



专题：移动边缘计算

激励机制赋能高效雾网络

王蓓蓓¹, 沈斐^{2,3}, 李旭杰¹, 徐慧慧^{2,4}, 张冲冲^{2,3}

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

3. 上海无线通信研究中心, 上海 201210; 4. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了提高雾网络的资源利用率以及服务质量, 确保异构雾节点的可靠性与安全性, 需要合理的激励机制。激励机制的引入, 能够有效调动雾网络设备的服务积极性, 减少设备恶意或自私等行为。首先提出了雾计算的研究意义, 并给出了雾网络的特点及应用场景。其次介绍了雾网络的系统架构。然后将激励机制分别与雾网络中资源感知技术以及任务卸载技术相融合, 并进一步给出了部分融合实例, 体现了激励机制在雾网络中的重要作用。

关键词: 雾网络; 资源感知; 任务卸载; 激励机制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019061

Incentive mechanism enables efficient fog network

WANG Beibei¹, SHEN Fei^{2,3}, LI Xujie¹, XU Huihui^{2,4}, ZHANG Chongchong^{2,3}

1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

3. Shanghai Research Center for Wireless Communications, Shanghai 201210, China

4. Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: In order to improve the resource utilization and service quality of the fog network, as well as ensure the reliability and security of heterogeneous fog nodes, a reasonable incentive mechanism was required. The introduction of incentive mechanism can effectively motivate the service enthusiasm of fog network equipment and reduce the malicious or selfish behavior of the equipment. Firstly, the research significance of the fog computing was proposed, and the characteristics as well as the application scenarios of fog networks were given. Secondly, the system architecture of the fog network was introduced. Then the incentive mechanism was integrated with the resource sensing technology and the task offloading technology in the fog network, and further examples were presented to show the important role of the incentive mechanism in the fog network.

Key words: fog network, resource sensing, task offloading, incentive mechanism

收稿日期: 2019-01-01; 修回日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61871370); 上海市自然科学基金资助项目 (No.18ZR1437500); 中国科学院百人计划项目 (No.Y86BRA1001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61871370), The Natural Science Foundation of Shanghai of China (No.18ZR1437500), The Hundred-Talent Program of Chinese Academy of Sciences (No.Y86BRA1001)



1 引言

随着科技的不断发展, 高速互联网加速普及, 全球网络环境中的智能终端数量持爆炸性增长态势。思科 (Cisco) 公司指出, 到 2020 年, 全球物联网 (IoT) 设备的数量将达到 500 亿台^[1]。毫无疑问, 海量数据的产生将对数据管理以及网络性能带来巨大挑战。由于终端设备资源能力不够强大, 它们难以在本地进行数据处理, 因此越来越多的应用把大量数据存放到“云核心”中计算或存储。这里的“云核心”, 是指装配大量服务器和存储器的数据中心^[2-3]。将云计算的研究加以延伸, 海量数据无需移动到核心云处理, 而是在物联网设备上或者设备之间存储和处理它们自身产生的数据, 由此, 雾计算的概念应运而生。

激励理论是行为科学中的核心理论, 其主要用于分析需要、动机、目标和行为这 4 个部分之间的关系。激励可分为 3 个类别: 内容型激励、过程型激励和行为修正型激励。激励主要是为了引导人或事向着有利于目标的方向推进, 并采取一定的方式方法影响其内在需求或者动机。在过去的雾网络研究当中, 大多学者把焦点放在了雾网络自身的某些设备或性能, 而将激励机制运用其中的研究甚少。加之现有雾技术还未成熟, 仍值得深入探索和研究。本文从激励理论中获得启发, 将激励机制与雾网络相融合, 能够有效提升雾网络中异构设备的性能, 为终端用户带去更好的服务体验。

2 雾计算技术概述

雾计算技术是由云计算技术延伸而来的, 雾计算网络 (以下简称雾网络) 层会在本地部署具有计算、通信、缓存和控制等功能的设备, 由此大大缩短了终端用户到云中心的距离。雾网络层可以仅靠自身为终端提供服务, 更可实现云雾的有机融合, 借助云这一功能强大的资源中心, 为

终端用户带去更好的服务质量。因此, 雾计算技术有着深远的研究意义以及广泛的应用前景。

2.1 雾计算的研究意义

近年来云技术的应用走入千家万户, 但随着物联网技术的不断发展, 各种日常设备都装载传感器, 海量的传感器接入网络, 并将源源不断的数据传回云端, 无疑造成网络拥堵。此外, 位于核心网络的集中式数据中心与各种终端设备的距离也较远, 造成不可避免的网络时延^[4]。一旦核心网络出现问题或者回传链路中断, 都将造成巨大的网络安全隐患。未来物联网的发展必须满足低时延、大数据以及高可靠性的要求, 将海量的分布式数据集中到一个中心位置进行处理, 无论从技术上还是经济上来说都是不可行的。

