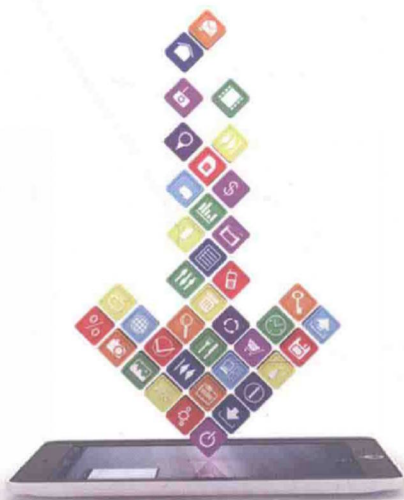




MOBILE EDGE COMPUTING

移动边缘计算

王尚广 周 傲 魏晓娟 柳玉炯 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

移动边缘计算

王尚广 周 傲 魏晓娟 柳玉炯 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

移动边缘计算能够满足 5G、车联网、虚拟/增强现实、智慧城市、智能家居、智慧医疗、公共安全等行业应用对大数据处理、网络带宽及时延等方面的迫切需求。为此本书针对与移动边缘计算相关的若干关键问题,本着通俗、科普、微学术的原则,介绍了移动边缘计算的由来、与 5G 的关系、关键技术、典型应用场景、实验平台以及未来的研究挑战等。

本书可作为政府与企业人员、咨询公司工作人员、一般技术人员、工程研究人员以及博士生、研究生、本科生等快速了解和熟悉移动边缘计算技术的科普类参考书。

图书在版编目(CIP)数据

移动边缘计算 / 王尚广等编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5635-5280-1

I. ①移… II. ①王… III. ①无线电通信—移动通信—计算 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 219491 号

书 名: 移动边缘计算

著作责任者: 王尚广 周 傲 魏晓娟 柳玉炯 编著

责任编辑: 姚 顺 孙宏颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编: 100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本: 880 mm×1 230 mm 1/32

印 张: 4

字 数: 82 千字

版 次: 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5280-1

定价: 26.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

移动互联网和物联网的飞速发展促进了新业务和新数据的不断涌现,使得移动通信流量在过去的几年间经历了爆炸式增长,越来越多的移动应用也尝试在终端完成更加复杂的逻辑功能,诸如人工智能、虚拟/增强现实、大型游戏等。虽然终端设备可以通过访问云计算数据中心为用户提供便利的服务支持,但是增加了网络负荷和数据传输时延,给用户体验质量带来了一定的影响。因此,为了有效满足各类新业务对高带宽、低时延的需求,移动边缘计算应运而生。具体而言,移动边缘计算可利用无线接入网络就近提供移动用户 IT 所需服务和云端计算功能,而创造出一个具备高性能、低延迟与高带宽的移动服务环境,加速网络中各项内容、服务及应用的快速下载,让消费者享有不间断的高质量网络体验。

自 2014 年欧洲电信标准化协会开始推动移动边缘计算相关标准化工作以来,在短短的三年时间内移动边缘计算就产生了巨大的影响力。华为、IBM、Intel、思科等 IT 巨头正在以前所未有的速度推动移动边缘计算技术的研究。笔者自 2014 年以来,也一直从事移动边缘计算的研究工作,2016 年作为程序委员会共同主席与法国的 Anthony Simonet、Adrien Lebre 教授共同发起了 IEEE 第一届雾与边缘计算国际会议(该会议已于 2017 年 5 月在西班牙

马德里成功召开),并在多个国际 SCI 期刊组织了与移动边缘计算相关的专题征稿。在与国内科研人员和企业技术人员的交流中发现,目前大家都对移动边缘计算的概念和研究领域还不是很清晰,而市场上还没有系统介绍移动边缘计算的中文著作,这给国内移动边缘计算的普及和发展造成了一定的障碍。

为此,我们编写了本书,希望通过本书能让读者了解移动边缘计算的相关知识。由于本书的定位是通俗性、科普性和微学术性,希望读者在读过本书之后,对移动边缘计算有一个基本的了解,那么本书的目的和意义也就达到了。

