求

和每个主机的可用资源,为其选择最为合适的 ME 主机,如果用户需要进行 ME 主机的切换,则由 MEO 来触发切换程序。MEO 与 OSS 之间通过 Mm1 参考点来触发 ME 应用的实例化和终止。MEO 与虚拟化基础设施管理器 (VIM) 之间通过 Mm4 参考点来管理虚拟化资源和应用的虚拟机映像,同时维持可用资源的状态信息。

从 ME 系统的角度来看, OSS 是支持系统运行的最高水平的管理实体。OSS 从面向用户服务 (customer-facing service, CFS) 门户和用户终端 (UE) 接收实例化或终止 ME 应用的请求,检查应用数据分组和请求的完整性和授权信息。经过 OSS 认证授权的请求数据分组会通过 Mm1 参考点被转发到 MEO 进行进一步处理。

CFS 门户实体相当于第三方接入点,开发商使用该接口将自己开发的各应用接入运营商的 ME 系统中,企业或者个人用户也可以通过该接口选择其感兴趣的应用,并指定其使用的时间和地点。CFS 通过 Mx1 参考点与 OSS 实现通信。

用户应用生命周期代理 (user app LCM proxy) 是供 ME 用户使用来请求应用相关的实例化和终止等服务的实体。该实体可以实现外部云和 ME 系统之间的应用重定位,负责对所有来自外部云的请求进行认证,然后分别通过 Mm8 和 Mm9 参考点发送给 OSS 和 MEO 做进一步处理。值得注意的是, LCM 只能通过移动网络接入, Mx2 参考点提供了 UE 与 LCM 相互通信的基础。

VIM 用于管理 ME 应用的虚拟资源,管理任务包括虚拟计算、存储和网络资源的分配和释放,软件映像也可以存储在 VIM 上以供应用的快速实例化。同时, VIM 还负责收集虚拟资源的信息,并通过 Mm4 参考点和 Mm6 参考点分别上报给 MEO 和 MEPM 等上层管理实体。

3 优势

相比于传统的网络架构和模式, MEC 具有很

多明显的优势,能改善传统网络架构和模式下时延高、效率低等诸多问题,也正是这些优势,使得 MEC 成为未来 5G 的关键技术。本节主要对 MEC 的优势加以概括。

3.1 低时延

MEC 将计算和存储能力“下沉”到网络边缘,由于距离用户更近,用户请求不再需要经过漫长的传输网络到达遥远的核心网被处理,而是由部署在本地的 MEC 服务器将一部分流量进行卸载,直接处理并响应用户,因此通信时延将会大大降低。MEC 的时延节省特性在视频传输和 VR 等时延敏感的相关应用中表现得尤为明显。以视频传输为例,在不使用 MEC 的传统方式下,每个用户终端在发起视频内容调用请求时,首先需要经过基站接入,然后通过核心网连接目标内容,再逐层进行回传,最终完成终端和该目标内容间的交互,可想而知,这样的连接和逐层获取的方式是非常耗时的。引入 MEC 解决方案后,在靠近 UE 的基站侧部署 MEC 服务器,利用 MEC 提供的存储资源将内容缓存在 MEC 服务器上,用户可以直接从 MEC 服务器获取内容,不再需要通过漫长的回程链路从相对遥远的核心网获取内容数据。这样可以极大地节省用户发出请求到被响应之间的等待时间,从而提升用户服务质量体验。参考文献[6]证明了在 Wi-Fi 和 LTE 网络中使用边缘计算平台可以明显改善互动型和密集计算型应用的时延。参考文献[7]进一步证实了通过微云在网络边缘进行计算卸载可以改善响应时延至中心云卸载方案的 51%。因此,MEC 对于未来 5G 网络 1 ms RTT 的时延要求来说是非常有价值的^[8]。

3.2 改善链路容量

部署在移动网络边缘的 MEC 服务器能对流量数据进行本地卸载,从而极大地降低对传输网和核心网带宽的要求。以第 3.1 节中提到的视频传输为例,对于某些流行度较高的视频,如 NBA 比赛、电子产品发布会等,经常是以直播这种高并

发的方式发布,同一时间内就有大量用户接入,并且请求同一资源,因此对带宽和链路状态的要求极高。通过在网络边缘部署 MEC 服务器,可以将视频直播内容实时缓存在距离用户更近的地方,在本地进行用户请求的处理,从而减少对回程链路的带宽压力,同时也可以降低发生链路拥塞和故障的可能性,从而改善链路容量。参考文献[9]证明在网络边缘部署缓存可以节省近 22%的回程链路资源,参考文献[10]提出对于带宽需求型和计算密集型应用来说,在移动网络边缘部署缓存可以节省 67%的运营成本。

3.3 提高能量效率,实现绿色通信

在移动网络下,网络的能量消耗主要包括任务计算耗能和数据传输耗能两个部分,参考文献[11,12]中对 4G 和 5G 下移动网络的能量效率进行了详尽的对比分析和讨论,并指出能量效率和网络容量将是未来 5G 实现广泛部署需要克服的一大难题。MEC 的引入能极大地降低网络的能量消耗。MEC 自身具有计算和存储资源,能够在本地进行部分计算的卸载,对于需要大量计算能力的任务再考虑上交给距离更远、处理能力更强的数据中心或云进行处理,因此可以降低核心网的计算能耗。另一方面,随着缓存技术的发展,存储资源相对于带宽资源来说成本逐渐降低,MEC 的部署也是一种以存储换取带宽的方式,内容的本地存储可以极大地减少远程传输的必要性,从而降低传输能耗。当前已有许多工作致力于研究边缘计算的能耗问题,参考文献[6]证明边缘计算能明显降低 Wi-Fi 网络和 LTE 网络下不同应用的能量消耗。参考文献[13]将大型集中式数据中心下的能量消耗和雾计算下的小型数据中心的能量消耗进行对比,证明了边缘计算能明显改善系统能耗。参考文献[7]进一步证明使用微云进行计算卸载,参照中心云卸载方案可以节省 42%的能量消耗。

3.4 感知链路状况,改善用户服务质量体验(QoS)