雾计算从云计算延伸而来, 其从集中式的云网络结构中扩展, 并且跨各种分布式组件, 是一种新型的更广泛的集成架构^[5-6]。如图 1 所示, 雾网络位于云核心与物联网终端设备的中间层, 采用原位数据处理模式, 能够将计算、存储、控制和通信等资源从网络中心扩展到网络边缘。换言之, 雾计算是更加贴近地面的云计算^[7]。雾网络这种分布式计算模型, 采用半虚拟化架构, 雾网络中使用的设备称为雾节点。在雾网络中, 雾节点在本质上通常异构, 或是移动终端设备, 或是专门架设的本地服务器, 也可以是传统的路由器、交换机和网关等^[8]。终端设备可基于任何联网设备随时随地访问雾节点。雾网络中雾节点的数据处理能力虽然远不及云核心, 但雾网络设备以量取胜, 完全可以满足中小型数据中心的需求^[9]。

2.2 雾网络的特点及应用场景

在如今的大数据时代, 雾计算和云计算虽然有不同的影响作用, 但二者的目的都是带来更优的目标问题解决方案。与资源集中的云中心不同, 雾网络由数量庞大的雾节点构成, 这些雾节点可以各自散布在不同的地理位置, 由此雾网络也有其独特的特点, 主要体现在以下几个方面。

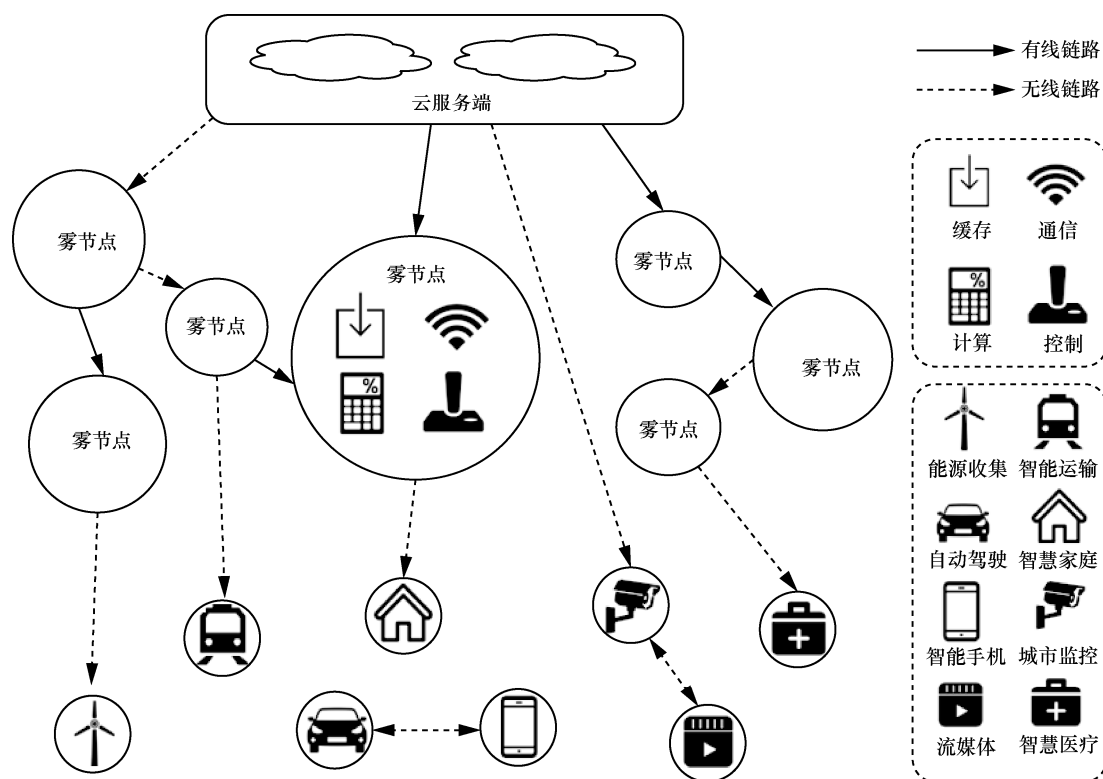


图1 雾网络系统及应用

- 数据处理时延低：雾网络中的设备位于网络的边缘位置，数据的存储和处理无需访问云中心，速度更快，因此网络时延低。
- 设备接入规模大：雾网络中任何终端设备或者传感器都可作为雾节点，执行网络中的计算、存储、通信以及控制功能等^[10]。
- 网络设备异构性：雾网络中的设备在本质上是异构的，并且可以部署在不同的网络核心、端点以及边缘中^[11]。因此，雾网络设备的异构性决定其可跨平台进行资源管理。
- 雾设备高移动性：在雾网络中，不同的移动终端设备可以直接进行通信，信号无需传到云端或者基站，因此可以支持很高的移动性。
- 雾设备分布广泛：雾网络中大规模的传感器设备部署面积广泛^[12]，这与集中式云数据中心形成鲜明的对比。

