

WILEY

雾计算 技术、架构及应用

蒋 濛 (Mung Chiang)

[美] 巴拉思·巴拉萨布拉曼尼安 (Bharath Balasubramanian) 等著
弗拉维奥·博诺米 (Flavio Bonomi)

闫 实 彭木根 译

Fog for 5G and IoT



中国石化出版社
China University of Petroleum Press

物联网核心技术丛书

雾计算

技术、架构及应用

蒋濛 (Mung Chiang)

[美] 巴拉思·巴拉萨布拉曼尼安 (Bharath Balasubramanian) 等著

弗拉维奥·博诺米 (Flavio Bonomi)

闫实 彭木根 译

Fog for 5G and IoT



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

雾计算：技术、架构及应用 / (美) 蒋濛 (Mung Chiang) 等著；闫实，彭木根译．—北京：机械工业出版社，2017.12

(物联网核心技术丛书)

书名原文：Fog for 5G and IoT

ISBN 978-7-111-58402-5

I. 雾… II. ①蒋… ②闫… ③彭… III. 网络计算 IV. TP393.027

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 268491 号

本书版权登记号：图字 01-2017-7109

Copyright © 2017 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Fog for 5G and IoT, ISBN 9781119187134, by Mung Chiang, Bharath Balasubramanian, Flavio Bonomi, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由约翰·威立父子公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 Wiley 防伪标签，无标签者不得销售。

雾计算：技术、架构及应用

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）

责任编辑：谢晓芳

责任校对：殷虹

印刷：中国电影出版社印刷厂

版次：2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本：186mm×240mm 1/16

印张：14.5

书号：ISBN 978-7-111-58402-5

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88379426 88361066

投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱：hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问：北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

The Translator's Words 译者序

第一次听到雾 (fog), 是在美国普林斯顿大学工学院一层餐厅和几位好友吃午餐, 聊及著名华人学者 Mung Chiang 教授正在做的几个新热点时。当时我正在研究云计算无线接入网络 (C-RAN) 的理论性能和关键技术, 试图解决制约 C-RAN 发展的核心难题。C-RAN 固有的集中式网络架构和前传链路容量及时延受限, 导致其实际性能和理论性能相差甚远。雾的命名源自“雾是更贴近地面的云”这一名句, 目的就是解决云存在的固有问题。雾让我茅塞顿开, 它启迪我尝试用雾解决 C-RAN 的不足, 提出了雾无线接入网络 (F-RAN) 架构及关键技术解决方案。在参加完 IEEE Globecom 2014 会议, 乘机返回新泽西时, 我又碰巧遇到了雾的另外一名初创者——张涛教授, 和他讨论雾的原理和优缺点后, 更坚定了我把雾用于异构网络和 C-RAN 中的决心。我陆续组织了与 F-RAN 相关的国际期刊专刊和国际会议专题研讨会, 发表了国际上最早的相关学术论文。

回国后得知 Mung Chiang 教授出版了业界第一本雾方面的专著, 非常想拜读, 但一直没有找到合适的机会。当机械工业出版社邀请我翻译本专著时, 一时难掩激动之情, 以最快的速度回复我愿意。首次拜读时, 我怀揣着敬畏和虚心学习之心, 收益良多。虽然本专著谈及的雾及雾网络和我正在研究的 F-RAN 有非常大的差异, 但很多思想和出发点是一致的, 可谓同源同宗。考虑到雾在 5G 和物联网中将有广泛应用, 把它翻译成中文和大家共享, 尤其显得急迫和重要。

本专著由我偕同闫实博士一起翻译完成, 同时也要感谢为此付出时间和精力学生, 包括晏志鹏、周政、张科成、孙耀华、项弘禹、武文斌、茅振东、党甜、张欣然和张贤等。另外, 对我的导师王文博教授, 以及和我一起并肩作战的李勇副教授、赵中原博士与梁栋博士表示感谢, 同时也对学校各级领导和同事的支持与鼓励一并表示

