

5G 关键技术系列丛书

5G 移动边缘计算

Mobile Edge Computing in 5G Communication Systems

◆ 俞一帆 任春明 阮磊峰 [马来] 陈思仁 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G移动边缘计算 / 俞一帆等编著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2017.6 (2017.12重印)

(5G关键技术系列)

ISBN 978-7-115-45655-7

I. ①5… II. ①俞… 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167939号

内 容 提 要

本书首先从移动边缘计算产生的背景及历史出发, 阐述移动边缘计算的基本概念, 并且结合 5G 网络发展及运营商转型的现状, 探讨移动边缘计算的发展方向; 随后从系统架构的角度出发, 具体解析移动边缘计算的基本功能构成及对 5G 网络演进的影响; 接着讲述与移动边缘计算相关的关键使能技术, 包括边缘路由技术、网络能力开放、边缘计算平台及边缘计算技术; 然后对移动边缘计算的部署场景及应用实例进行总结, 并给出相关产业及标准的进展情况; 最后描述英特尔公司针对移动边缘计算发布的网络边缘虚拟化开发套件。

本书适合无线网络专业技术人员和管理人员阅读, 也可作为高等院校计算机网络、通信等专业硕士、博士研究生的参考书。

◆ 编 著 俞一帆 任春明 阮磊峰 [马来] 陈思仁

责任编辑 代晓丽

执行编辑 刘 琳

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 4.875

2017 年 6 月第 1 版

字数: 131 千字

2017 年 12 月北京第 3 次印刷

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010) 81055488 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

前 言

4G移动网络的发展开启了移动互联网时代，在诸多领域带来了颠覆性的创新，而5G移动网络的到来将带来更深层次的变革。作为一种全新的移动网络形态，5G网络将与垂直行业进行广泛深度的融合，实现真正的“万物互联”。移动网络运营商将打破传统“围墙花园（Walled Garden）”式的封闭运营模式，变得更为开放。这些变化催生出了移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）的概念，并使其逐渐演变为5G网络可能的核心基础架构之一。在MEC框架下，移动网络和互联网业务实现了有效融合，并进一步拓展至其他应用领域。如果说4G时代的智能终端技术全面促进了传统PC互联网同移动网络的深度融合，那么在5G时代，MEC技术将会推动云计算平台同移动网络的融合，并可能在技术及商业生态上带来新一轮的变革和颠覆。

MEC的基本思想是把云计算平台从网络内部迁移到网络边缘，减少移动业务的端到端交付时延，有效抑制网络拥塞，发掘无线网络的内在能力，提升用户体验并促进业务创新。MEC在接近移动用户终端的无线接入网内提供了云化的IT服务环境及计算能力。所谓“边缘”，既包括移动终端及移动通信基站，也包括无线网络内的其他特定设备（例如基站汇聚节点）。基于MEC技术实现的移动业务具备本地化、近距离、低时延、位置感知及网络信息感知等特点，移动运营商可利用部署于网络边缘的计算资源，向各种应用提供生产运行环境，实现移动业务的“下沉”。

本书第1章首先简要介绍MEC产生的背景及历史，并阐述MEC技术对5G网络发展与运营商转型带来的影响。第2章从系统架构的



角度，对MEC的基本功能构成进行详细论述，并分析MEC对5G网络架构演进带来的影响。第3、4、5章分别介绍与MEC相关的关键使能技术，具体包括边缘路由技术、网络能力开放、边缘计算平台及边缘计算技术。第6章介绍MEC在移动网络内的具体部署场景，并给出不同的应用实例。第7章总结包括ETSI、3GPP及CCSA在内的标准组织在MEC方面的研究工作及标准化进展情况，并列举业界在MEC产品及应用方面的具体案例。第8章对英特尔公司针对MEC发布的网络边缘虚拟化开发套件进行介绍。

本书作者所在团队长期以来一直致力于无线通信与移动网络相关的技术研究及产品开发工作，具有丰富的项目开发及研究经验，对从理论到工程实践有较好的理解。本书内容取自作者多年的研究成果与工作积累，较好地结合了理论与工程实践，具有较为简洁的行文风格，适用于具有一定移动网络专业基础的高校研究生以及相关领域的科研工作者与工程师们。