部署在无线接入网的 MEC 服务器可以获取



详细的网络信息和终端信息,同时还可以作为本区域的资源控制器对带宽等资源进行调度和分配。以视频应用为例,MEC 服务器可以感知用户终端的链路信息,回收空闲的带宽资源,并将其分配给其他需要的用户,用户得到更多的带宽资源之后,就可以观看更高速率版本的视频,在用户允许的情况下,MEC 服务器还可以为用户自动切换到更高的视频质量版本。链路资源紧缺时,MEC 服务器又可以自动为用户切换到较低速率版本,以避免卡顿现象的发生,从而给予用户极致的观看体验。同时,MEC 服务器还可以基于用户位置提供一些基于位置的服务,例如餐饮、娱乐等推送服务,进一步提升用户的服务质量体验。

4 MEC 研究现状

由于具有上述明显的优势,MEC 一直以来都是产业界和学术界关注和研究的重点。目前,MEC 已经在现网得到了验证,并出现了各种基于 MEC 的现网解决方案,相应的商业模式和标准化讨论也正在如火如荼地进行。本节先从学术角度出发,对与 MEC 概念相似的微云(cloudlet)和雾计算(fog computing)这两个概念加以介绍,并对三者进行进一步的对比区分,然后介绍 MEC 的标准制定现状,最后介绍几个典型的基于 MEC 的相关解

决方案。

4.1 微云与雾计算

MEC 作为边缘计算的一种,在学术界早已引起广泛的关注和研究,参考文献[14]中从计算、存储和通信 3 个角度对 MEC 进行了详细的概述。参考文献[15]详细介绍了 MEC 基本架构,并针对 MEC 的计算卸载功能进行了全方位的讨论。同时,在各种研究工作中,MEC 还常被拿来与同样属于边缘计算的微云和雾计算进行对比^[3]。本节首先简要介绍微云和雾计算的基本概念,然后将二者与 MEC 进行对比,并列出一一些细节上的不同点,具体见表 1。

微云是由移动计算和云计算融合而来的新型网络架构元素,它代表移动终端、微云和云 3 层架构的中间层,可以被视作“盒子里的数据中心”^[16,17]。微云是 OEC (Open Edge Computing) 的研究成果,该项目最初由美国卡耐基梅隆大学发起,而后受到了包括 Intel (英特尔)、华为、Vodafone (沃达丰)在内的多家公司的广泛支持,主要致力于对边缘计算应用场景、关键技术和统一 API 的研究。OEC 基于 OpenStack 开源项目进行扩展,从而得到了微云,目前其源码以及搭建方法也可以在 OEC 的官网上免费获得。微云的设计灵感来自于触觉互联网(tactile network),致力于实现信息的

表 1 MEC、微云和雾计算的比较

条目	发起者	部署位置	主要驱动力及应用场景	是否支持边缘应用感知	移动性和不同边缘节点上相同应用的实时交互的支持
MEC	诺基亚, 华为, IBM, 英特尔, NTT DoCoMo, 沃达丰	位于终端和数据中心之间, 可以和接入点、基站、流量汇聚点、网关等组件共址	主要致力于应用降低时延, 适合物联网、车辆网、视频加速、AR/VR 等多种应用场景	支持, 特别支持对无线接入部分(如可用带宽)的感知	目前只提供终端从一个边缘节点移动到另一个边缘节点情况下的移动性管理支持
微云	美国卡耐基梅隆大学, 英特尔, 华为, 沃达丰	位于终端和数据中心之间, 可以和接入点、基站、流量汇聚点、网关等组件共址; 还可以直接运行在车辆、飞机等终端上	主要从触觉互联网获得灵感, 同样适用于物联网	本身不支持, 但是支持该功能作为独立模块在微云本身之上进行扩展	目前只提供虚拟机映像从一个边缘节点到另一个离终端更近的边缘节点的切换的支持
雾计算	思科	位于终端和数据中心之间, 可以和接入点、基站、流量汇聚点、网关等组件共址	针对需要分布式计算和存储的物联网场景设计	支持	完全支持雾节点之间的分布式应用之间的通信(例如智能交通灯之间的通信)

超低时延传输。相比于 MEC 和雾计算来说,微云主要用于移动增强,能够为移动设备提供丰富的计算资源,尤其关注边缘的视频分析应用,能够提取边缘数据的标签和元数据并传输到云,以实现高效的全局搜索。此外,微云还可以直接运行在终端上,比如车辆、飞机等。

雾计算是指将计算、通信、控制和存储资源与服务分布给用户或靠近用户的设备与系统,从而将云计算模式扩展到网络边缘^[18,19]。雾计算最初是由思科提出来的,更侧重于在物联网上的应用^[20]。2015年11月,ARM、思科、戴尔、英特尔、微软和美国普林斯顿大学联合成立了开放雾联盟(Open Fog Consortium),该联盟旨在通过开发开放式架构、分布式计算、联网和存储等核心技术以及实现物联网全部潜力所需的领导力,加快雾计算的部署。Open Fog 架构利用开放的标准方法,将云端的无缝智能与物联网终端联合在一起。2017年2月,开放雾联盟宣布发布了 Open Fog 参考架构(reference architecture, RA),这是一个旨在支持物联网、5G 和人工智能应用的数据密集型需求的通用技术架构,该架构为雾节点(智能互联设备)与网络、部署模式、层次模型和用例提供了一个中高层次的系统架构视图,标志着雾计算向制定标准迈出了重要的一步,未来的工作将更偏向于新需求和底层细节的研究,由于本文研究的重点是 MEC,所以微云和雾计算的详细架构在此不再加以介绍。

MEC 与微云、雾计算的概念相似,其基本思想都集中在将云计算能力迁移至网络边缘,都属于边缘计算的范畴。但三者在一些基本细节上仍存在一些需要区分之处,表1对这3种概念的不同之处进行了简要的归纳和总结。