- 云雾可有机融合^[13]：在物联网技术中，雾节点能够对数据进行初步处理并做出决策，而云网络可弥补单一雾节点相对较弱的数据处理能力，负责运算量较大的业务。因此，云雾有机融合更能提升用户的服务体验。

雾计算作为一种新的服务计算模式，其虚拟化的基础设施更加接近终端用户，能够为用户带去更多的服务便利，因此在如下场景中具有广泛的应用前景。

- 实时数据量大但时延低。对于虚拟现实（VR）技术和大型网络游戏等类型的应用，雾网络可以把大量数据缓存在距离用户较远的地方，时延会大大低于地理位置较远的终端到核心云所需时延，避免了网络拥塞问题的发生，同时也节省了网络带宽^[14]。
- 需实时交互的移动场景。在雾网络某区域



内，移动物体会装载传感器，该区域内固定的传感器会与之进行协同感知，再将数据传至对应的雾节点进行处理，处理完毕后，结果会实时反馈给用户。由于车辆本身移动性强且分布广泛，因此车联网技术是雾网络应用的重要体现^[15]。

- 分布式智能决策场景。在实际生活中，有许多场景需要分布式决策，而传统的云网络在移动支持和时延性能等方面存在弊端，因此难以带来更好的用户体验。而雾网络中的设备能够在分布式场景中更高效智能地做出决策，提升网络的有效性和可靠性^[16]。例如在智能交通系统中，部署在车辆以及道路两旁的传感器能够实时监控路面交通状况，及时发现危险驾驶行为，从而有效降低交通事故发生率。
- 软件定义网络（SDN）。软件定义网络是一种新型的网络架构，其主要通过软件编程来定义和控制网络^[17]。软件定义网络在车联网领域得到广泛应用，通过增加车辆和车辆到基础设施的通信和集中控制，从而降低车辆碰撞概率，减少事故发生。

相比于云计算的网络模式，雾计算的网络设备更繁多且复杂，设备与设备之间的关系也是互相交织、紧密相依的，需要对雾网络进行更高效的管理，在优化设备性能方面也需采用更加优质的技术。因此，研究雾网络的架构，剖析雾网络中设备间的依存关系，有重要的研究意义。

3 雾网络架构

由于雾网络中的各个设备普遍是异构的，设备之间彼此紧密依存、互相交织。因此，对参与雾网络的异构设备关系进行合理的建模分析，能够有效地融合和利用雾网络资源，充分利用雾网络的开放特性，为终端提供差异化服务，同时优化雾网络性能。

3.1 雾网络架构概述

物联网终端设备与云核心之间数量庞大且具有不同资源和能力的设备都可以作为雾计算网络中的雾节点，利用各自空闲的存储、缓存、计算和通信等资源来为邻近的其他设备提供服务。本文提出的雾计算网络架构适用于多个网络运营商并存的场景，其构成主要包含以下3种设备类型。

- 服务请求节点：当有数据业务请求时，终端设备即视为服务请求节点，其会向所隶属的网络运营商提出服务请求。
- 网络运营商：位于核心云，具有强大的资源调度的能力并且可以感知全网的全局信息^[18-19]，其可与服务请求节点建立服务连接。
- 雾节点：通常具有比服务请求节点更强的存储或计算能力，服务请求设备的业务会卸载到雾节点中进行处理。此外，当服务请求节点存在空闲资源时，也可视为雾节点为周边节点提供服务。

在实际的场景中，服务请求设备与雾节点会存在不隶属于同一网络运营商的情况。因而，为了向位置邻近但隶属不同的其他设备提供雾计算服务，在如图2所示的网络架构中，采用虚拟控制面与物理业务面相结合的方式。虚拟控制面由不同的移动终端或数据资源请求方与拥有其的个体或网络运营商构成；物理业务面由为终端提供雾计算服务的雾节点与服务请求终端构成。

对雾网络进行系统化架构建模，并引入激励机制分析各个设备之间的利益关系，主要用于优化雾网络中以下几个方面的指标。

- 时延优化：雾网络中的雾节点更多地承担着计算功能，而时延是衡量计算能力的一个重要指标。与云计算相比，雾网络中的计算任务不必上传到云中心，可以在雾节点处完成，从而有效地降低了时延^[20]。用户的服务质量需求与计算时延紧密相关，为了