在此，需要特别感谢为支持本书撰写而辛勤工作的同事们，包括任春明、阮磊峰、陈思仁、张旭、Betty Li、Andrew Chih Howe Khor、Caroline Chan 等。

同时感谢英特尔公司网络产品事业部对本书的资助，以及英特尔中国研究院和未来移动通信论坛对本书撰写的支持。

最后，十分感谢家人对作者工作的大力支持和理解。

作者

2017年3月于北京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 移动边缘计算的起源	2
1.2 5G 网络发展与运营商转型	6
参考文献	10
第 2 章 MEC 总览	13
2.1 系统整体架构	14
2.1.1 系统基本构成	15
2.1.2 系统基础环境	17
2.2 系统组件详解	18
2.2.1 路由子系统	18
2.2.2 能力开放子系统	22
2.2.3 平台管理子系统	26
2.2.4 边缘云基础设施	30
2.3 对 5G 网络演进的影响	32
2.3.1 本地数据分流	34
2.3.2 本地策略控制	35
2.3.3 本地计费	36
参考文献	36
第 3 章 边缘路由技术	39
3.1 本地数据分流概述	40



3.1.1	流量卸载	41
3.1.2	LIPA/SIPTO	43
3.1.3	分组过滤器	44
3.2	移动性支持	47
3.2.1	协调式 SIPTO	47
3.2.2	IP 流移动性	48
3.2.3	分布式移动性管理	49
	参考文献	51
第 4 章	无线网络能力开放	55
4.1	能力开放架构	57
4.1.1	3GPP SCEF 架构	57
4.1.2	ETSI MEC 能力开放架构	59
4.1.3	IMT-2020 能力开放架构	61
4.2	能力开放实现	62
4.2.1	开放接口	63
4.2.2	开放方式	65
4.3	能力开放内容	71
	参考文献	72
第 5 章	边缘计算平台及计算技术	75
5.1	硬件基础环境	76
5.1.1	服务器	77
5.1.2	网络适配器	78
5.1.3	存储器	79
5.2	软件基础环境	80
5.2.1	云平台管理	80
5.2.2	主机虚拟化	82
5.2.3	交换虚拟化	83
5.3	边缘计算技术	85

5.3.1	微云	85
5.3.2	薄云	86
5.3.3	雾计算	88
5.3.4	计算卸载	90
	参考文献	93
第 6 章	部署场景及应用实例	97
6.1	场景 1: 基于 LTE 基站部署	98
6.2	场景 2: 基于基站汇聚点部署	99
6.3	场景 3: 基于无线网络控制器部署	99
6.4	应用实例	100
6.4.1	位置服务	100
6.4.2	增强现实	101
6.4.3	视频编排及分析	103
6.4.4	基于无线感知的内容加速	103
6.4.5	基于应用感知的性能优化	104
6.4.6	物联网网关	105
6.4.7	边缘 CDN	106
6.4.8	企业网应用	108
6.4.9	车联网	109
6.4.10	计算辅助	110
	参考文献	110
第 7 章	标准及产业发展情况	113
7.1	标准发展情况	114
7.1.1	ETSI	114
7.1.2	3GPP	118
7.1.3	CCSA	121
7.1.4	NGMN	122
7.1.5	IMT-2020	122

7.1.6 国家科技重大专项	124
7.2 电信厂商	124
7.3 IT 厂商	129
参考文献	132
第 8 章 英特尔网络边缘虚拟化开发套件	135
8.1 套件概述	136
8.2 套件架构	136
8.2.1 架构总览	137
8.2.2 功能模块详解	138
8.2.3 应用编程接口	142
参考文献	145
名词索引	146