4.2 MEC 标准制定现状

MEC 的标准化涉及术语、服务场景、技术要求、参考架构、API 等多个方面。于2014年9月成立的 ETSI MEC ISG 一直致力于推进 MEC 的标

准化制定工作,并已于2016年3月发布了 MEC 白皮书,公布了关于 MEC 的基本技术需求和参考框架的相关规范,目前该工作组正在致力于对无线网络信息服务接口、位置信息服务接口、带宽管理服务接口等几种典型网络应用接口以及平台第三方应用接口的讨论。另外,中国通信标准化协会也在2015年进行了研究报告的立项,并已获得工业和信息化部电信研究院(现更名为中国信息通信研究院)、华为、诺基亚、中兴通讯等多家单位的共同支持。

随着时间的推进,MEC 第一阶段的研究工作已于2016年底结束,第二阶段主要集中在2017年和2018年这两年,主要进行3GPP 和非3GPP 的接入支持、虚拟化支持、类型扩展、新付费模式的支持和各种应用的开发等研究工作。

4.3 MEC 相关实现案例

作为未来5G的关键技术,MEC 也引起了产业界的广泛关注和研究,各大应用服务提供商争相致力于将 MEC 与不同的应用场景结合起来,以提供具体的应用解决方案。本节主要介绍两个具有代表性的基于 MEC 的解决方案。

图3是英特尔中国研究院与英特尔网络平台事业部、中国移动及爱奇艺合作开发的一款在线视频系统。该系统利用 MEC 进行视频加速,视频提供商利用 MEC 的计算、存储和网络功能,通过对用户视频请求数据分组进行分析,为特定的高清付费用户提供充足带宽,以保证其观看体验。OTT 在使用上述系统时,无需对自己的应用网络进行架构性变动,由此可以大幅降低使用成本,加速业务创新。该系统目前已在业界知名的世界移动通信大会(Mobile World Congress, MWC)上现身,并引起广泛关注,并被 ETSI MEC ISG 采纳为典型业务场景之一^[3]。

此外,中兴也提出了基于5G的 MEC 解决方案^[21],该方案适用于 VR 这一典型应用场景。MEC 部署在 RAN 或 C-RAN (cloud RAN) 侧以获取利于统计分析的关键信息,提供低时延的本地化业

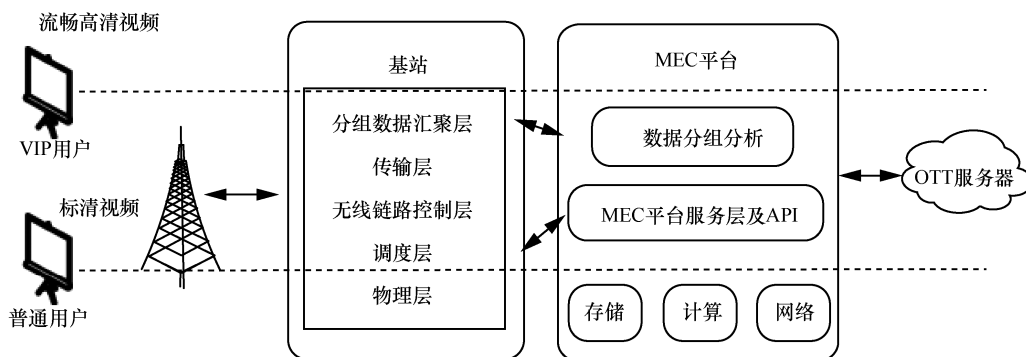


图3 基于 MEC 的在线视频系统

务服务。运营商不仅可以有效减少核心网的网络负载,还能通过本地化的部署,提供实时性高、低时延的 VR 体验,增强 VR 实时互动。该系统的架构如图 4 所示。

5 MEC 关键技术

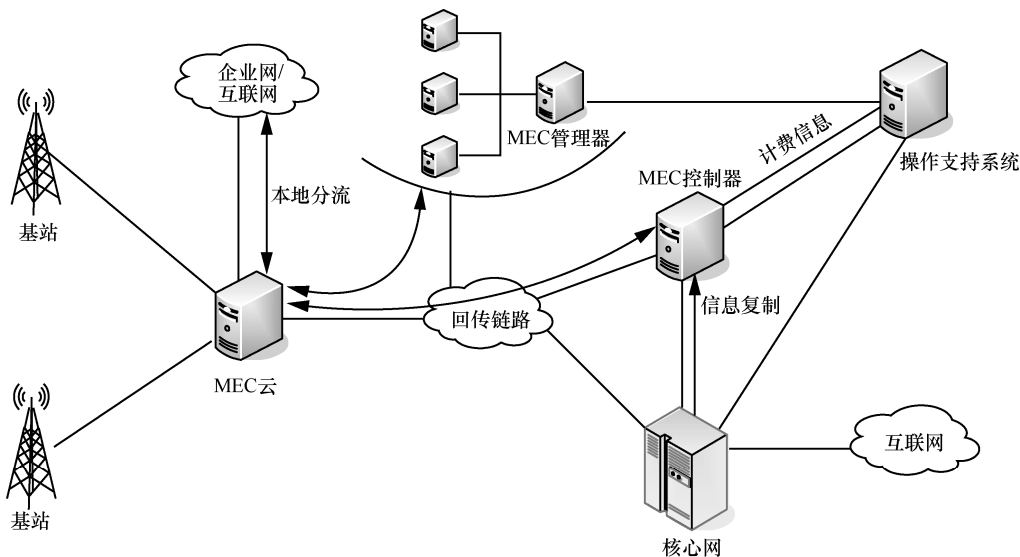
MEC 的实现依赖于虚拟化、云技术和 SDN 等关键技术的支撑,本节主要对这 3 种实现 MEC 的关键技术进行介绍。

5.1 虚拟化技术

虚拟化技术是一种资源管理技术。维基百科对其的定义是:虚拟化技术将计算机的各种实体资源(CPU、内存、磁盘空间、网络适配器等)予以抽象、转换后呈现出来并可供分区、组合为

一个或多个电脑配置环境,由此打破实体结构间不可分割的障碍,使用户可以比原本配置更好的方式应用这些电脑硬件资源。虚拟化技术中使用 Hypervisor 实现了应用软件环境与基础硬件资源的解耦,使得可以在同一个硬件平台上部署多个虚拟机,从而共享硬件资源,多个虚拟机之间通过虚拟交换机实现顽健、安全和高效的通信,并通过指定的物理接口实现数据流量的路由。