感谢。我还要感谢机械工业出版社很好地推动了本书的引进、翻译和出版工作。最后，要特别感谢我的家人，感谢他们在生活上的陪伴与照顾，以及在工作上的支持与理解！

彭木根

2017 年 10 月

于北京邮电大学

Bharath Balasubramanian¹, Mung Chiang², Flavio Bonomi³

¹ATT 研究实验室, 贝德明斯特, 新泽西, 美国

²EDGE 实验室, 普林斯顿大学, 普林斯顿, 新泽西, 美国

³Nebbiolo 技术有限公司, 米尔皮塔斯, 加利福尼亚, 美国

过去 15 年, 云计算兴起, 互联网 (Internet) 骨干业务快速发展, 蜂窝核心网络也变得越来越复杂。云有三种类型: 数据中心、骨干互联网协议 (IP) 网络和蜂窝核心网络。它们具有计算、存储、通信和网络管理功能。最近, 这三种类型云的功能正慢慢转移到终端用户或者靠近终端用户, 称为“雾”。由于最新芯片、无线设备和传感器的功能不断增强, 当前的边缘设备能够执行计算、存储、感知和网络管理等复杂功能。本书将阐述雾架构这个创新的概念, 具体包含组网、计算和存储。

架构旨在把系统工作分为模块: 谁 (who) 在什么时间节点 (what timescale) 做什么 (what), 以及怎样把这些模块紧密融合在一起。为了支持各种各样的应用领域, 架构需要定义不同的层, 并且划分为控制平面和数据平面, 以及拆分为云和雾^[1]。我们把雾架构定义为: 为了实现云到物 (C2T) 的联合, 雾架构使用一个或者大量协同的终端用户客户端或者靠近用户的边缘设备, 进行一系列的存储、通信、控制、配置、测量和管理等操作。第五代 (5G) 移动通信系统、家庭/个人组网、嵌入式人工智能和物联网 (IoT) 等工程应用中都将使用雾架构^[2]。

如图 0.1 所示, 我们强调了雾指代一种能够计算、存储、控制和通信的网络架构, 该架构支持各种类型的应用。雾架构有别于现有的云, 主要体现在以下三方面:

1) 在终端用户或者靠近终端用户处, 执行大量的存储操作 (云主要是存储在大规模的数据中心进行操作)。

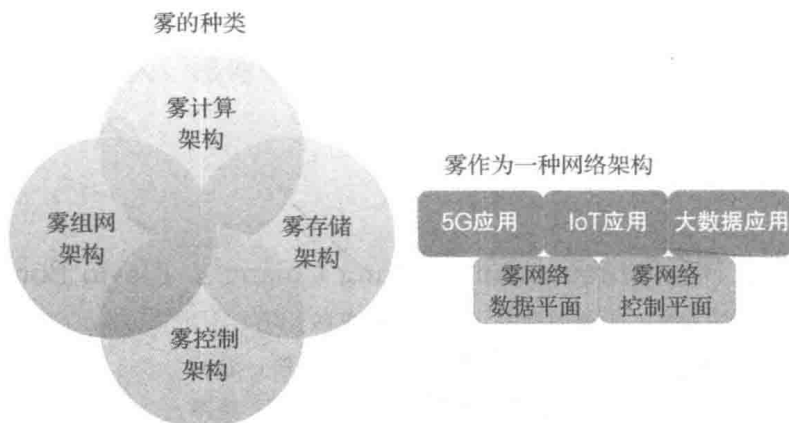


图 0.1 雾架构和雾架构支持的应用

2) 在终端用户或者靠近终端用户处，执行大量的通信操作（云通过骨干网络路由到集中节点进行操作）。

3) 在终端用户或者靠近终端用户处，执行大量的计算和管理操作，包括网络测量、控制和配置（云主要是通过网关进行控制，就像在长期演进（LTE）的核心网中所执行的那样）。

当前，雾概念之所以越来越引起大家的兴趣，如 CEAL 所总结，有如下四方面的主要原因。从移动到有线传输，从物理层的波束赋形到应用层的边缘分析，最近的应用无不显示了雾的优点。

