

“端—边—云”协同的智慧物联网

吴大鹏, 张普宁, 王汝言

(重庆邮电大学光通信与网络重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 物联网业务的进一步延伸及物联网终端数据的爆炸式增长, 对接入网络的时延性能和计算能力提出了更高的要求, 传统无线网络架构已无法支撑物联网应用的快速发展。提出一种边缘驱动的智慧物联网架构, 首先分析了当前限制物联网技术发展的主要因素, 进而将边缘计算技术引入物联网, 形成“端—边—云”协同计算的智慧物联网架构, 高效、及时地处理业务数据, 最后分析了边缘驱动的智慧物联网发展所面临的挑战, 并对未来工作进行了展望。

关键词: 智慧物联网; 边缘计算; “端—边—云”协同; 边缘驱动

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00060

Smart Internet of things aided by “terminal-edge-cloud” cooperation

WU Dapeng, ZHANG Puning, WANG Ruyan

Chongqing Key Laboratory of Optical Communication and Networks,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: The further expansion of the Internet of things (IoT) traffic and the explosive growth of the terminal data require higher delay performance and computing ability of the access network. The traditional wireless network architecture has been unable to support the rapid development of IoT. Thus, the edge-driven smart IoT architecture was proposed. Firstly, the main factors that restrict the development of IoT were analyzed, and then the edge computing technology was introduced into the IoT to form a “terminal-edge-cloud” cooperative computing architecture to deal with the traffic data efficiently and timely. Finally, the challenges of the edge-driven smart IoT were analyzed and the future work of this system was proposed.

Key words: smart Internet of things, edge computing, “terminal-edge-cloud” cooperation, edge-driven

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 顾名思义就是物物相连的互联网, 它是互联网的延伸和扩展, 借助先进的感知技术, IoT 实现了任何物品与物品之间的信息交互和通信^[1]。除此之外, IoT 不仅需要为各个传感器之间提供连接, 其本身也需要具有一定的智能处理能力, 能够实现对物体的智能控制。传统的 IoT 体系架构分为 3 层: 感知层由各种各样的传感器设备组成, 负责物体的识别与数据的感知

和收集; 网络层由各种异构网络、网络管理系统及云计算平台构成, 负责传递和处理感知层收集的数据信息; 应用层是用户和 IoT 间的桥梁, 它与行业需求相结合, 实现了 IoT 的智能应用。IoT 发展最明显的特征就是网络智慧化, 通过信息化的手段实现万物相连, 自动化地处理信息, 减少人为干预, 在降低人工不稳定性的同时, 极大地提升网络效率。智慧 IoT 在许多行业应用中都有着巨大的发展潜力, 其发展必将引发新一轮信息技术产业革命, 是信息产业领域未来竞争的制高点, 更是产业升级

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61771082); 重庆市高校创新团队建设计划资助项目 (No.CXTDX201601020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61771082), Chongqing Funded Project of Chongqing University Innovation Team Construction (No.CXTDX201601020)

的核心驱动力^[2-3]。

IoT 技术飞速发展引领产业升级,同时对其技术的演进提出更高的要求。近年来, IoT 终端设备大规模普及,导致终端数据和连接出现井喷式增长,海量数据连接需要计算能力更高的 IoT 网络架构实现数据的及时分析和处理;同时, IoT 业务不断衍生,广泛应用在智能交通、智能电网、智能家居及智能农业等领域,许多特殊的应用场景,如实时路况信息采集、安防监测、自动驾驶等,此类业务对数据实时性要求较高,需要网络进一步降低数据的传输时延^[4-5]。传统无线网络架构的处理和计算能力已不足以支撑智慧 IoT 的深度覆盖和海量连接,同时云计算平台离 IoT 终端较远,难以满足低时延业务的数据实时性要求,实现 IoT 体系架构的突破性创新变得刻不容缓^[6-9]。