虚拟化技术与网络的结合催生了网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)技术,该技术将网络功能整合到行业标准的服务器、交换机和存储硬件上,并且提供优化的虚拟化数据平面,可通过服务器上运行的软件实现管理从而取代传统的物理网络设备。

图4 系统结构^[21]

NFV 使得 MEC 平台中多个第三方应用和功能可以共平台部署,各种应用和服务实际上是运行于虚拟化基础设施平台上的虚拟机,极大地方便了 MEC 实现统一的资源管理。

5.2 云技术

虚拟化技术促进了云技术的发展,云技术的出现使得按需提供计算和存储资源成为可能,极大地增加了网络和服务部署的灵活性和可扩展性。现今大多数移动手机应用都是基于云服务设计的,值得一提的是,云技术与移动网络的结合还促进了 C-RAN 这一创新性应用的产生。C-RAN 将原本位于基站的基带处理单元等需要耗费计算和存储资源的模块迁移到云上,在很大程度上解决了基站的容量受限问题,提高了移动网络的系统能量效率^[22,23]。

MEC 技术在网络边缘提供计算和存储资源,NFV 和云技术能够帮助 MEC 实现多租户的共建。由于 MEC 服务器的容量相对于大规模数据中心来说还是较小,不能提供大规模数据中心带来的可靠性优势,所以需要结合云技术引入云化的软件架构,将软件功能按照不同能力属性分层解耦地部署,在有限的资源条件下实现可靠性、灵活性和高性能。

5.3 软件定义网络(SDN)技术

SDN 技术是一种将网络设备的控制平面与转发平面分离,并将控制平面集中实现的软件可编程的新型网络体系架构。SDN 技术采用集中式的控制平面和分布式的转发平面,两个平面相互分离,控制平面利用控制—转发通信接口对转发平面上的网络设备进行集中控制,并向上提供灵活的可编程能力,这极大地提高了网络的灵活性和可扩展性^[24]。

当前已有很多研究致力于将 SDN 技术与移动网络相结合。参考文献[25]基于 SDN 技术和 NFV 技术提出了一个名为 cellular SDN (CSDN) 的新型蜂窝网架构,该架构简化了网络运营商对网络的管理和控制,并且支持灵活、开放和可编程的

服务创建。参考文献[26]将 SDN 技术和蜂窝核心网结合,提出了一个灵活的蜂窝核心网架构 SoftCell。同时,SDN 作为关键技术,在 5G 网络的研究中也被广泛采用,在 5G 核心网测试平台 Open 5G Core 的设计中就引进了 SDN 技术将 LTE EPC 下的服务网关(SGW)和 PDN 网关(PGW)分别抽象成了用户平面网关(SGW-U, PGW-U)和控制平面网关(SGW-C, PGW-C),从而提高了网络的灵活性和可扩展性。

MEC 部署在网络的边缘,靠近接入侧,这意味着核心网网关功能将分布在网络的边缘,这会造成大量接口的配置、对接和调测。利用 SDN 技术将核心网的用户面和控制面进行分离,可以实现网关的灵活部署,简化组网。在参考文献[23]中,结合 NFV 技术、SDN 技术和 MEC,设计了一个新型的移动网络系统 SD-MEC。该系统在不同接入点分布式部署 MEC 服务器,将业务进行本地卸载,从而降低了核心网的信令开销,降低了由于长距离传输而发生网络突发状况的可能性,增强了用户的服务质量体验。另外,SD-MEC 有专门的控制器对系统进行管控,从而降低了管理的复杂性,同时使得新服务的部署变得更加灵活。

6 MEC 典型应用场景

4G 主要是针对视频业务而设计的网络架构,但是在即将到来的 5G 时代,不可避免地会出现甚至已经出现越来越多样的服务场景,这些场景对网络的时延、带宽、计算和存储等各个方面都提出了很高的要求。由于其“与生俱来”的低时延和高计算能力,MEC 恰恰是解决这类需求的关键技术。同时,由于同时与 4G 兼容,MEC 的应用非常广泛。本节主要列举几个典型的应用场景,同时分析 MEC 在这些场景中的应用价值。

6.1 计算密集型应用

计算密集型应用需要在很短的时间内进行大量计算,因此对装置的计算能力要求极高。增强现



实 (augmented reality, AR) 和虚拟现实 (virtual reality, VR) 都属于计算密集型应用, 增强现实是一种利用计算机产生的附加信息对使用者所看到的真实世界景象进行增强或扩展的技术, 虚拟现实则是一种利用计算机融合多元信息和实体行为而模拟出来三维动态视景的计算机仿真技术, 这两种技术都需要收集包括用户位置和朝向等用户状态相关的实时信息, 然后进行计算并根据计算结果加以处理。MEC 服务器可以为其提供丰富的计算资源和存储资源, 缓存需要推送的音视频内容, 并且基于定位技术和地理位置信息一一对应, 结合位置信息确定推送内容, 并发送给用户或迅速模拟出三维动态视景并与用户进行交互^[3,27]。

6.2 智能视频加速

研究表明, 在移动数据流量中有超过一半的部分是视频流量, 并且该比例呈逐年上升趋势。从用户角度来说, 观看视频可以分为点播和直播。点播是指在被请求视频已经存在于源服务器的情况下用户向视频服务器发送视频观看请求, 直播则指在内容产生的同时用户对内容进行观看。在传统的视频系统中, 内容源将产生的数据上传到 Web 服务器, 然后再由 Web 服务器响应用户的视频请求。在这种传统方式下, 内容基于 TCP 和 HTTP 进行下载, 或是以流的形式传递用户。但是 TCP 并不能快速适应 RAN 的变化, 信道环境改变、终端的加入和离开等都会导致链路容量的变化, 另外, 这种长距离的视频传输也增大了链路故障的概率, 同时造成很大的时延, 从而不能保证用户的服务质量体验。为了改善上述问题, 当下学术界和产业界普遍采用 CDN 分发机制, 将内容分发到各个 CDN 节点上, 再由各个 CDN 节点响应对应区域中的用户请求^[28,29]。CDN 分发机制的引进的确在一定程度上缓解了上述问题, 但这种改进对于直播这种高并发, 并且对实时性和流畅性要求很高的场景来说仍然有力不从心之处。