第1章

概 述

1.1 移动边缘计算的起源

1.2 5G 网络发展与运营商转型

1.1 移动边缘计算的起源

移动边缘计算（Mobile Edge Computing, MEC）概念最初于 2013 年出现。IBM 与 Nokia Siemens 网络当时共同推出了一款计算平台^[1]，可在无线基站内部运行应用程序，向移动用户提供业务。欧洲电信标准协会（European Telecommunications Standards Institute, ETSI）于 2014 年成立移动边缘计算规范工作组（Mobile Edge Computing Industry Specification Group），正式宣布推动移动边缘计算标准化。其基本思想是把云计算平台从移动核心网络内部迁移到移动接入网边缘^[2,3]，实现计算及存储资源的弹性利用。这一概念将传统电信蜂窝网络与互联网业务进行了深度融合，旨在减少移动业务交付的端到端时延，发掘无线网络的内在能力，从而提升用户体验，给电信运营商的运作模式带来全新变革，并建立新型的产业链及网络生态圈。2016 年，ETSI 把 MEC 的概念扩展为多接入边缘计算（Multi-Access Edge Computing），将边缘计算从电信蜂窝网络进一步延伸至其他无线接入网络（如 Wi-Fi）。

传统的移动网络主要分为 3 个部分：无线接入网、移动核心网和服务/应用网络。它们通过统一接口相互连接。移动边缘计算的出现打破了这种架构，它将服务/应用网络与无线接入网融合在了一起。移动边缘计算，顾名思义，指在接近移动用户终端的无线接入网（Radio Access Network, RAN）内提供云化的 IT 服务环境及计算能力，所谓边缘（Edge），既包括移动终端、移动通信基站及无线网络控制器（Radio Network Controller, RNC），也包括无线网络内的其他特定设备（例如基站汇聚节点），如图 1-1 所示。移动边缘计算具备本地化、近距离、低时延、位置感知及网络信息等特点。

利用部署于网络边缘的服务器，移动运营商可面向各种上层应用提供生产运行环境，实现移动业务的“下沉”，提高其业务分发/传送能力，进一步减小延迟/时延，并有效抑制核心网络内的拥塞产

生。据估计，将应用服务器部署于无线网络边缘，可在无线接入网络与现有应用服务器之间的回程线路（Backhaul）上节省高达 35% 的带宽使用。到 2018 年，来自游戏、视频和基于数据流的网页内容将占据 84% 的 IP 流量，这要求移动网络提供更好的体验质量。利用边缘云架构，可使用户体验到的网络延迟降低 50%^[4]。

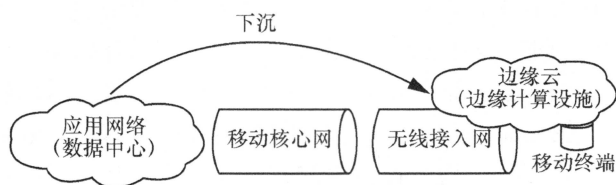


图 1-1 移动边缘计算

另外，无线网络可向部署于网络边缘的第三方业务以 API 的形式开放其实时无线状态信息及无线资源管理能力，实现移动业务的个性化及差异化。例如，无线网络可将移动用户的实时位置信息提供给第三方应用，用以提供诸如基于位置的在线广告等增值服务。此外，无线基站的实时负载情况可用于改善内容传输质量，Google 提出将无线网络的拥塞信息嵌入 TCP 分组头部，用以提升 TCP 在无线环境下的传输性能。

移动边缘计算有助于提升现有移动应用的体验及移动网络的价值。随着 4G 技术的成熟以及 4G 网络的广泛部署，移动互联网得到了相当程度的普及。GSMA 发布的“移动经济：2016 亚太地区”报告显示，2015 年移动技术和服在亚太地区的 GDP 比重达到 5.4%，大约相当于 1.3 万亿美元的经济价值；并且预计其经济贡献在 2020 年将增至 1.7 万亿美元。然而，随着大流量互联网应用的爆发式增长，用户对移动业务体验产生了更高的需求。例如，用户通过移动终端观看在线视频的需求不断增大，导致传统移动网络内的带宽被大量消耗，严重影响了用户的观看体验。在线视频供应商等内容提供企业迫切需要效率更高的移动网络实现业务交付；另外，电信运营商自身也希望能够发掘现有网络设施的价值，不再局限于

充当单一比特传输管道的角色，期待引入新技术实现业务扩张。基于上述考虑，移动边缘计算技术被提出并受到广泛关注，业界期待其特有的高效流量传输方式及分布式计算理念能够有助于解决目前行业发展的痛点。