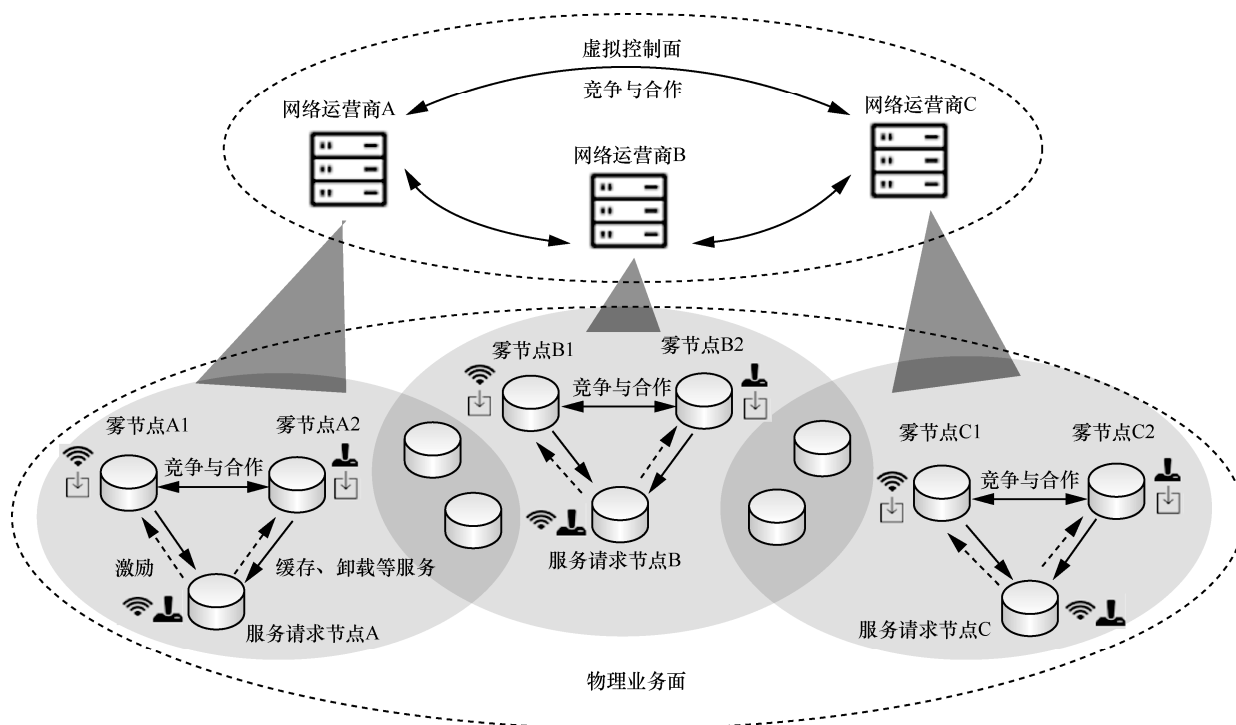


图2 雾网络架构

提升用户体验性能，必须优化计算时延。

- 能效优化：能效指的是设备的能量利用效率，它反映了设备的节能效果。雾网络中设备的工作每时每刻都在消耗能量，提高能量效率符合网络的利益需求，也影响着网络的可持续运作。尤其对于雾网络中的无源设备来讲，减少能量消耗对其使用寿命举足轻重^[21]。
- 时延—能耗均衡：一般来讲，网络中的时延和能耗是一对相矛盾的指标，现阶段的研究还无法达到在时延最小化的同时，能耗也最低。在虚拟现实、实时视频等应用中，时延和能耗都会影响到用户的服务质量，因此在优化网络设备的某个参数时，需按照实际情况尽量做到时延和能耗的权衡。

3.2 雾网络设备关系分析

雾网络中服务请求节点、雾节点和网络运营商之间存在利益交织关系，研究雾网络中的激励机制需要对不同实体通过建立雾计算连接所获得

的收益和支出进行建模，分析彼此间的相互关系。

(1) 服务请求节点

对于服务请求节点而言，主要存在如下的连接和利益关系。

- 服务请求节点与网络运营商：雾网络中的服务请求节点与为其提供服务的网络运营商之间存在利益关系，通常以服务请求节点向所属运营商付费的形式来获取相应的服务。并且所需服务仅通过虚拟控制面从网络运营商处获取，服务请求节点与网络运营商是一一对应关系，但一个网络运营商会服务多个请求节点。网络运营商为服务请求节点设定服务价格，为使网络运营商从中获利，设定的价格不能太低。但又由于多个网络运营商之间存在对客户的竞争关系，如果服务价格太高，将会流失客户，使得收益降低。
- 服务请求节点与雾节点：当服务请求节点向网络运营商发起服务请求后，网络运营商会为服务请求节点分配提



供服务的雾节点，或者通过雾节点所属网络运营商建立连接关系。因此雾节点与服务请求节点直接在物理业务面进行数据的传输和处理，彼此之间并不存在直接利益交织。

- 不同服务请求节点：不同的服务请求节点可能会同时向网络运营商发起服务请求，但有时网络运营商受自身状态和环境变化的影响可能无法同时响应多个服务请求节点。此时不同的服务请求节点之间就会存在竞争关系，服务请求节点为争取更好的服务资源以及服务优先级，会给出比原定价格更高的价位，以此来获取更优质的服务。