MEC 技术的引入可以解决上述问题, 内容源可以直接将内容上传到位于网络边缘的 MEC 服务器, 再由 MEC 服务器响应用户的视频请求, 这样可以极大地降低用户观看视频的时延。同时, 由于 MEC 具有强大的计算能力, 可以实时感知链路状态并根据链路状态对视频进行在线转码, 从而保障视频的流畅性, 实现智能视频加速。另外, MEC 服务器还可以负责本区域用户的空口资源的分配和回收, 从而增加网络资源的利用率。

6.3 车联网

车联网场景下有大量的终端用户, 如车辆、道路基础设施、支持 V2X 服务的智能手机等, 同时对对应着多种多样的服务, 例如一些紧急事件的广播等基本的道路安全服务以及一些由应用开发商和内容提供商提供的增值服务, 例如停车定位、增强现实或其他娱乐服务等^[30]。MEC 服务器可以部署于沿道路的 LTE 基站上, 利用车载应用和道路传感器接收本地信息, 对其加以分析。并对那些优先级高的紧急事件以及需要进行大量计算的服务进行处理, 从而确保行车安全、避免交通堵塞, 同时提升车载应用的用户体验^[31]。在此方面, 德国已经研发了数字高速公路试验台来提供交通预警服务, 该试验台用于在 LTE 环境下在同一区域内进行车辆预警消息的发布^[32]。

6.4 物联网

据思科研究报告表明, 到 2020 年将会有 500 亿个终端实现互联^[33]。物联网“万物互联”的场景下, 各种各样的终端产生海量的数据, 而通常 IoT 装置在处理器和内存容量方面是资源受限的, 因此, MEC 可以作为物联网汇聚网关使用^[3], 将终端产生的海量数据进行汇聚并加以分析处理。同时, 不同的 IoT 装置使用不同的接入方式, 比如 3G、LTE、Wi-Fi 或其他无线接入方式, 因此这些 IoT 装置产生的消息通常由于协议不同而使用不同的封装方式, MEC 可以对这些来自于不同协议的数据分组进行处理、分析和分发。另外, MEC 还可

以作为控制节点对这些 IoT 装置进行远程控制, 并提供实时的分析和配置^[31,32]。

7 MEC 服务器部署场景

在设计 MEC 解决方案时, 还必须考虑 MEC 服务器在网络中的部署位置。MEC 服务器可以被部署在网络中的多个位置, 例如可以位于 LTE 宏基站 (eNode B) 侧、3G 无线网络控制器 (radio network controller, RNC) 侧、多无线接入技术 (multi-radio access technology, multi-RAN) 蜂窝汇聚点侧或者核心网边缘。本节旨在介绍 MEC 服务器的几个主要的部署场景, 并且对不同部署方式的优势和存在问题加以简要分析^[3,34]。

7.1 4G EPC 架构下的 MEC 部署

(1) MEC 服务器部署在无线接入网 (RAN) 侧

如图 5 所示, MEC 可以部署在 RAN 侧的多个 eNode B 汇聚节点之后, 这是目前比较常见的部署方式。MEC 服务器也可以部署在单个 eNode B 节点之后, 如图 6 所示, 这种方式适合学校、大型购物中心、体育场馆等热点区域下 MEC 的部署。将 MEC 服务器部署在 RAN 侧的优势在于可以更方便地通过监听、解析 S1 接口的信令来获取基站侧无线相关信息, 但是该方案需要进一步解决计费 and 合法监听等安全性问题。

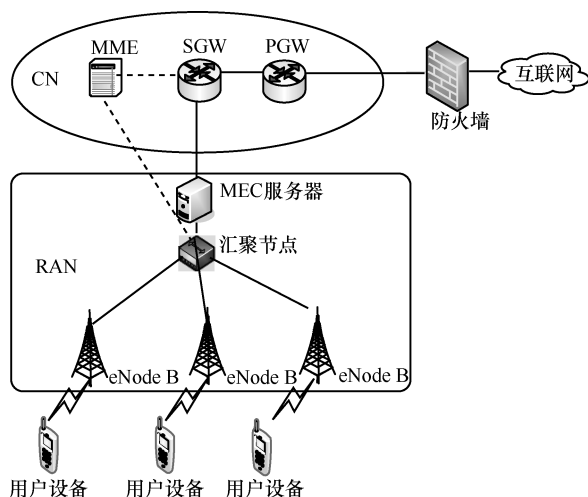


图 5 MEC 服务器部署在基站汇聚节点之后

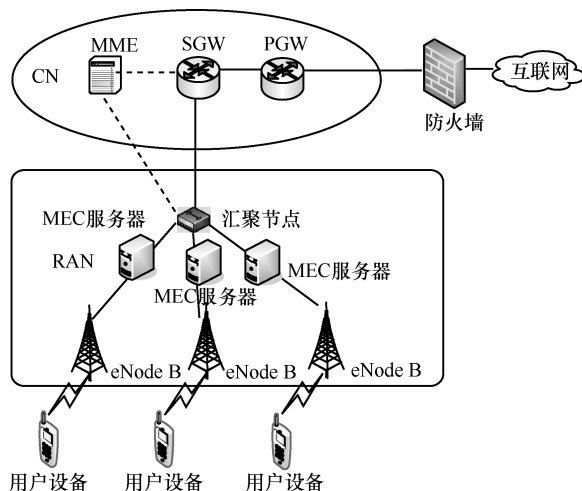


图 6 MEC 服务器部署在单个基站之后

(2) MEC 服务器部署在核心网 (CN) 侧

MEC 服务器也可以部署在核心网边缘, 在 PGW 之后 (或与 PGW 集成在一起), 从而解决 RAN 部署方案下的计费和安全问题。但部署在核心网侧会存在距离用户较远、时延较大和占用核心网资源的问题。图 7 所示方案是不改变现有的 EPC 架构, 将 MEC 服务器与 PGW 部署在一起。UE 发起的数据业务经过 eNode B、汇聚节点、SGW、PGW+MEC 服务器, 然后到互联网。图 8 所示方案需要改变现有的 EPC 架构, 将原 PGW 拆分成 P1GW 和 P2GW (即 DGW), 其中, P1GW 驻留在原位置, DGW 下移到 RAN 侧或者核心网边缘, DGW 负责计费、监听、鉴权等功能, MEC 服务器和 DGW 部署在一起。在此方案下, P1GW 和 DGW 之间为私有接口, 需由同一设备厂商提供。