移动边缘计算(MEC, mobile edge computing)的诞生解决了 IoT 发展瓶颈的燃眉之急,被认为是 IoT 的关键使能者。MEC 是在靠近数据源头的网络边缘侧,融合网络、计算、存储及应用等核心能力的开放平台,就近提供边缘智能数据处理服务,以满足网络敏捷连接、实时业务、数据优化等应用需求^[10-13]。将 MEC 引入智慧 IoT 架构中,形成“端—边—云”协同的边缘驱动 IoT 架构。终端、边缘、云平台动态分配计算量,有效缓解了云计算平台的数据处理负担,提高了数据处理效率。同时,终端与边缘更贴近数据源头,极大地降低了数据的传输时延,满足低时延业务的数据实时性要求,边缘驱动的新型智慧 IoT 架构必将成为 IoT 技术发展的新趋势。

边缘计算技术与 IoT 的融合技术还未成熟,边缘驱动的智慧 IoT 架构的发展仍面临着众多挑战。第一,网络资源极度紧张,如何设计高效的资源调度策略以合理地调度“端—边—云”计算资源、优化网络资源利用率的问题亟待解决;第二,多种多样的 IoT 终端设备产生多样性感知数据,如何对不同设备产生的多样性数据进行整合;第三,边缘驱动的架构下,对网络实体的监管难度加大,更需设计有效的隐私保护策略及安全保障机制,以保护数据及用户隐私信息不受侵害,保障网络安全、稳定运行;第四,很多 IoT 业务对网络的质量要求日益增长,例如超清图像视频监控,因此,增强 IoT 业务需求变得至关重要。

为了保证 IoT 深度覆盖和海量连接以及实现低时延、高质量的 IoT 应用,本文提出了一种边缘驱

动的智慧 IoT 体系架构。该架构采用“端—边—云”协同计算的方法,对智慧 IoT 的发展提供理论指导。进而,对新架构所面临的挑战进行分析,并对相关挑战做出了展望。最后,对全文进行总结。

2 边缘驱动的智慧 IoT 架构

2005 年,云计算概念的提出改变了人们日常的工作和生活方式。IoT 数据在地理上分散,随着计算机技术和网络通信技术的发展,实现了物与物之间数据信息的实时共享,智能化的实时数据收集、传递、处理和执行变得尤为重要。云计算虽然为数据处理提供高效的计算平台,但是目前网络带宽的增长速度远远落后于 IoT 数据的增长速度,基于云计算模型的单一计算资源已不能满足海量数据处理的实时性、安全性和低能耗等性能需求。为了满足数据传输过程在快速连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求,需要充分利用传感器节点、智能手机等终端以及蜂窝基站等基础设施所组成的边缘网络,在靠近数据源头的网络边缘处理物联网应用所请求的内容,提供边缘智能服务,以达到优化连接、卸载流量、增强体验的目的。在现有的云计算模型为核心的集中式大数据处理基础上,亟待需要发展以边缘计算模型为核心、面向海量边缘数据的边缘式数据处理技术。

与云计算相比,边缘计算并不是为了取代云计算产生的,而是对云计算的补充和延伸,为移动计算、物联网等提供更好的计算平台。边缘计算模型需要云计算中心的强大计算能力和海量存储的支持,而云计算也同样需要边缘计算中边缘设备对海量数据及隐私数据的处理,从而满足实时性、隐私保护和降低能耗等需求。为此,提出了一种边缘驱动的智慧 IoT 体系结构,如图 1 所示。该架构通过“端—边—云”协同计算为物联网应用提供资源与服务,通过三者的相辅相成、各取所长,可以极大地提高整个系统中资源的最大使用效率和传输效率,保证处理的实时性。同时,三者还可以根据当前的状态以任务迁移的方式动态地进行调整,达到均衡计算负载的目的,最终实现智慧物联网的深度覆盖和海量连接。

从各类网元所执行的基本功能来看,该体系结构具有较强的层次化特征,可分为智能 IoT 终端、边缘和云平台 3 层。其中,计算、存储能力有限的 IoT 终端主要负责对给定事务进行状态参数的采集