(2) 网络运营商

对于网络运营商而言，主要存在如下的连接和利益关系。

- 网络运营商与雾节点：在虚拟控制面建立起服务请求节点与网络运营商的对应关系后，当服务请求节点向网络运营商发起服务请求后，雾节点不会向网络运营商免费提供服务，因此，将以向雾节点或其隶属的服务运营商付费的激励形式来获取雾节点的服务。激励过低将无法充分调动雾节点的服务积极性，降低用户的服务质量需求，而激励过高将减少网络运营商的利润。通过将数据处理成本和雾节点提供的服务借助激励价格进行建模，能够得到满足用户需求的最优价格策略。
- 不同网络运营商：在实际的场景中，能够为服务请求节点提供最优服务的雾节点很有可能不与服务请求节点隶属同一个网络运营商，因此该雾节点的使用权限并不能随意获取，而要通过所属网络运营商建立连接关系。在这种情况下，不同网络运营商之间会产生利益关系，该种利益关系可以通过货币补偿实现。同时，当某个雾节

点能够提供的服务更加优质时，其可能被多个网络运营商选中，因此网络运营商除了合作也会存在竞争关系。

(3) 雾节点

不同雾节点：当服务请求节点向网络运营商发起服务请求后，网络运营商需为服务请求节点分配参与服务的雾节点。由于雾节点可从该服务中获取利益，因此雾节点会为被网络运营商选中参与服务而存在竞争关系。服务请求节点处产生的任务通常需要多个雾节点共同完成，彼此间也需要相互协作，因此雾节点之间也存在合作关系。

4 雾网络中的激励机制

为了提升雾网络资源利用率以及服务质量需求，并确保异构的雾节点的可靠性和安全性，需要引入合理的激励机制。在众多激励机制的研究过程中，都离不开博弈论的帮助。因此，将博弈论中的激励机制运用到雾网络中，是一个重要的研究内容。

4.1 博弈论与激励机制

博弈论是应用数学的一个重要分支，主要研究的是在给定某些信息结构的情况下，决策主体追求最大化效用以及不同决策主体之间关于决策的均衡问题^[22]。博弈论的应用范围非常广泛，在经济学、工业理论以及社会科学等领域都发挥着重要作用。博弈论的主题是博弈分析，博弈的过程是参与博弈的决策者之间的一个互动过程。

一般来讲，博弈过程主要由以下 3 个基本要素组成。

- 参与博弈的决策主体，又可称为博弈的参与人。博弈的参与人有理性一面，但也有自私的一面，通过对这种不确定性进行建模，能够确定可行的行动方案。
- 决策主体可选择的策略和行动空间，即策略集。在每场博弈中，每个参与人都可选

择可行的完整的行动方案,一个可行的全局方案就是一个决策。

- 用来衡量博弈参与人从博弈中收益情况的指标,即效用。效用不仅与博弈参与者本身所选的行动策略有关,还和其他参与者的策略有紧密联系。

一个基本的博弈,就是由参与人、策略集和效用构成的。通常也会从以下3个角度,对博弈论进行基本的分类。

- 合作博弈与非合作博弈。如果博弈的各个参与者能够达成具有一致约束效用的协议,则其称为合作博弈,否则称为非合作博弈。
- 静态博弈与动态博弈。如果博弈的参与者不能根据前一个参与者的行动做出自身选择,此种博弈叫做静态博弈;若后来的参与者能够得知前一个参与者的选择,此种博弈就叫动态博弈。
- 完全信息博弈与不完全信息博弈。在完全信息博弈中,每个参与人对其他参与人的所有信息情况能够完全掌握,例如策略、效用等。在不完全信息博弈中,每个参与人只能掌握到其他参与人的部分信息。

从博弈论的角度来看,激励涉及的对象就是博弈的参与人,参与博弈的各方在激励过程中有各自的策略,并且也会各自获取自身的利益,这就是博弈的效用。所以激励是具备博弈论的三大基本要素的。在众多学术研究中,为收获更好的目标性能,已有一些将博弈论与激励机制相结合的实例。例如,为了激励足够多的用户提供他们的个人设备资源以实现良好的服务质量,在具有多个任务共同协作的场景中,Luo等人^[23]提出了一个基于Stackelberg博弈的激励框架来模拟服务器和用户之间的交互。为了减少在车联网中多车辆计算卸载的延迟,Liu等人^[24]提出了一种分布式计算卸载算法,将问题表述为一个多用户计算卸

载博弈问题,并证明了博弈的纳什均衡(NE)的存在。针对协作通信系统下行链路,Zhuang等人^[25]提出一种基于链路不平衡的中继激励机制,旨在保证目的用户传输性能的基础上,给予中继节点合理的回报,实现系统频谱效率和中继能量效率的改善。Abusitta等人^[26]设计了一种基于联盟博弈论的新型分散算法,该算法允许一组基于云的入侵检测系统(IDS)能够分布式地形成值得信赖的IDS社区,即使存在不受信任的IDS的情况下也能提高其个体检测准确度。为激励无线自组网节点参与新节点的入网认证,Chandrasekharan等人^[27]研究了使用终端协作最小化无线接入网络能耗的博弈论方法,并比较了基于中继的通信(终端彼此协作)的节能传输的策略与集中式方法的差异性,旨在提升无线电接入通信系统的能量效率。博弈论和激励机制在国内外众多学术研究中发挥了重要作用,二者相互融合,能够提升网络设备的效用,使网络性能得到大幅提升。