在本书的撰写过程中,多名博士生和硕士生参与了撰写和材料组织工作,如许金良、丁春涛、张晓宇、刘家磊、李元哲、郭燕、杨明哲、柯仁康等(排名不分先后),对上述人员的辛勤努力,我们表示衷心的感谢!最后,感谢本书的主编:王尚广、周傲。

作 者

2017 年 6 月

目 录

第 1 章 基本概述	1
1.1 移动边缘计算的由来	2
1.2 相似解决方案	7
1.3 移动边缘计算与 5G	11
1.4 研究问题划分	17
本章参考文献	23
第 2 章 关键技术	26
2.1 边缘云放置技术	26
2.1.1 国外研究进展	28
2.1.2 国内研究进展	31
2.2 计算卸载技术	33
2.2.1 国外研究进展	35
2.2.2 国内研究进展	41
2.3 服务迁移技术	44
2.3.1 欧洲研究进展	47
2.3.2 美洲研究进展	49

2.4 群智协同技术	53
2.4.1 国外研究进展	55
2.4.2 国内研究进展	60
本章参考文献	64
第3章 典型应用场景	71
3.1 车联网	71
3.2 增强现实	76
3.3 智能家居	78
3.4 医疗服务	82
3.5 公共安全	84
本章参考文献	88
第4章 工具与实验平台	90
4.1 iFogSim	90
4.2 JADE	94
4.2.1 JADE 架构	94
4.2.2 JADE 特点	96
4.2.3 JADE 通信机制	97
4.2.4 Agent 迁移	98
4.3 OAI	99
4.3.1 OAI 内部流传送架构	99

4.3.2 OAI 软件架构	100
4.4 OpenStack	101
4.5 Docker	105
4.6 OpenLTE	108
本章参考文献	111
 第 5 章 未来挑战	 113
5.1 系统架构	113
5.2 服务与应用	115
5.3 安全与隐私	117
本章参考文献	119

第1章 基本概述

自2014年欧洲电信标准化协会（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）开始推动移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）相关标准化工作以来，在短短的三年时间内移动边缘计算就产生了巨大的影响力。华为、IBM、Intel等IT巨头正在以前所未有的速度推动移动边缘计算技术的研究，边缘计算研讨会（ACM/IEEE Symposium on Edge Computing）、雾与边缘计算国际会议（IEEE International Conference on Fog and Edge Computing）、边缘计算国际会议（IEEE International Conference on Edge Computing）等与移动边缘计算相关的国际会议正在兴起，同时学术界和产业界也成立了多个移动边缘计算产业联盟。三年前，学术界和产业界还在争论移动边缘计算技术到底有什么作用，而如今学术界和产业界已经认可了移动边缘计算的未来前景。那么，移动边缘计算到底是什么？移动边缘计算有哪些相似解决方案？移动边缘计算与5G的关系是什么？移动边缘计算有哪些问题需要深入研究？本章将分析这些问题，目的是帮助读者对移动边缘计算形成一个初步认识。

1.1 移动边缘计算的由来

移动互联网和物联网的飞速发展促进了各种新型业务的不断涌现,使得移动通信流量在过去的几年间经历了爆炸式增长,移动终端(智能手机、平板电脑等)已逐渐取代个人计算机成为人们日常工作、学习、生活、社交、娱乐的主要工具。同时,海量的物联网终端设备如各种传感器、智能电表、摄像头等,则广泛应用在工业、农业、医疗、教育、交通、智能家居、环境等行业领域。虽然上述终端设备直接访问云计算中心的方式给人们的生活带来便利,并改变了人们的生活方式,但是所有业务都部署到云计算中心,这极大地增加了网络负荷,造成网络延迟时间较长,这对网络带宽、时延等性能提出了更高的要求。除此之外,为了解决移动终端有限的计算、存储以及功耗问题,需要将高复杂度、高能耗计算任务迁移至云计算中心的服务器端完成,从而降低移动终端的能耗,延长其待机时间。然而将计算任务迁移至云计算中心的方式不仅带来了大量的数据传输,增加了网络负荷,而且增加了数据传输时延,给时延敏感型业务应用(如工业控制类应用等)和用户体验质量带来了一定影响^[1]。因此,为了解决移动互联网和物联网快速发展带来的高带宽、低时延等需求,移动边缘计算的概念得以提出,并得到了学术界和产业界的广泛关注。