7.2 5G 架构下的 MEC 部署

如图 9 所示, 在 5G 架构下, MEC 服务器也有两种部署方式, 分别如图 9 中 MEC 服务器 1 和 MEC 服务器 2。MEC 服务器可以部署在一个或多个 Node B 之后, 使数据业务更靠近用户侧, 如图 9 中粗实线所示, UE 发起的数据业务经过 Node B、MEC 服务器 1, 然后到达互联网, 同样地, 在该方式下计费和合法监听问题需进一步解决。MEC 服务器也可以部署在用户平面网关

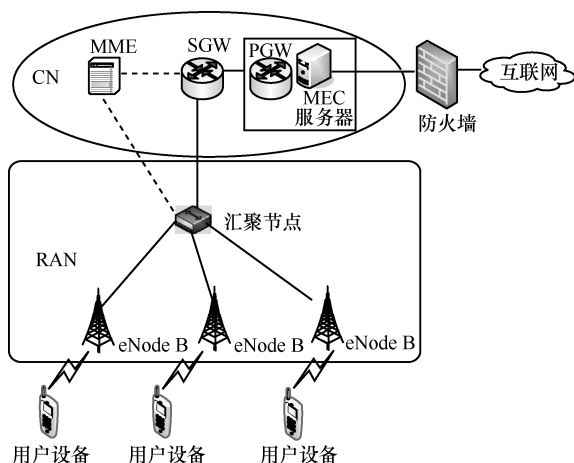


图 7 MEC 服务器与 PGW 部署在一起

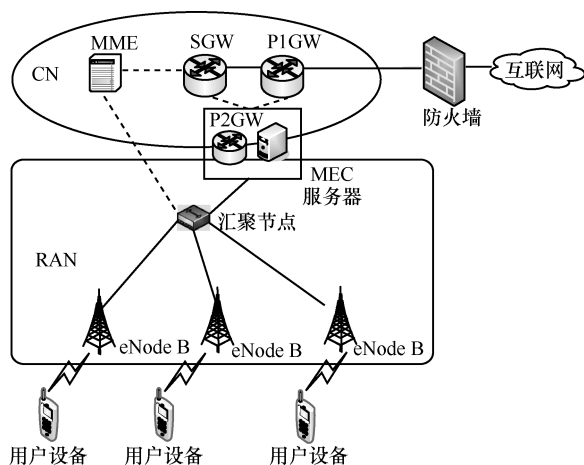


图 8 MEC 服务器与 DGW 部署在一起

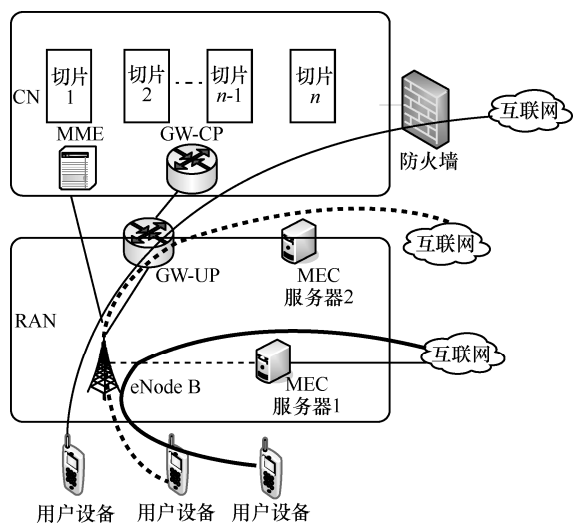


图 9 MEC 在 5G 架构下的部署

GW-UP 后, 如图 9 中粗虚线所示, UE 发起的数据业务经过 Node B、GW-UP、MEC 服务器 2, 最

后到达互联网, 同理, 此部署方法将以牺牲一部分时延为代价。

8 问题和挑战

MEC 在移动网络边缘提供计算、存储和网络资源, 可以极大地降低处理时延, 实现绿色通信, 提升用户服务质量体验。但是, 在实现大规模应用之前, MEC 以及各种基于 MEC 的解决方案还存在一些问题和挑战, 主要包含以下 3 个方面。

8.1 移动性问题

MEC 系统所涉及的移动性问题主要分为两种情况, 一种是移动终端在特定 MEC 服务器覆盖范围内的移动, 这种移动不涉及 MEC 服务器的切换, 另一种情况则是移动终端从一个源 MEC 服务器移动到另一个目的 MEC 服务器。当用户在一个 MEC 服务器范围内移动时, MEC 服务器只需要维持移动终端与服务器上应用程序的正常连接, 同时跟踪用户终端当前连接的基站来确保正确的下行数据路由即可。当用户从一个 MEC 服务器切换到另一个 MEC 服务器上时, 如何保持移动终端与应用间的业务连接将是一个难点。对于 MEC 系统中那些不需要跟踪 UE 状态信息的状态独立的应用来说, 用户移动到另一个 MEC 服务器意味着重新在目标 MEC 服务器上实例化一个相同的应用, 而对于面向用户的服务, 特别是那些与用户活动相关的应用而言, 用户移动到另一个 MEC 服务器将意味着用户相关信息的迁移, 甚至是整个应用实例的迁移。因此, MEC 系统需要提供服务连续性、应用迁移和应用特定用户相关信息的迁移等移动性支持。基于某些特定场景, MEC 还需要支持 UE 在移动边缘系统与外部云之间的迁移^[35]。

由于 MEC 上的各个应用实际上是运行在虚拟化基础设施上的各种虚拟机, 因此虚拟机的在线迁移对于 MEC 的移动性研究是可以借鉴的。另外, ETSI 和各大厂商也都在关注 MEC 移动性的