结合对博弈论相关知识的研究,在表1中列举出用博弈论对雾网络中不同设备之间利益关系的部分建模实例。

4.2 激励机制在资源感知中的应用

由于雾网络设备普遍分散且异构,为了掌握网络拓扑、用户优先级和数据业务内容差异等,网络运营商需要感知网络全局信息。并且不同的网络运营商之间为了更好地为用户服务会进行协同感知,使得每个网络运营商都能更好地获取网络的全局信息。这就要求各个设备定期向虚拟控制面的网络运营商更新自身的资源信息,为了使感知信息准确有效,必须引入合理的激励机制。实际的网络拓扑中有些区域设备分布密集,而有些区域设备稀疏,所以需要不同的感知激励策略。这里以网络运营商与提供服务的雾节点为例,运用Stackelberg博弈对二者进行建模。其中将网络运营商视为博弈的领导者,提供感知服务的雾节点作为博弈的跟随者。



表 1 不同设备间利益关系建模实例

	服务请求节点	网络运营商	雾节点
服务请求节点	拍卖博弈（不同的服务请求节点视为不同的竞买人，出价高者可得到更优质的雾节点服务）	Stackelberg 博弈（网络运营商作为博弈的领导者，服务请求节点作为博弈的跟随者，各自优化自身净收益）	合作博弈（服务请求节点与雾节点采取妥协方式，使二者总收益最大，依据二者在博弈中贡献或事先商定的契约分配收益）
网络运营商	合作博弈（服务请求节点与网络运营商采取妥协方式，使二者总收益最大，依据二者在博弈中贡献或事先商定的契约分配收益）	非合作博弈（在博弈中不同的网络运营商之间的利益相互影响，不同的运营商各自做出决策，使自身收益最大）	无限重复博弈（博弈重复无数次，若雾节点存在自私或恶意行为，将引发网络运营商的防御触发机制）
雾节点	有限重复博弈（博弈重复有限次，服务请求节点和雾节点根据之前的博弈历史制定下一步的行动策略）	Stackelberg 博弈（网络运营商作为博弈的领导者，雾节点作为博弈的跟随者，各自优化自身净收益）	贝叶斯博弈（参与博弈的各个雾节点对于对方的信息无法完全掌握，每个雾节点按各自的服务诚信度分为不同的类型，雾节点类型决定自身收益）

网络运营商作为 Stackelberg 博弈中的领导者，为激励雾节点反馈其各种资源信息，网络运营商需付给每个雾节点感知报酬。博弈的过程为：网络运营商首先预测提供感知服务的雾节点的反馈策略，计算自身收入和成本之间的净收益；然后通过优化净收益，为雾节点提供最优资源感知报酬价格。

雾节点作为 Stackelberg 博弈中的跟随者，根据网络运营商的激励策略提供资源感知频率。博弈的过程为：雾节点根据网络运营商提供的资源感知报酬价格，计算其收入和成本之间的净收益。通过最大化自身净收益，向网络运营商提供资源信息的最优感知频率。雾节点需提供的感知信息包括雾节点的通信资源、计算资源、存储资源、节点电量状态、位置以及设备邻接关系等。

通过此种 Stackelberg 博弈，雾节点以最优感知频率向网络运营商反馈各种资源信息，网络运营商以最优感知价格付给雾节点报酬。网络运营商和雾节点都能获得最优收益，通过感知每个雾节点的资源信息，可以提升终端设备的用户体验度，保障雾网络稳定运行。

上述理论是将激励机制应用于雾网络内部，由于雾网络的设备部署在网络的边缘端，这对于无线网络信息的感知是很便捷的。在这个基础上，可以将雾网络的开口开放至第三方的应用，

并将激励机制运用其中，进一步实现网络和应用的深度融合。根据第三方的业务需求，感知网络的整体状态信息，从而进一步扩大雾网络的业务范围。

4.3 激励机制在任务卸载中的应用

由于异构雾节点的数量众多并且可以灵活部署在雾网络中，因此移动终端产生的计算任务可以分为多个子任务，并且可以卸载到位置邻近的雾节点而不是遥远的云核心中进行处理，其目的是节省能量、提升性能和负载均衡。任务卸载作为雾网络中的重要技术，目前已经有很多相关研究成果，在现存的任务卸载研究范畴中，很多都是使雾节点工作在命令模式下，即被选中的雾节点无偿为终端设备提供服务，这种工作模式存在很大的弊端^[28]。终端设备产生的很多计算任务都要求参与服务的雾节点具备较高的计算能力，这些雾节点在付出高计算能力之后，很有可能因自身过量的能量消耗导致无法正常运转，甚至造成雾网络系统级的问题。这会极大地打击雾节点参与任务卸载的积极性，也会导致雾节点潜在恶意或者自私行为。这里在参与任务卸载的雾节点诚信模型的基础上，加入激励机制，旨在抑制网络节点设备恶意或者自私行为，维持雾网络的正常运作。基于激励的任务卸载模型如图 3 所示。