移动边缘计算在未来市场的应用空间也十分广阔。随着“人机智能”时代的到来，以智慧社区、物联网、虚拟现实及各类智能化应用等为代表的智能化服务逐渐兴起，移动应用开始由生活消费领域向生产企业拓展，这些都对移动网络的传输质量及效率提出了更高的要求。据 Gartner 报告，全球联网的物联网设备至 2020 年将高达 208 亿台，而移动边缘计算将渗透至包括交通运输系统、智能驾驶、实时触觉控制在内的多个领域。其目前已在部分车联网系统上得到应用，可减轻车联网系统数据传输压力，在地图及导航等方面优势明显。

微软公司的一项研究发现^[5]，在图像识别方面，服务器相对于移动终端在处理时间及功耗上有显著优势，并提出了一种面向智能驾驶的交通路标识别技术，即通过车载移动终端的摄像头采集路标图像，再上传至服务器进行识别处理。其进一步研究指出，服务器的处理时间增加 50~100 ms，能提高 10%~20% 的识别准确率，这意味着在不对现有识别算法做改进的情况下，通过引入移动边缘计算技术，就可通过降低服务器同移动终端之间的传输时延改善识别效果。

除了改善移动网络性能及用户体验，移动边缘计算还有助于创造培育一个全新的价值链及充满活力的生态系统，使其中各环节主体紧密协作，深入挖掘基础移动网络的盈利潜力。从而为基础移动网络运营商、内容及应用提供商提供新的商业机遇，实现价值共赢，并且促进运营商在创新商业模式上的发展。

图 1-2 描述了移动边缘计算技术可能带来的一种价值链模式^[6]。基础移动网络运营商可以向广大的第三方应用开发者开放其无线接入网络的基础能力，面向普通大众用户、商企客户以及各个垂直行业加快促进创新业务的开发，缩短产品上市时间。此外，随着大

量业务在无线网络内部实现交付，移动网络运营商可利用创新式分析工具实现实时业务质量监测及大数据采集，从而使得传统移动网络具备基于业务上下文感知的大数据分析能力。

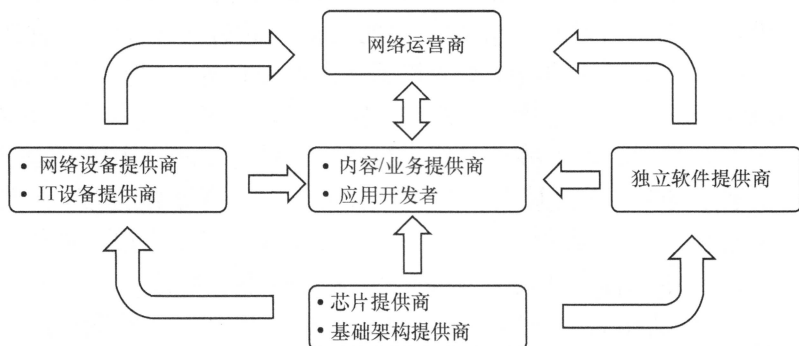


图 1-2 移动边缘计算带来新的价值链

从基础移动网络运营商的角度进一步来看，在商业模式上，移动边缘计算可以参考数据中心。未来的通信基础设施除了传统的接入及交换设备，还应该包括类似数据中心这样承载业务运行的设备，因此后向收费很可能取代前向收费成为运营商主要的营收方式。未来，存在高带宽低时延需求的业务都可能成为移动边缘计算的应用领域。

对应用开发者及内容提供商而言，移动边缘计算技术为其提供了更为良好的业务生产环境，包括更低的延迟/时延、更高的带宽、更便捷的 API 接口用以获取实时无线及网络信息，从而激发更多的业务创新，并且提高对无线网络状况的实时把握，改善用户体验。尤其对热门内容及应用而言，移动边缘计算使其在分发/传送方面得到性能更为优异的加速，明显提高其业务响应度，实现高效的业务运营。