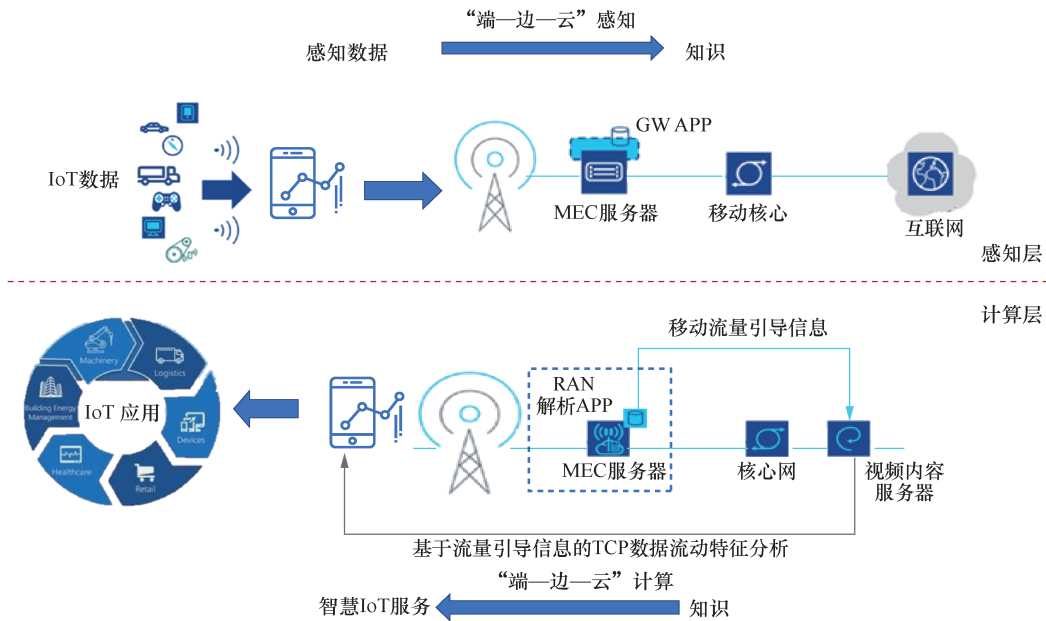


图 1 边缘驱动的智慧 IoT 体系结构

和转发，并执行一些简单的数据处理；边缘和云平台服务区分如图 2 所示，主要根据数据的实时性以及流量和访问服务器的频次，分别对不同业务数据进行收集、传递、处理和执行，并以动态的方式为业务请求网络资源。

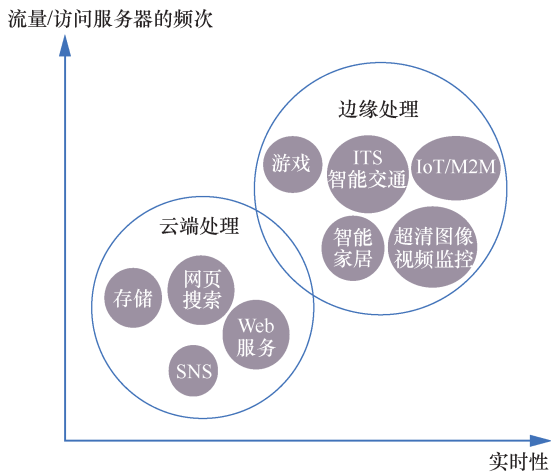


图 2 边缘和云平台服务区分

从实现智慧 IoT 服务来看，该体系结构主要对 IoT 数据进行感知和计算。在这种模式下，“端—边—云”凭借各自的运算和处理能力，通过人工智能和高级分析对 IoT 数据进行感知，以产生新的知识。新的知识通过“端—边—云”计算，智能地处理 IoT 任务，提升对不同状态做出响应的准确度和效率，最终实现“无人参与的智慧 IoT”。

3 关键技术

边缘驱动的智慧 IoT 系统还处于“从无到有”的较低层次的原型研究发展阶段，未来边缘驱动的智慧物联网将向“从有到优”的目标发展，面临着设计方案、调度策略、数据抽象以及隐私保护等方面的挑战。

3.1 “端—边—云”协同调度策略

海量 IoT 数据的爆炸性增长加快了频谱资源的消耗，现有资源分配及利用方式已难以应对移动通信面临的严峻挑战。其次，由于不同业务及设备类型的共存，使得网络管理变得更为复杂，目前的网络架构没有考虑 IoT 应用的差异化需求，导致无线资源的利用极度不均衡。因此，急需设计新的资源管理方法以实现无线网络资源的高效利用。