1) 认知：以客户端为中心目标的感知。根据端到端原则，一些应用需要详细了解客户端的要求。当云无法保证隐私和可靠性或者通过缩短通信距离来增强安全性时，以客户端为中心目标的感知尤其重要。

2) 高效：把本地资源整合在一起。每天，在台式电脑、笔记本电脑和机顶盒里，在会议交流中，在公共交通系统的乘客之间，都要产生数以亿计的闲置数据。相似地，边缘设备上未充分利用的处理能力、感知能力、无线连接能力等可以在雾网络理论上得以整合。

3) 灵敏：快速的创新和可实现的缩放。借助客户端或者边缘设备进行操作，总是会更快和更便宜。在大网络中由运营商主导的创新，常常需要等待很长时间。与此不同，在领域，小公司可以充分利用智能手机的应用程序编程接口（API）和软件开发工具包（SDK），随着移动应用的扩散传播，通过自己的 API 提供创新的网络业务。

4) 低时延：实现实时处理和信息物理系统控制。边缘数据分析和通过控制环进行的各种操作，对时延有严格的要求，这使得其只能在边缘或者“物体”中进行操作。特别

是对指尖物联网来说,这一点尤其重要。指尖物联网要求提供毫秒级的反应时间,以便实现人与设备间的虚拟交互。

下面进一步阐述雾的潜在优势。客户端和边缘设备的能力已经显著提升。例如,最早的苹果手机(iPhone)配置了单核412MHz的ARM处理器、128MB的随机存取存储器(RAM)及8GB的存储器。而iPhone 5S则配置了双核1.3GHz的苹果A7处理器、1GB的RAM、64GB的存储器及增强的图形处理器(GPU)能力。Intel的移动芯片Atom和Nvidia的Tegra也提供了类似的增强能力。这些能力和特征的增强意味着边缘设备可以提供更加复杂的功能,例如CPU/GPU之间的增强博弈协作、强大的定位和上下文跟踪传感器以及增强的存储器。更进一步,如文献[9]所述,这些互相连接的边缘设备可以在IoT中发挥关键作用。移动手机和可穿戴电子设备等边缘设备使用了多种多样的传感器,包括陀螺仪、加速计、里程计,以便监控周围环境。这些传感器不仅方便挖掘个人的位置信息和物理/心理特征,还有助于挖掘这些边缘设备正在与周围的其他设备进行的各种公共交互等。

随着基于云的业务需求的增加,在核心网络产生的数据业务数量也急剧增加。Cisco预测云业务未来5年将增加4~5倍^[10],而且他们还预测云IP业务到2017年约占所有数据中心业务的2/3。雾通过本地满足业务应用需求可以降低IP业务占比吗?例如,部分云存储能够转移到离边缘/客户端设备更近的微数据中心吗?视频能够高效地存储在边缘设备,以减少用户从云获得业务吗?或者更宽泛地讲,边缘设备能够在基于数据平面的云业务和基于控制平面的核心网络业务之间发挥积极的作用吗?

接入云经常需要跨越地域上距离较长的多个通信实体,从而造成约150~200ms的往返时延。对于终端用户来说,接入时延是一个非常关键的指标。已有研究表明,如果能够缩短20%的往返时间(RTT),则能够使得网页下载时间缩短15%^[11]。一种减少内容接入RTT的高效方法就是把尽可能多的内容放置在物理上离终端用户近的地方。减少时延对所有业务来说都是有好处的,而且未来对许多新的业务来说也是必需的。例如,增强现实(AR)应用能够忍受的延迟范围为10~20ms^[12]。因此,这些业务的计算/处理可以在本地进行。雾业务在解决这些挑战中可以发挥重要作用。

雾研发(R&D)利用传感器网络、对等系统和移动自组网等过去的经验,并充分利用设备、系统和数据科学方面的最新发展,在生态系统中功能强大的数据中心和边缘设备间实现能力的平衡分布。为此,本书将介绍演进的雾架构,同时介绍和雾架构相关的许多其他领域的工作。