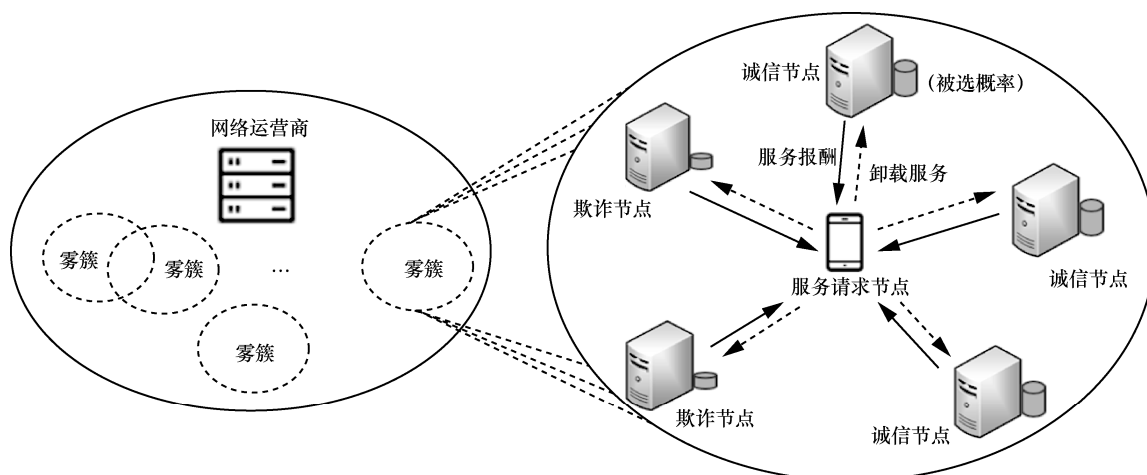


图3 基于激励的任务卸载模型

在雾网络中，服务请求节点产生一定数量的计算任务后，需卸载到部分雾节点中进行处理，服务请求节点会为候选雾节点提供计算报酬价格，候选服务节点根据报酬价格，优化净收益，得到自身所能提供的最优帮助计算比例，并向网络控制器上报最优计算能力。服务请求节点依据时延最小化原则划分好子任务后，向网络运营商发起任务卸载请求。

网络控制器接收到来自服务请求节点的请求后，根据设定好的候选雾节点的诚信指标以及上报的最优计算能力，选择部分雾节点提供计算帮助，并且此选择策略对候选服务节点不可见。服务请求节点将划分好的计算任务卸载至网络运营商选中的雾节点进行处理，然后将计算结果返回给服务请求节点。服务请求节点通过对比时延检测出上报虚假能力的欺诈服务节点，并汇报给网络运营商，网络运营商为本次任务所选雾节点进行诚信指标更新。由于雾网络中存在欺诈行为的雾节点，为雾节点引入诚信指标进行建模，有效降低了这些欺诈节点被网络运营商选中的概率，保障了服务请求节点的服务质量，提升了雾网络中任务卸载的可靠性。

此外，针对雾网络中存在恶意、欺诈或者自私行为的雾节点，也可设定防御定价触发策略。

此策略设定目的是解决雾节点由不良行为造成的雾网络系统性能下降的问题。雾节点的效益代表了其收入与支出的权衡，一旦雾节点在任务卸载过程中存在欺诈行为，通过设定检测参数，将会触发防御定价机制，使雾节点在产生欺诈行为后的效用会明显低于诚信参与卸载的效用，因防御定价机制对雾节点来讲是可知的，从而抑制了雾节点的不良行为。

5 结束语

雾计算技术的研究逐渐受到学术界和工业界的广泛关注，本文针对这一新型的计算体系，介绍了雾网络的系统架构，并对雾网络中各个设备间的利益关系进行了分析和建模。通过将激励机制与雾网络中资源感知和任务卸载相融合，调动了雾网络设备参与服务的积极性，并减少设备恶意或自私行为的产生，从而提高雾网络运作的可靠性，为将来实际部署雾网络打下坚实的理论基础。

参考文献：

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016-2021 white paper[R]. 2017.
- [2] 方巍. 从云计算到雾计算的范式转变[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(5): 404-414.