问题,相信随着研究的不断深入,移动性问题将会得到全方位的解决。

8.2 安全及计费问题

在当前网络架构下,计费功能由核心网负责。移动边缘计算平台将网络服务功能“下沉”到网络边缘,在网络边缘就可以进行计算卸载,这使得计费功能不易实现。针对本文第7节中提到的不同的部署方案,计费功能实现的难易程度也不同。目前,ETSI的标准化工作也尚未涉及计费功能的实现,因此,当前还没有统一的计费标准,不同的公司提供不同的计费标准。

由于在移动边缘计算场景下,移动终端将会面临更加复杂的环境,因此原本用于云计算的许多安全解决方案可能不再适用于移动边缘计算^[36]。不同层次的网关等网络实体的认证也是一个需要考虑的安全问题,因此,MEC系统必须解决认证、鉴权等安全性问题。当前一些研究者提出了基于公开密钥基础设施(public key infrastructure, PKI)的解决方案^[37]和基于Diffie-Hellman密钥交换的解决方案^[38]。参考文献[39]提出了一种名为HoneyBot的移动边缘计算平台防御技术。HoneyBot节点能够探测、追踪和区分D2D内部攻击,该技术的速度和准确性同时受到HoneyBot节点数量和位置的影响^[40]。

一方面,MEC的安全性和计费问题的解决需要从MEC设计的架构上来考虑,另一方面,可以将各种安全性解决方案与MEC进行有机结合,以模块化的形式为系统提供不同程度的安全防护。最后,由于计费问题涉及的网元较多,其实现还需要设备供应商、OTT、运营商等多方的共同努力和探索。

8.3 隐私保护问题

在基于MEC的D2D通信中,针对内容共享和计算协作等问题,必须考虑用户的隐私保护。另外,在一些私有网络场景下,比如个人微云,也必须考虑隐私保护的问题,因此有必要在MEC

网络中加入隐私保护实体。现存的很多隐私保护方案都是通过加入一个受信平台模块(trusted platform module, TPM)实现的,例如在雾计算的典型应用场景智能电网(smart grid)中,通过智能电表的数据加密和雾终端的汇聚点的处理保证数据的私密性^[41]。

由于隐私保护问题是偏向于定制型的业务,不同的用户和业务对于隐私保护的需求程度不同,因此可以借鉴上述这种加入受信平台模块的思路,模块和平台之间只需遵循相应的API规范即可。

9 结束语

本文主要从基本概念、参考架构、优势、研究现状、关键技术、应用场景、部署场景以及存在问题和挑战等方面对MEC技术进行了系统性介绍,首先介绍了MEC的基本概念和MEC的参考框架,然后对MEC技术的优势加以归纳并阐述,从学术界、工业界和标准制定3个角度介绍了MEC的研究现状,随后进一步介绍了实现MEC的3个关键技术,进一步详细介绍了MEC技术的应用场景以及MEC服务器在现网和未来5G下的部署方案,并总结了不同部署方案的优缺点,最后对MEC现存的几个尚待解决的问题做了进一步归纳,并对相应的解决方向做了简要的展望。

随着向5G阶段的不断迈进,移动网络将迎来一系列令人兴奋的新型办公和娱乐方式,比如基于移动内容分发网络的高清视频体验和智能场馆服务、基于AR/VR的手游和基于位置服务的营销以及与车联网结合的交通辅助系统和智能驾驶系统等,MEC将在这些新型场景下大放异彩。同时,MEC新的行业标准和MEC平台的广泛部署,也将提供一种新型的网络生态体系和价值链,为各大移动运营商、设备提供商、OTT和第三方公司带来新的运营模式。在未来5G这个集合了计算和通信技术的大平台上,MEC必是其中不可缺少的



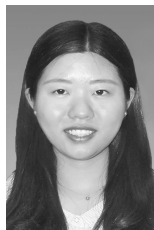
一个重要环节, 将为网络业务和服务的创新带来无限可能。

参考文献:

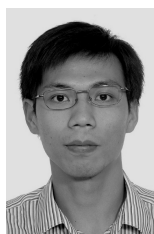
- [1] 王胡成, 徐晖, 程志密, 等. 5G 网络技术研究现状和发展趋势[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 156-162.
WANG H C, XU H, CHENG Z M, et al. Current research and development trend of 5G network technologies[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(9): 156-162.
- [2] YU Y. Mobile edge computing towards 5G: vision, recent progress, and open challenges[J]. China Communications, 2016, 13(S2): 89-99.
- [3] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—a key technology towards 5G[S]. ETSI White Paper, 2015: 1-16.
- [4] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On multi-access edge computing: a survey of the emerging 5G network edge architecture & orchestration[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 10.1109/COMST.2017.2705720.
- [5] ETSI. Mobile edge computing (MEC); framework and reference architecture[S]. 2016.
- [6] HU W, GAO Y, HA K, et al. Quantifying the impact of edge computing on mobile applications[C]//The 7th ACM Sigops Asia-Pacific Workshop on Systems, August 4-5, 2016, Hong Kong, China. New York: ACM Press, 2016: 5.
- [7] GAO Y, HU W, HA K, et al. Are cloudlets necessary?[J/OL]. (2015-11-11)[2017-08-03]. https://www.researchgate.net/publication/283665207_Are_Cloudlets_Necessary.
- [8] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [9] BASTUG E, BENNIS M, DEBBAH M. Living on the edge: the role of proactive caching in 5G wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(8): 82-89.
- [10] MEHTA A, TÄRNEBERG W, KLEIN C, et al. How beneficial are intermediate layer data centers in mobile edge networks?[C]//IEEE International Workshops on Foundations and Applications of Self Systems, Sept 12-16, 2016, Augsburg, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2016: 222-229.
- [11] GE X, TU S, MAO G, et al. 5G ultra-dense cellular networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 23(1): 72-79.
- [12] GE X, YANG J, GHARAVI H, et al. Energy efficiency challenges of 5G small cell networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 184-191.
- [13] JALALI F, HINTON K, AYRE R, et al. Fog computing may help to save energy in cloud computing[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(5): 1728-1739.
- [14] WANG S, ZHANG X, ZHANG Y, et al. A survey on mobile edge networks: convergence of computing, caching and communications[J]. IEEE Access, 2017(5): 6757-6779.
- [15] MACH P, BECVAR Z. Mobile edge computing: a survey on architecture and computation offloading[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 10.1109/COMST.2017.2682318.
- [16] HASEEB M, AHSAN A, MALIK A W. Cloud to cloudlet—an intelligent recommendation system for efficient resources management: mobile cache[C]//International Conference on Frontiers of Information Technology, Dec 19-21, 2016, Islamabad, Pakistan. Piscataway: IEEE Press, 2017: 40-45.
- [17] PANG Z, SUN L, WANG Z, et al. A survey of cloudlet based mobile computing[C]//International Conference on Cloud Computing and Big Data, Nov 4-6, 2015, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 268-275.
- [18] GONZALEZ N M, GOYA W A, PEREIRA R D F, et al. Fog computing: data analytics and cloud distributed processing on the network edges[C]//Computer Science Society, Oct 10-14, 2016, Valparaíso, Chile. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [19] ELMROTH E, LEITNER P, SCHULTE S, et al. Connecting fog and cloud computing[J]. IEEE Cloud Computing, 2017, 4(2): 22-25.
- [20] STOJMENOVIC I. Fog computing: a cloud to the ground support for smart things and machine-to-machine networks[C]//Telecommunication Networks and Applications Conference, Nov 26-28, 2014, Southbank, Australia. Piscataway: IEEE Press, 2015: 117-122.
- [21] 中兴通讯. MEC 解决方案打造“无限”VR 体验[J]. 通信世界, 2016(20): 49.
ZTE. MEC solutions: creating “unlimited” VR experience[J]. Communication World, 2016(20): 49.
- [22] TRAN T X, HAJISAMI A, PANDEY P, et al. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: new paradigms, scenarios, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4): 54-61.
- [23] SALMAN O, ELHAJJ I, KAYSSI A, et al. Edge computing enabling the internet of things[C]//Internet of Things, Dec 14-16, 2015, Milan, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2015: 603-608.
- [24] LI C, DUAN X D, CHEN W, et al. Thoughts and practices about SDN and NFV[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(8): 23-27.
- [25] JIN X, LI L E, VANBEVER L, et al. Softcell: scalable and flexible cellular core network architecture[C]//The ninth ACM conference on Emerging networking experiments and technologies, December 9-12, 2013, Santa Barbara, USA. New York: ACM Press, 2013: 163-174.
- [26] LI L E, MAO Z M, REXFORD J. Toward software-defined cellular networks[C]//2012 European Workshop on Software Defined Networking (EWSN), Oct 25-26, 2012, Darmstadt, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2012: 7-12.
- [27] ETSI. Mobile edge computing-introductory technical white

- paper[R]. 2014.
- [28] PALAU C E, MARES J, MOLINA B, et al. Wireless CDN video streaming architecture for IPTV[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 53(3): 591-613.
- [29] KANG S, YIN H. A hybrid CDN-P2P system for video-on-demand[C]//Second International Conference on Future Networks, January 22-24, 2010, Sanya, China. Piscataway: IEEE Press, 2010: 309-313.
- [30] LI L, LI Y, HOU R. A novel mobile edge computing-based architecture for future cellular vehicular networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 19-22, 2017, San Francisco, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [31] SABELLA D, VAILLANT A, KUURE P, et al. Mobile-edge computing architecture: the role of MEC in the internet of things[J]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2016, 5(4): 84-91.
- [32] AHMED A, AHMED E. A survey on mobile edge computing[C]//2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), Jan 7-8, 2016, Coimbatore, India. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-8.
- [33] EVANS D. The internet of things: how the next evolution of the internet is changing everything[J]. *CISCO White Paper*, 2011(1): 1-11.
- [34] 李福昌, 李一喆, 唐雄燕, 等. MEC 关键解决方案与应用思考[J]. *邮电设计技术*, 2016 (11): 81-86.
LI F C, LI Y Z, TANG X Y, et al. MEC key solutions and application consideration[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2016(11): 81-86.
- [35] 乌云霄, 戴晶. 面向 5G 的边缘计算平台及接口方案研究[J]. *邮电设计技术*, 2017(3): 10-14.
WU Y X, DAI J. Research on 5G oriented edge computing platform and interface scheme[J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2017(3): 10-14.
- [36] STOJMENOVIC I, WEN S. The fog computing paradigm: Scenarios and security issues[C]//2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Sept 7-10, 2014, Warsaw, Poland. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-8.
- [37] LAW Y W, PALANISWAMI M, KOUNGA G, et al. WAKE: key management scheme for wide-area measurement systems in smart grid[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(1): 34-41.
- [38] FADLULLAH Z M, FOUHA M M, KATO N, et al. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(4): 60-65.
- [39] TOBIAS L, VEIKKO P, DAVIDE B, et al. Honeybot, your man in the middle for automated social engineering[C]//LEET'10, 3rd USENIX Workshop on Large-Scale Exploits and Emergent Threats, April 27, 2010, San Jose, USA. New York: ACM Press, 2010: 11.
- [40] MTIBAA A, HARRAS K, ALNUWEIRI H. Friend or foe? detecting and isolating malicious nodes in mobile edge computing platforms[C]//2015 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom), Nov 30-Dec 3, 2015, Vancouver, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2015: 42-49.
- [41] LU R, LIANG X, LI X, et al. Eppa: An efficient and privacy-preserving aggregation scheme for secure smart grid communications[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(9): 1621-1631.

[作者简介]



李子姝 (1994-), 女, 北京邮电大学未来网络理论与应用实验室硕士生, 主要研究方向为 5G 网络、移动边缘计算等。



谢人超 (1984-), 男, 北京邮电大学未来网络理论与应用实验室副教授、硕士生导师, 主要研究方向为信息中心网络、内容分发网络、移动网络内容分发技术等。



孙礼 (1959-), 男, 北京邮电大学未来网络理论与应用实验室副教授、硕士生导师, 主要研究方向为宽带通信网络、无线接入技术、通信网络交换技术等。



黄韬 (1980-), 男, 北京邮电大学未来网络理论与应用实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为新型网络体系架构、内容分发网络、软件定义网络等。