本书将描述许多在分布式计算、网络和存储系统中涉及的普通用例和应用。计算资

源通常分布式地布置在家庭、工厂、道路和高速公路、城市、购物中心等地方。普适计算已经流行好长一段时间了。组网时经常需要部署交换机、路由器，以及在边缘设备处安装中间件等。在边缘设备处的缓存媒体和数据对 Web 业务和视频分发的演进具有根本性的影响。

作为一个经典且重要的 R&D 领域，许多和雾架构相关的文章并不是全新的，可以将它们视为过去十年到二十年累积的成果，实现了从量变到质变的演进。

- 和 2005 年左右的对等 (P2P) 网络相比，雾并不仅仅是内容共享（或把数据平面整合在一起），它还包括网络测量、控制和配置，以及业务定义。
- 和十年前的移动自组网 (MANET) 相比，现在有更多能力更强大、种类更多样的现成边缘设备 and 应用，以及来自于蜂窝和广播网络的分层架构。
- 和过去传统的边缘网络相比，雾网络提供了一种新颖的端到端原则的实现方法：不仅在边缘设备之间进行优化，还在网络的其他实体中进行协作测量和控制。

信息中心网络 (ICN) 和软件定义网络 (SDN) 都有很长一段历史了，连同这两种网络架构，雾正在重新思考工程网络的基础。具体来说，就是如何优化网络功能：谁做什么，以及如何把它们整合在一起。

- 信息中心网络：重新定义功能（操作的不仅仅是数据，而是数据对象）。
- 软件定义网络：虚拟化功能（通过中心控制平面）。
- 雾网络：重新定位功能（靠近终端用户，实现 C2T 的连接）。

雾网络不是必须要有虚拟化或者信息中心功能，但是，可以猜想未来会出现具有信息中心、软件定义的雾网络（因为这三种网络并不是正交的）。

随着信息技术 (IT) 领域中各种新的概念和模型的提出，以及为了满足运维技术 (OT) 领域的各种需要，例如时间敏感、在网络中确定性的行为、计算、存储、传感器和传动器支持/聚合，甚至安全性支持，雾在许多关键的 IoT 垂直行业中是一种完美的解决方案，它实现了 IT 和 OT 的高度融合，而且应用前景广阔。从这方面来说，雾不仅是对传统的相关技术（其中包括传感器、自组网、普适计算、分布式存储等）的构建或者融合，还为 IoT 背后的 IT 和 OT 的融合提供了一种新颖且及时有效的方法。

随着云的增强、统一和现有技术方法的一系列演进，在向 IoT 进军的特殊时刻，雾也在增强、统一，并向边缘技术和方法的一系列创新和融合演进。伴随着端点和云的涌

现，雾将能够确保分布式应用无缝部署，在一个广泛的垂直领域满足各种关键用例的需要。例如，一些雾架构和雾功能的早期工作主要由车联网、智能电网、分布式分析、Web 业务及视频分发等技术的发展所驱动^[9,13,14]。

章节概览

本书内容主要分为三大部分。前四章将介绍实现雾网络中设备的通信和管理的各种技术，包括和云的交互、相关带宽需求的管理，以及边缘设备如何相互协同工作以满足要求等。中间三章将阐述许多雾应用中涉及的两个基本组件：存储和计算。最后四章将讨论雾架构的应用，以及实现这些应用面临的挑战。

通信与管理。第 1 章将介绍一个专门的边缘计算框架——ParaDrop，它使得开发者能够使用网关这一终端用户设备的最稳定且持久的计算资源，这里的网关是指 Wi-Fi 的接入点或者家用机顶盒。基于一个能够把边缘设备部署在同一个容器里的特定平台，作者展示了一些非常有意思的应用，例如如何在边缘设备中安装监控摄像头和环境传感器。