- FANG W. Paradigm shift from cloud computing to fog computing[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2016, 8(5): 404-414.
- [3] CHAUDHARY R, KUMAR N, ZEADALLY S. Network service chaining in fog and cloud computing for the 5G environment: data management and security challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(11): 114-122.
- [4] MAO Y, YOU C, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [5] LIU Y, FIELDSEND J E, MIN G. A framework of fog computing: architecture, challenges, and optimization[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 25445-25454.
- [6] WANG F, XU J, WANG X, et al. Joint offloading and computing optimization in wireless powered mobile-edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1784-1797.
- [7] 彭木根. 5G 无线接入网络:雾计算和云计算[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- PENG M G. 5G wireless access network: fog computing and cloud computing[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018.
- [8] 郭奕星. 雾计算技术及其物联网应用[J]. *电信科学*, 2018, 34(Z1): 90-97.
- GUO Y X. Fog computing technology and its application in the Internet of things[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(Z1): 90-97.
- [9] ROMAN R, LOPEZ J, MAMBO M. Mobile edge computing, fog: a survey and analysis of security threats and challenges[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018(78): 680-698.
- [10] DAHIYA V, DALAL S. Fog computing: are view on integration of cloud computing and internet of things[C]//2018 IEEE International Students' Conference on Electrical Electronics and Computer Science, Oct 2-4, 2018, Bangka Belitung, Indonesia. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [11] SARKAR S, CHATTERJEE S, MISRA S. Assessment of the suitability of fog computing in the context of internet of things[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2018, 6(1): 46-59.
- [12] MUKHERJEE M, SHU L, WANG D. Survey of fog computing: fundamental, network applications, and research challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1826-1857.
- [13] ALI M, RIAZ N, ASHRAF M I, et al. Joint cloudlet selection and latency minimization in fog networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(9): 4055-4063.
- [14] DU J, ZHAO L, FENG J, et al. Computation offloading and resource allocation in mixed fog/cloud computing systems with min-max fairness guarantee[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(4): 1594-1608.
- [15] NING Z, HUANG J, WANG X. Vehicular fog computing: enabling real-time traffic management for smart cities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 87-93.
- [16] SHAH-MANSOURI H, WONG V W S. Hierarchical fog-cloud computing for IoT systems: a computation offloading game[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(4): 3246-3257.
- [17] CHEN M, HAO Y. Task offloading for mobile edge computing in software defined ultra-dense network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(3): 587-597.
- [18] ZHANG C, SHEN F, ZHANG G, et al. An incentive framework for collaborative sensing in fog networks[C]//2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Oct 18-20, 2018, Hangzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [19] LIU Y, YU F R, LI X, et al. Distributed resource allocation and computation offloading in fog and cloud networks with non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 12137-12151.
- [20] LIU Z, YANG X, YANG Y, et al. Dats: dispersive stable task scheduling in heterogeneous fog networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018 accepted.
- [21] YANG Y, WANG K, ZHANG G, et al. Meets: maximal energy efficient task scheduling in homogeneous fog networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 4076-4087.
- [22] 周海平, 沈士根, 黄龙军, 等. 基于博弈论的无线传感器网络恶意程序传播模型[J]. *电信科学*, 2018, 34(11): 67-76.
- ZHOU H P, SHEN S G, HUANG L J, et al. Wireless sensor network malicious program transmission model based on game theory[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(11): 67-76.
- [23] LUO S, SUN Y, JI Y, et al. Stackelberg game based incentive mechanisms for multiple collaborative tasks in mobile crowdsourcing[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2016, 21(3): 506-522.
- [24] LIU Y, WANG S, HUANG J, et al. A computation offloading algorithm based on game theory for vehicular edge networks[C]//2018 IEEE International Conference on Communications, May 20-24, 2018, Kansas, MO, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [25] 庄陵, 尹耀虎. 认知异构网络中基于不完全频谱感知的资源分配算法[J]. *计算机科学*, 2018, 45(5): 49-53, 74.
- ZHUAG L, YIN Y H. Resource allocation algorithm based on incomplete spectrum perception in cognitive heterogeneous networks[J]. *Computer Science*, 2018, 45(5): 49-53, 74.
- [26] ABUSITTA A, BELLAICHE M, DAGENAISA M. A trust-based game theoretical model for cooperative intrusion detection in multi-cloud environments[C]//2018 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops, Feb 18-21, 2018, Paris, France. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [27] CHANDRASEKHARAN S, KANDEEPAN S, GOMEZLINE K M, et al. Terminal cooperation using game theory for energy efficiency in radio access networks: a simulation based performance

analysis[C]//2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering, Sep 19-20, 2018, IIUM Ganbak, Malaysia. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

- [28] ZHANG G, SHEN F, CHEN N, et al. Dots: delay-optimal task scheduling among voluntary nodes in fog networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019: 1.

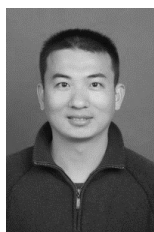
[作者简介]



王蓓蓓（1995-），女，河海大学计算机与信息学院硕士生，主要研究方向为雾计算、移动边缘计算。



沈斐（1983-），女，中国科学院上海微系统与信息技术研究所“百人计划”副研究员，主要研究方向为无线通信、雾计算、移动边缘计算。



李旭杰（1979-），男，博士，河海大学计算机与信息学院副教授，主要研究方向为无线通信网络的资源分配与优化。



徐慧慧（1997-），女，武汉大学在读，主要研究方向为雾计算、深度学习。



张冲冲（1994-），男，中国科学院上海微系统与信息技术研究所硕士生，主要研究方向为雾计算、移动边缘计算。