根据 ETSI 的定义, 移动边缘计算即在距离用户移动终端最近的无线接入网内提供信息技术服务环境和云计算能力, 旨在进一步减小延迟/时延、提高网络运营效率、提高业务分发/传送能力、优化/改善终端用户体验。移动边缘计算可以被视为运行于移动网络边缘的云服务器, 用以执行传统网络基础设施不能实现的特定任务。如图 1-1 所示^[2], 移动边缘计算是信息技术和通信网络融合的产物。

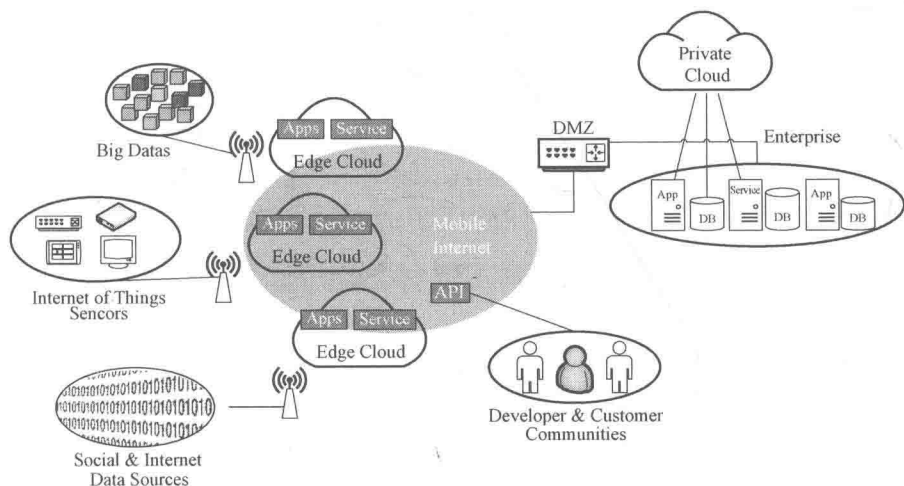


图 1-1 IT 和通信网络的融合

如图 1-2 所示^[3], 移动边缘计算架构包括 3 个部分, 分别是边缘设备 (如智能手机、物联网设备、智能车等)、边缘云和远端云 (或大规模云计算中心、大云)。其中, 边缘设备可以连接到网络; 边缘云是部署在移动基站上的小规模云计算中心, 负责

网络流量控制（转发和过滤）和管控各种移动边缘服务和应用，也可以将其看作是在互联网上托管的云基础设施；当边缘设备的处理能力不能满足自身需求时，可以通过无线网络将计算密集型任务和海量数据迁移至边缘云处理，而当边缘云不能满足边缘设备的请求时，可以将部分任务和数据迁移至远端云处理。

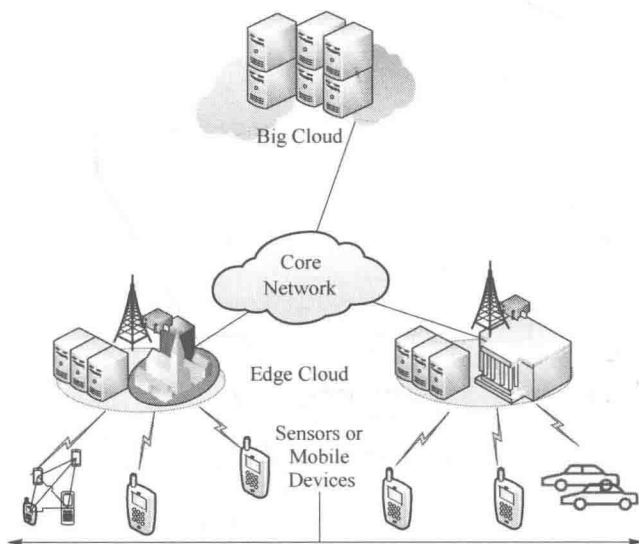


图 1-2 移动边缘计算架构

移动边缘计算的特征主要体现在以下几个方面^[2]。

① 预置隔离性。移动边缘计算是本地的，这意味着它可以独立于网络的其他部分隔离运行，同时可以访问本地资源。这对于机器间相互通信的场景尤为重要，如处理安全性较高的系统。