为了在雾中实现丰富的通信，必须要解决带宽的需求问题。按照雾网络的原理，为什么不能利用边缘设备的能力做到这一点呢？在第 2 章中，为了应对日益增长的带宽需求，作者提出了基于家庭用户的带宽管理解决方案，这是一种可以使家用网关和终端用户设备更智能的新技术。作者说明使用两级系统可以更好地利用网络带宽，一级是基于在激励机制下利用固定信用从互联网服务供应商“购买带宽”的网关，另一级是基于终端用户对应用程序设置的优先级。

第 3 章是从设备之间对等通信的角度来处理这个问题的。作者提出了一种基于博弈理论的机制，即平板电脑和手机等终端用户设备可以相互配合，作为对方网络流量的中继，从而提升网络能力。应对潜在的数千甚至数百万的雾-物联网设备是雾管理和通信的一个重要任务。

第 1 章介绍的基于容器的方法是与操作系统无关的，而第 4 章指出，基于边缘设备的底层操作系统应该进一步演进，以便支持雾计算和组网。为此，从宽泛分析的角度出发，作者重点讨论了四个重要的方面：为何这些系统需要提供更好的性能来支持雾？需要在哪里提供更好的性能？哪些性能是真正需要提供的？如何提供这些更好的性能？

存储与计算。接着第一部分继续讨论，第二部分将介绍两个重要的平台功能：雾网络下视频传输的存储和缓存以及雾计算技术。第 5 章介绍视频点播（VoD）的缓存方案，

特别是对视频传输中的最后一个无线跳的优化。虽然大多数基于 CDN 的系统都侧重于网络边缘的缓存，但作者在这里重点关注边缘设备（例如 Femto 辅助节点，类似于 Femto 基站）中的缓存和终端用户设备自身。

第 6 章将重点从 VoD 转移到实时视频流，这是一个与雾范式的使用有着非常不同的要求但又有着相似的潜在用途的用例。作者讨论了一种技术，通过这种技术，终端用户设备像操作无线雾那样将实时视频流在彼此之间进行传输。他们关注这种系统中的关键问题——有损无线链路造成的错误，并针对无线多跳雾网络提出了一种将传统存储和转发技术与网络编码相结合的存储-恢复-转发策略。

第 7 章从存储转到讨论雾中的通用计算。与本书的其他章类似，作者认为移动设备现在已经变得强大很多，因此在本地可以通过精心设计的雾架构来处理计算任务。他们关注两个设计：Femto Cloud（讨论了移动设备计算平台的通用架构），Serendipity（对于设备的高度移动性和通常任务需要相互卸载的问题，讨论了一个更严格的版本）。

应用。在了解平台要求和改进的基础上，本书最后讨论基于雾架构的应用。在第 8 章中，作者仔细研究了车联网所面临的挑战，车联网是一个日益凸显的物联网用例。特别地，他们关注能够实现这一应用的电子架构，并描述了如何使用虚拟化技术进行雾计算，诸如安全和管理等若干问题的平台统一化将有助于迎接这些挑战。

在第 9 章中，作者认为基于 IP 寻址的传统方式对于在雾环境中工作的与云服务器交互或彼此交互的实地 IoT 设备并不总是起作用。这主要是由于设备移动性、设备空间密度和覆盖缺口等因素。他们提出了一种位置寻址方法作为替代，其中通信协议允许设备基于其地理位置而不是 IP 地址来确定目标设备。

在 10 章中，作者提供了分布式流处理系统和在线学习框架的详细分析，以便构建他们所谓的智慧星球。他们设想了一个这样的世界：用户不断收集周围的数据，处理这些数据，进行有意义的分析，并根据这一分析做出决策。然而，主要的挑战是考虑到潜在的大量低功耗传感器和用户的移动性，所有这些数据分析都需要在其生命周期中大量分布。强大的分布式学习框架与能为这种框架提供平台功能的雾计算相结合可以实现智慧星球的愿景。