为此，引入了无线网络虚拟化（WNV, wireless network virtualization）及网络切片（NS, network slicing）相耦合的概念，如图 3 所示。其中，虚拟化为网络切片提供重要的技术支撑，网络切片则往往被视作虚拟化网络的理想架构。WNV 作为网络虚拟化（NV, network virtualization）在无线领域的延伸，通过基础设施与业务的分离，为多个抽象的独立虚拟网络动态共享基础设施及无线资源，从而大幅提升资源利用率，降低运营商的资本开销（CapEx, capital expenditure）和运营开销（OpEx, operating expense）。

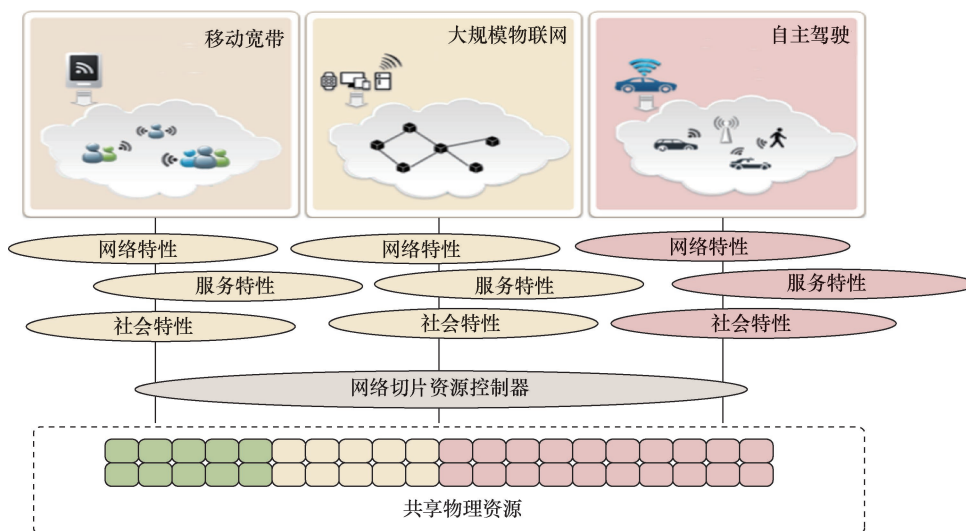


图3 基于NV和NS的“端—边—云”协同调度策略

此外，网络切片充分利用网络功能虚拟化（NFV, network function virtualization）和软件定义网络（SDN, software defined network）等虚拟化技术，创建多个逻辑上隔离的网络，以支持多样化、定制化的IoT应用场景及业务。相较于传统固定的网络资源分配方式，网络切片能够针对特定的性能需求实现迅速的网络部署及高效、灵活的资源调度。

3.2 IoT数据抽象

物联网应用需要部署大量无线传感器，当网络规模增大、各类应用增多时，传感器节点所产生的数据量随之上升，同时，与各类应用相匹配的数据种类也变得更加复杂。IoT数据格式的多样性共存和其数据的爆炸性增长，给IoT数据管理和存储带来了巨大挑战。

为了方便IoT数据的管理和存储，需要对IoT数据进行抽象，抽取有用的信息对其进行表达。若数据抽象过滤掉较多的源数据，将导致一些应用或服务程序因无法获得足够信息而运行失败；反之，

若保留大量源数据，IoT数据管理和存储难度将变得较大。为此，提出边缘驱动的智慧IoT体系结构如图4所示。可以根据分布式压缩感知方法，利用数据的稀疏性与相关性，以获取历史数据的类别特征，从而对IoT数据进行抽象表达。IoT数据抽象表达步骤可分为节点感知数据的特征获取、汇聚节点历史数据的特征获取及基于稀疏系数分类3个步骤。

3.3 隐私保护

数据的安全及隐私保护是边缘计算提供的一种重要服务。如果在家庭内部部署IoT系统，大量的隐私信息可能会被恶意节点捕获，导致传感器节点所承载的隐私信息无法得到有效保护。恶意节点可以通过对数据的篡改或丢弃，破坏数据的隐私性和完整性；恶意节点也可以从传感器节点获取节点参与任务和感知数据等相关信息，造成系统信息泄露。