② 临近性。由于靠近信息源（如移动终端或传感器等），移

动边缘计算特别适用于捕获和分析大数据中的关键信息。移动边缘计算可以直接访问设备，因此容易直接衍生特定商业应用。

③ 低时延性。由于边缘服务在靠近终端设备的边缘服务器上运行，因此可以大大降低时延。这使得服务响应更迅速，同时改善了用户体验，大大减少了网络其他部分的拥塞。

④ 位置感知性。当网络边缘是无线网络的一部分时，不管是 Wi-Fi 还是蜂窝网络，本地服务都可以利用低等级的信令信息确定每个连接设备的位置，这将催生一整套业务用例，包括基于位置服务等。

⑤ 网络上下文感知性。应用和服务都可以使用实时网络数据（如无线网络环境、网络统计特征等）提供上下文相关的服务，区分和统计移动宽带用户使用量，计算出用户对应的消费情况，进而货币化。因此，可以基于实时网络数据开发新型应用，以将移动用户和本地兴趣热点、企业和事件等连接。

另外，根据网络接入方式的不同，有不同的方法来实现移动边缘计算。对于室外场景，宏小区^①提供商将安全计算和虚拟化能力直接嵌入无线接入网络元件。这种应用与无线设备集成允许运营商快速地提供新型网络功能，加速 OTT（Over The Top）服务，以及实现各种新型高价值服务，而这种服务通常在移动网络的关键位置执行。在室外场景下，移动边缘计算的优势具体体现在：①通过降低时延、提高服务质量和提供定制服务来提高移

① 由宏基站覆盖的小区。

动用户的体验；②利用更智能和优化的网络来提高基础设施的效率；③启用垂直服务，特别是与机器到机器、大数据管理、数据分析、智慧城市等相关的垂直服务；④与无线设备紧密集成，使其易于了解流量特征和需求、处理无线网络、获取终端设备位置信息等。对于室内场景，如 Wi-Fi 和 4G/5G 接入点，移动边缘计算采用强大的内部网关形式，提供专用于本地的智能服务。通过轻量级虚拟化，这些网关运行应用并安装在特定位置来提供多种服务。

①机器对机器（Machine to Machine, M2M）场景：连接到多种传感器，移动边缘计算服务可以处理多种监视活动（如空调、电梯、温度、湿度、接入控制等）。

②零售解决方案：具有定位和与移动设备通信的能力，可以向消费者和商场提供更有价值的信息。例如，基于位置传送相关内容，增强现实体验，改善购物体验或者处理安全的在线支付等。

③体育场、机场、车站和剧院：特定服务可以用来管理人员聚集的区域，特别是处理安全、人群疏散或者向公众提供新型服务。例如，体育场可以向公众提供实况内容，机场可以利用增强现实服务来引导旅客进入他们的值机口，等等。所有这些应用都将利用本地数据和环境去设置，以适合用户需求。

④大数据分析：在网络关键点收集的信息可以作为大数据分析的一部分，以更好地为用户提供服务^[4]。

电信运营商普遍认为，移动边缘计算将有望创造、培育出一个全新的价值链及一个充满活力的生态系统，从而为移动网络运营商、应用及内容提供商等提供新的商业机遇。基于创新的商业

价值，移动边缘计算价值链将使得其中各环节的从业主体更为紧密地相互协作，更深入地挖掘移动宽带的盈利潜力。在部署了移动边缘计算技术之后，移动网络运营商可以向其第三方合作伙伴开放无线接入网络的边缘部分，以方便其面向普通大众用户、企业用户以及各个垂直行业提供各种新型应用及业务服务，而且移动网络运营商还可采取其内置的创新式分析工具实时监测业务使用状况及服务质量。对于应用开发者及内容提供商而言，部署了移动边缘计算技术的无线接入网络边缘为其提供了这样一种优秀的业务环境：低时延，高带宽，可直接接入实时无线及网络信息（便于提供情境相关服务）^[5]。

总之，移动边缘计算技术使得电信运营商通过高效的网络运营及业务运营（基于网络与用户数据的实时把握），避免被互联网服务提供商管道化和边缘化。

1.2 相似解决方案

移动互联网和物联网应用需求的发展催生了多个相似解决方案，如移动边缘计算^[2]、移动云计算（Mobile Cloud Computing, MCC）^[6]、雾计算（Fog Computing, FC）^[7,8]、Cloudlet（微云）^[9]、Follow Me Cloud^[10]等。在上述解决方案中，移动边缘计算更受学术界和产业界的青睐，其已经被视为蜂窝基站现代进化的关键推动者，这使得边缘服务器和蜂窝基站能够协同工作。边