第 11 章通过讲述雾计算如何帮助解决 IoT 设备安全的关键需求来结束本书。作者以这个问题开头：与标准的企业安全相比，IoT 安全性有什么不同？需要改变什么？随后他们回答了这些问题，并确定了 IoT 的关注点：从海量设备到安全信息方面的定期更新需求。最重要的是，他们关注雾范式如何通过提供框架和平台来减轻 IoT 设备的负载并完成诸如端点验证和安全更新等操作来帮助解决同类问题。

致谢

如果没有众多人的帮助，本书是不可能出版的，我们真诚地对这些人表示感谢。

特别是，Jiasi Chen 博士、Michael Wang 博士、Christopher Brinton 博士、Srinivas Narayana 博士、Zhe Huang 博士、Zhenming Liu 博士对本书提供了宝贵的反馈意见。感谢 Jon Wiley and Sons 出版社对本书的策划和出版尽心尽力。感谢美国国家科学基金会对雾研究的资金支持。最后同样重要的是，本书的最大的价值还是在于它的内容，我们对所有章节的作者表示感谢，感谢他们在撰写此书时的技术贡献和永无止境的热情。

参考文献

1. Mung Chiang, Steven H. Low, A. Robert Calderbank, and John C. Doyle. Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures. In *Proceedings of the IEEE*, volume 95, pages 255–312, January 2007.
2. Mung Chiang and Tuo Zhang. Fog and IoT: an overview of research opportunities. *IEEE Journal of Internet of Things*, 3(6), December 2016.
3. Abhijnan Chakraborty, Vishnu Navda, Venkata N. Padmanabhan, and Ramachandran Ramjee. Coordinating cellular background transfers using load sense. In *Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking, MobiCom '13*, pages 63–74, New York, NY, USA, 2013. ACM.
4. Ehsan Aryafar, Alireza Keshavarz-Haddad, Michael Wang, and Mung Chiang. Rat selection games in hetnets. In *INFOCOM*, pages 998–1006 April 14–19, 2013. IEEE Turin, Italy.
5. Luca Canzian and Mihaela van der Schaar. Real-time stream mining: Online knowledge extraction using classifier networks. *IEEE Network*, 29(5):10–16, 2015.
6. Jae Yoon Chung, Carlee Joe-Wong, Sangtae Ha, James Won-Ki Hong, and Mung Chiang. Cyrus: Towards client-defined cloud storage. In *Proceedings of the 10th European Conference on Computer Systems, EuroSys '15*, pages 17:1–17:16, New York, NY, USA, 2015. ACM.
7. Felix Ming Fai Wong, Carlee Joe-Wong, Sangtae Ha, Zhenming Liu, and Mung Chiang. Mind your own bandwidth: An edge solution to peak-hour broadband congestion. *CoRR*, abs/1312.7844, 2013.
8. Yongjiu Du, Ehsan Aryafar, Joseph Camp, and Mung Chiang. iBeam: Intelligent client-side multi-user beamforming in wireless networks. In *2014 IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM 2014*, pages 817–825, Toronto, Canada, April 27–May 2, 2014. IEEE.
9. Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, and Sateesh Addepalli. Fog computing and its role in the internet of things. In *Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing, MCC '12*, pages 13–16, New York, NY, USA, 2012. ACM.
10. Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology. <http://www.intercomms.net/issue-21/pdfs/articles/cisco.pdf> (accessed September 12, 2016).
11. Latency: The New Web Performance Bottleneck. <https://www.igvita.com/2012/07/19/latency-the-new-web-performance-bottleneck/> (accessed September 12, 2016).

12. W. Pasman, Arjen Van Der Schaaf, R.L. Lagendijk, and Frederik W. Jansen. Low latency rendering and positioning for mobile augmented reality. In *Proceedings Vision Modeling and Visualization '99*, pages 309–315, 1999.
13. Flavio Bonomi. Cloud and fog computing: Trade-offs and applications. In *EON-2011 Workshop, at the International Symposium on Computer Architecture (ISCA 2011)*, San Jose, USA, June 4–8, 2011.
14. Xiaoqing Zhu, Douglas S. Chan, Hao Hu, Mythili S. Prabhu, Elango Ganesan, and Flavio Bonomi. Improving video performance with edge servers in the fog computing architecture. *Intel Technology Journal* 19(1):202–224, 2015.