网络及 IT 设备供应商可以生产具备云计算能力的无线接入网设备、基站及其他具备更强大功能的灵活网元，帮助移动网络运营商提供更好的服务。芯片提供商及基础架构提供商向设备提供商、内容提供商及独立软件提供商提供软/硬件基础解决方案，

提升其设备，应用及软件的开发部署效率。独立软件供应商可针对移动边缘计算的特点，向网络运营商及第三方应用提供相应的软件服务。

目前行业巨头已纷纷开始布局移动边缘计算领域，多个厂商已推出了具备移动边缘计算能力的智能基站或者配套的软件工具。例如，上海移动与诺基亚携手在上海 F1 赛场部署了利用移动边缘计算技术的视频分发系统，实现了赛场多视角直播。2016 年在上海举行的世界移动通信大会上，中兴通讯联合中国联通展示了基于 5G 架构的移动边缘计算解决方案，将计算能力下沉到分布式基站，提高流量传输效率，实现了 VR 视频应用。英特尔为合作伙伴们提供英特尔 NEV SDK（网络边缘虚拟化开发套件），并启动相关的应用开发及技术分享。华为基于其室内解决方案，利用移动边缘计算架构提升室内移动业务体验，优化室内网络投资收益，同时提供室内增值服务实现网络管道增值，加速室内数字化进程。

1.2 5G 网络发展与运营商转型

目前国际各大标准化组及相关机构均在积极推动 5G 无线技术研究及网络架构的演进，通过对 5G 愿景、架构、关键技术、频谱等方面的需求分析^[7]（见表 1-1），提出了明确的技术指标。5G 网络在未来主要用于满足三大类业务的需求^[8]。

表 1-1 国际主要标准化及研究组织 5G 需求汇总

5G 指标需求	ITU-R	METIS	日本	韩国	中国
峰值速率	20 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s	下行: 50 Gbit/s 上行: 25 Gbit/s	10 Gbit/s
时延	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms
移动性	500 km/h	—	500 km/h	500 km/h	500 km/h
连接密度	$10^6/\text{km}^2$	300/连接点	$10^4/\text{小区}$	10^3 倍	$10^6/\text{km}^2$

一是面向全球大约 25 亿用户的增强移动宽带业务，届时 5G 网络需要向大规模用户提供超高清视频、远程医疗、远程办公、远程教育等更为丰富的融合通信体验。

二是实现万物互联的物联网业务，5G 网络需要提供支撑海量连接的弹性能力，用以实现包括智能家居、智能安防、智慧城市、环境监测、个人可穿戴、车联网等在内的智能连接需求。

三是满足超高可靠超低时延的关键通信场景需求，例如工业自动化、分布式控制联网及云机器人等，特别是工业 4.0 中涉及的智能工厂，将是推动 5G 技术演进的重要力量。

面对上述需求的驱动，5G 网络演进将呈现以下特性。

- 高度灵活性：系统可对带宽实施灵活管理，并对用户数据进行有效转发。
- 高度扩展性：系统能够基于采集的数据，对自身环境进行弹性配置及灵活伸缩。
- 多样移动性：针对不同终端及不同业务提供定制化的移动性支持，满足个性化需求。
- 内容感知性：通过智能感知技术对内容进行高效分发。

5G 网对灵活性和弹性扩展能力的要求将对移动运营商现有移动网络架构造成巨大冲击，网络功能虚拟化（Network Function Virtualization, NFV)/软件定义网络(Software Defined Network, SDN)技术将成为构筑未来 5G 网络架构的基石^[9]，实现“网随云动”，即网络的构建随云计算服务的部署而动。NFV 将传统网络实体的软/硬件进行分离，对网络功能进行了软件化，实现了网络硬件资源的共享，从而促成了网络功能的快速部署及业务容量的按需灵活分配。SDN 通过控制转发平面的分离，简化了网络和流量的管理控制功能，推动了虚拟化网络的发展。

随着 SDN/NFV 技术的引入，5G 网络可基于云化的资源池，快速高效地应对复杂多变的业务，充分满足灵活性和弹性扩展能力要求。通过提供可扩展且可编程的连接服务，包括对速度、容量、安全性、可靠性、可用性及延迟等指标的定制，实体移动网