缘服务器既可以单独运行，也可以与远端云数据中心协同运行。

为了更好地理解移动边缘计算，下面简要介绍几个相似解决方案，如图 1-3 所示。

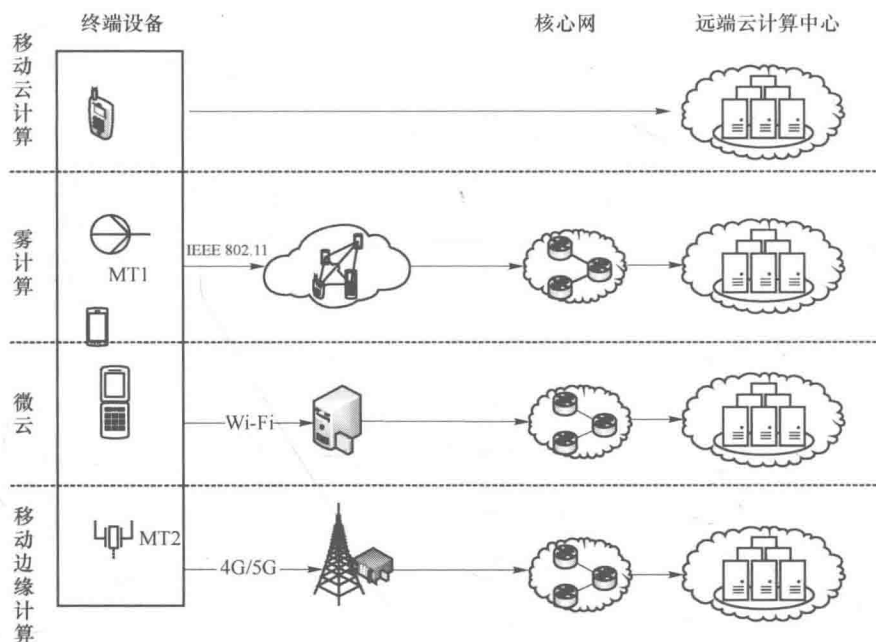


图 1-3 边缘计算范式示意图

1. 移动云计算^[6]

移动云计算是指通过移动网络以按需、易扩展的方式获得所需的基础设施、平台、软件（或应用）等的一种信息技术资源或（信息）服务的交付与使用模式。移动终端设备与传统的桌面计算机相比，用户更倾向于在移动终端上运行应用程序。然而，大

多数移动终端受到电池寿命、存储空间和计算资源的限制。因此,在某些场合,需要将计算密集型的应用程序迁移至移动终端外(即云计算中心)执行,而非在本地(移动终端本身)执行。对应于这种需求,云计算中心需要提供必要的计算资源执行被迁移的应用程序,同时将执行结果返回给移动终端。总而言之,移动云计算结合了云计算、移动计算和无线通信的优势,提高了用户的体验,并为网络运营商和云服务提供商提供了新的商业机会。

2. 雾计算^[7]

雾计算被视为云计算模型从核心网到边缘网络的一个扩展,它是高度虚拟化的,位于终端设备和传统的云服务器之间,为用户提供计算、存储和网络服务。在雾计算中,大量异构的(如无线连接,且有时候是自治的)、物理上广泛分布的、去中心化的设备可以相互通信并能够相互协作,在网络的辅助下,无须第三方参与即可处理、存储和计算任务。这些任务可以支持基本的网络功能和新型应用或服务,而且它们可以运行于沙箱中。不仅如此,参与者会因参与任务得到一定形式的激励。雾计算的网络组件如路由器、网关、机顶盒、代理服务器等,可以安装在距离物联网终端设备和传感器较近的地方。这些组件可以提供不同的计算、存储、网络功能,支持服务应用的执行。雾计算依靠这些组件,可以创建分布于不同地方的云服务。雾计算能够考虑服务延时、功耗、网络流量、资本和运营开支、内容发布等因素,促进