译者序

前言

第一部分 雾的通信与管理

第 1 章 ParaDrop: 家用网关的
边缘计算平台 2

1.1 引言 2

1.1.1 通过 ParaDrop 实现无线网关
的多重任务管理及相关应用 ... 3

1.1.2 ParaDrop 平台的性能 4

1.2 在 ParaDrop 平台上实现服务 5

1.3 为 ParaDrop 平台开发服务 7

1.3.1 依托 ParaDrop 平台实现
监控摄像头业务 71.3.2 依托 ParaDrop 平台实现
环境传感器业务 10

参考文献 10

第 2 章 管理带宽 11

2.1 引言 11

2.1.1 利用雾 12

2.1.2 家庭问题的解决方案 12

2.2 相关研究 14

2.3 信用分配和最优信用支出 15

2.3.1 信用分配 15

2.3.2 最优信用支出 17

2.4 在线带宽分配算法 18

2.4.1 估计其他网关的支出 18

2.4.2 在线信用支出决策和应用
优先级设置 20

2.5 设计与实现 20

2.5.1 流量和设备分类 22

2.5.2 速率限制引擎 22

2.5.3 流量优先级设置引擎 23

2.6 实验结果 24

2.6.1 速率限制 24

2.6.2 流量优先级设置 25

2.7 网关共享结果 26

2.8 结论 29

致谢 30

附录 2.A 30

参考文献 33

第3章 面向雾网络的社交感知

协作 D2D 与 D4D 通信 35

3.1 引言 35

3.1.1 从社交信任和社交互惠到 D2D 协作 36

3.1.2 智能电网：社交感知协作的 D2D 和 D4D 通信的物联网 案例 37

3.1.3 主要结论 39

3.2 相关研究 39

3.3 系统模型 40

3.3.1 物理（通信）图模型 40

3.3.2 社交图模型 42

3.4 面向雾网络的社交感知协作 D2D 和 D4D 通信概述 42

3.4.1 基于社交信任的中继选择 ... 43

3.4.2 基于社交互惠的中继选择 ... 43

3.4.3 基于社交信任和社交互惠的 中继选择 47

3.5 网络辅助中继选择机制 48

3.5.1 互惠中继选择循环发现 48

3.5.2 NARS 机制 49

3.5.3 NARS 机制的特性 51

3.6 仿真 53

3.6.1 ER 社交图 53

3.6.2 基于实际追踪的社交图 56

3.7 结论 58

致谢 59

参考文献 59

第4章 你值得拥有更好的性能

（来自你的智能设备） 62

4.1 为什么需要提供更好的性能 62

4.2 需要在哪里提供更好的性能 63

4.3 需要提供什么性能并且怎样 提供 64

4.3.1 透明度 64

4.3.2 可预测性能 68

4.3.3 开放性 73

4.4 结论 74

致谢 75

参考文献 75

第二部分 雾的存储与计算

第5章 提高通信效率的分布式

缓存 80

5.1 引言 80

5.2 微微缓存 81

5.2.1 系统模型 81

5.2.2 来自帮助者节点的 自适应流 84

5.3 用户缓存 85

5.3.1 基于簇的缓存和 D2D 通信 ... 85

5.3.2 基于 ITLinQ 的缓存和通信 ... 88

5.3.3 编码组播 93

5.4 结论和展望 96

参考文献 96

第6章 无线视频雾网络：错误可恢复的

实时协作数据流 99

6.1 引言 99

6.2 相关研究 102

6.3 系统运行和网络模型 103

6.4 问题建模和复杂度 105

6.4.1 NC 数据包选择优化	106
6.4.2 广播者选择优化	107
6.4.3 复杂度分析	108
6.5 VBCR: 一种用于实时视频且 能实现协作恢复的分布启发式 算法	108
6.5.1 初始信息交换	108
6.5.2 协作恢复	109
6.5.3 更新信息交换	111
6.5.4 视频数据包转发	112
6.6 仿真结果	113
6.7 结论	116
参考文献	117