络将以“网络即服务”的形式出现，能够根据不同的业务场景提供不同的网络。

随着移动网络的融合演进，现有设备将逐步被基于云计算平台的虚拟化网元取代^[10]。移动网络控制面网元将逐步迁移至云计算平台。用户平面设备将融合 SDN 交换机功能，通过控制平面和用户平面之间的控制接口，实现快速灵活的数据转发及路由优化。5G 网络随之将由以封闭式网元为中心的传统网络演进为以数据中心为核心的软件化网络。但不同于现有集中化部署的数据中心，5G 业务对时延、容量、可靠性及移动性的超高要求，会带来部分网络能力下移到网络边缘或更接近用户的位置^[11]，构筑 5G 基础的数据中心将以分布式多级部署的形式呈现出分散化的特点。

全新的网络基础设施促使移动运营商改变对网络的运营方式。传统的大工业化网络运营方式通常以批量生产的形式向用户提供千篇一律的解决方案，不能快速满足用户的多样性需求。软件化网络则能够利用网络切片技术灵活地实现自动化按需组网。基于网络切片，连接服务被抽象成多张相互隔离的具有不同能力的虚拟网络平面。每个网络切片根据场景需要对网络功能进行剪裁定制，通过对相应的网络资源进行编排管理，将定制化网络功能部署在不同位置并完成业务链的串接。通过对网络切片进行实时监控和自动化管理，运营商可实时动态调配网络资源，通过定制网络功能及结构，满足各类业务需求^[12]。

虽然 NFV/SDN 技术在灵活性方面给 5G 网络带来了巨大的优势，但也令移动网络的安全及维护面临巨大的挑战。为实现网络切片按需自动编排和灵活快速部署，5G 网络大量使用了虚拟化软件技术，因此 5G 网络必须保证虚拟网络能自动感知环境，实现故障自动发现，软件自动安装升级，网络参数自动配置，从而使得网络具有自主切换、自愈和自恢复的能力。在安全领域，虚拟化网元在部署之初就应嵌入具备可操作性的安全技术、策略和流程，以应对保密性、完整性和可用性等安全风险。在网络维护方面，5G 网

络应支持精细化、面向服务的端到端管理框架，并基于通用信息模型构建管理接口，实现多重资源融合，从而具备自动化敏捷运营管理能力。

5G 带来的网络运营方式的变化将进一步促使移动网络运营商的转型。运营商在提供连接手段的基础上，还需要创造平台业务，打造端到端的移动生态系统，提升应对业务需求动态变化的能力，聚焦于为用户创造更多附加价值，完成从网络基础设施提供者向业务平台运营者的角色转变。传统的移动网络注重向终端用户提供高质量通信服务，强调用户体验。5G 网络除了满足用户体验，还需要在另一维度提供优质服务，即为众多的第三方应用提供高效的业务开发环境，提供良好的开发体验。因此，运营商构建的业务平台应具备一定的开放性，尤其需要关注将网络基础设施的能力向第三方开放，并提供统一的操作接口，帮助服务提供商、虚拟运营商、政企客户及个人客户快速获得定制化的电信资源和数据信息服务，从而加速各类创新业务的商用化和发展。运营商需要依托 5G 网络支持实时数据的采集及深入分析，使自身具备面向大数据的运营管理分析能力，从而优化企业经营决策信息的来源，并通过预测用户未来行为、网络状态、市场变化，提升用户体验及拓展市场业务。

随着 5G 的发展，移动网络运营商正在打破传统围墙花园式的封闭运营模式，向开放型运营模式转变。移动边缘计算作为 5G 可能的核心基础架构之一，正在推动这一趋势的进行。无线网络和互联网业务在移动边缘计算框架下的有效融合，将进一步拓展不同领域的应用前景。如图 1-3 所示，在 3G/4G 时代，智能终端技术的出现促进了传统 PC 互联网与移动通信网络的深度融合，进而对二者进行了颠覆，创造了全新的技术及商业生态系统。在 5G 时代，移动边缘计算技术会推动传统基于集中式数据中心的云计算平台与移动通信网络的融合，并可能在技术及商业生态上带来新一轮的变革和颠覆。