第7章 弹性移动终端云: 借助 移动终端提供边缘的 云计算服务

7.1 引言	119
7.2 设计领域及实例	121
7.2.1 Mont-Blanc	121
7.2.2 计算与充电并行处理	122
7.2.3 FemtoCloud	123
7.2.4 Serendipity	125
7.3 FemtoCloud 性能评估	126
7.3.1 实验设置	126
7.3.2 FemtoCloud 仿真结果	127
7.3.3 FemtoCloud 原型评估	130
7.4 Serendipity 性能评估	131
7.4.1 实验设置	131
7.4.2 Serendipity 性能增益	132
7.4.3 网络环境的影响	132

7.4.4 工作属性的影响	136
7.5 挑战	137
参考文献	138

第三部分 雾的应用

第8章 雾计算在未来汽车行业 中的作用

8.1 引言	142
8.2 当前的汽车电子架构	143
8.3 汽车 E/E 架构的未来挑战及 解决策略	145
8.4 未来汽车——车轮上的雾节点 ...	149
8.5 凭借实时计算和时间触发技术 实现车轮上的确定性雾节点 ...	150
8.5.1 通过虚拟化解决可扩展性 挑战的确定性雾节点	151
8.5.2 解决连接和安全挑战的 确定性雾节点	152
8.5.3 汽车应用中确定性雾节点的 新用例——全车虚拟化 ...	154
8.6 结论	155
参考文献	155

第9章 现场网络的位置寻址

9.1 引言	156
9.1.1 现场网络	156
9.1.2 现场网络面临的挑战	157
9.2 位置寻址	158
9.3 SAGP: 现场的无线位置寻址 ...	160
9.3.1 SAGP 处理流程	160

9.3.2	SAGP 重传启发式算法	161
9.3.3	SAGP 数据包传播示例	162
9.3.4	跟随发送: 有效的 SAGP	
	数据流动	163
9.3.5	迎接挑战	164
9.4	地理路由: 将 GA 延伸到云端	165
9.5	SGAF: 大规模 GA 的一种	
	多层架构	166
9.5.1	不同层之间的桥接	167
9.5.2	混合安全架构	168
9.6	AT&T 实验室的位置辅助	
	多播架构	169
9.7	两个 GA 应用实例	170
9.7.1	PSCCommander	170
9.7.2	位置辅助多播游戏	172
9.8	结论	174
	参考文献	174

第 10 章 面向智慧星球的分布式

在线学习和流处理

10.1	引言: 智慧星球	175
10.2	实例问题: 交通运输	177
10.3	流处理特征	178
10.4	分布式流处理系统	179
10.4.1	研究现状	179
10.4.2	流处理系统	180
10.5	分布式在线学习框架	183
10.5.1	研究现状	183
10.5.2	在线分布式集成学习的	
	系统框架	185
10.5.3	聚合权重的在线学习	188

10.5.4	碰撞检测应用	190
10.6	前景	193
	致谢	194
	参考文献	194

第 11 章 物联网安全: 需要新方案

和雾计算

11.1	引言	197
11.2	现有安全方案需要做根本性	
	改变以应对新的物联网安全	
	挑战	198
11.2.1	大量设备将有长的生命	
	周期但受限且难以更新	
	的资源	199
11.2.2	将所有的 IoT 设备部署	
	在防火墙环境中将变得	
	不可行	200
11.2.3	关键性任务系统需要影响	
	最小的事件响应	200
11.2.4	庞大数量的 IoT 设备安全	
	状态感知需求	201
11.3	一个新的物联网安全方案	202
11.3.1	对能力不足的设备提供	
	雾计算帮助	203
11.3.2	通过集群认证将安全监控	
	扩展到大量设备	206
11.3.3	具有自适应免疫安全性的	
	动态风险-收益比例保护	
	机制	210
11.4	总结	213
	致谢	213
	参考文献	213