针对上述攻击行为造成的隐私信息泄露问题，可以从恶意节点检测、隐私信息加密两个方面出发，以实现边缘网络中节点隐私信息的保护，如图5所示。

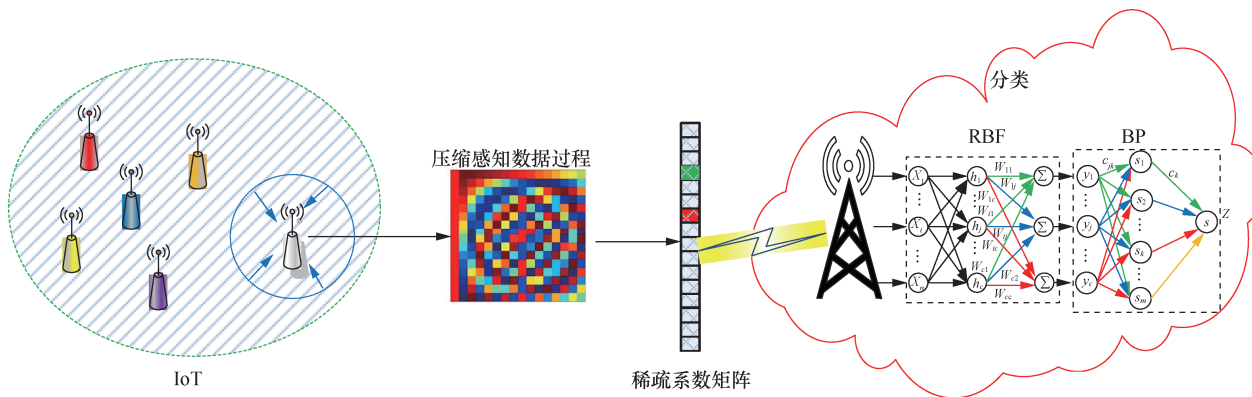


图4 边缘驱动的智慧IoT体系结构

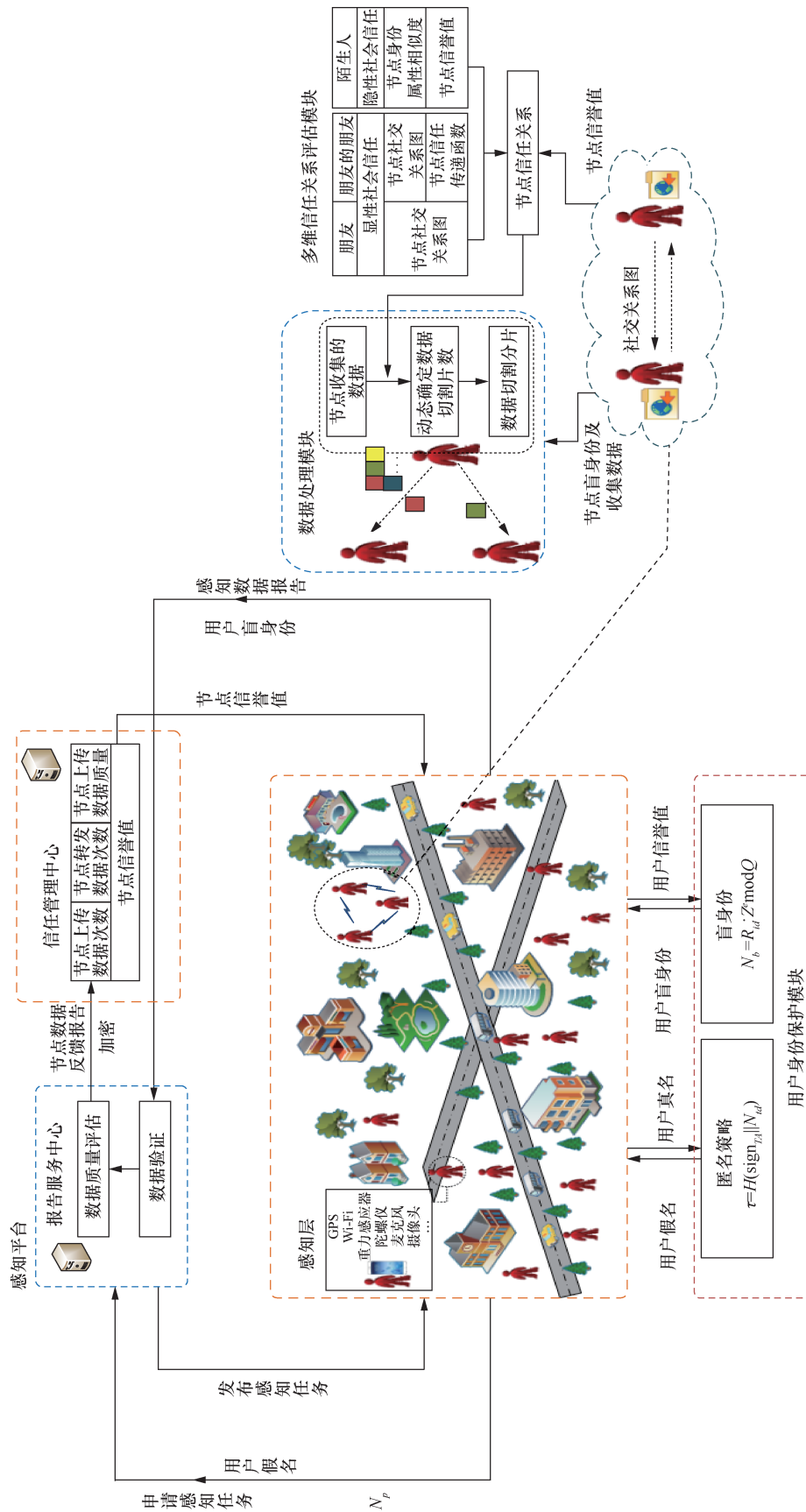


图5 基于签名的隐私保护机制

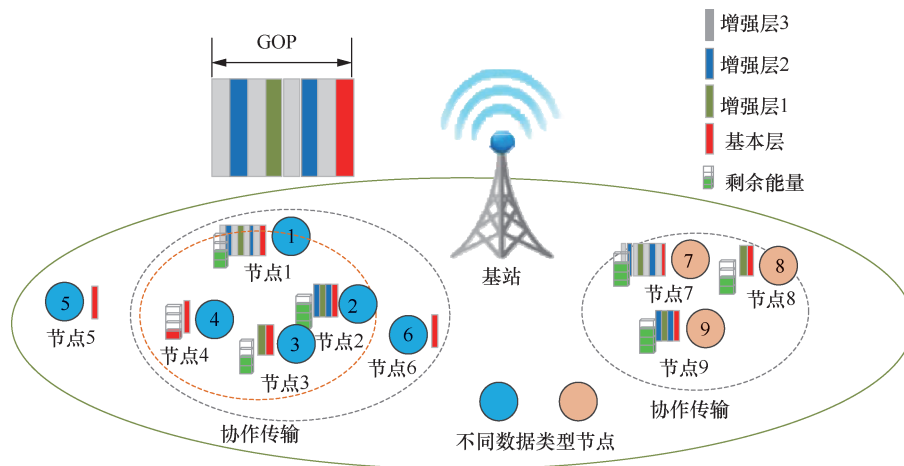


图 6 基于 SVC 的 IoT 节点协作传输

1) 当恶意节点发起攻击时,其交互行为与正常节点有较大差别,可以对网络中节点交互行为进行分析,挖掘恶意节点发起攻击时的行为规律,探索恶意节点与正常节点的行为特征差异,评估节点行为特征向量;进而,借助机器学习中的分类算法,对节点行为的特征向量进行学习,根据节点行为的差异对节点进行分类;最终,实现恶意节点检测。2) 隐私信息加密可以从节点身份隐私加密和节点数据隐私加密两方面出发,对节点隐私信息进行加密。其中,节点身份进行隐私加密可以使用假名策略和盲身份对节点身份进行隐私保护;节点数据隐私加密可以对数据进行分片传输,保证数据在传输过程中即使被攻击者获取,攻击者也无法恢复出完整的数据信息。

3.4 IoT 协作传输

视频 IoT 业务需要消耗大量网络资源,如超清图像视频监控的传输,此类“富媒体”业务需求的日益增长导致数据传输负载显著上升。因此,网络中的节点需要为源节点提供中继辅助。其中,中继节点的转发能力影响数据的传输效率,数据传输过程中的中继选择对整个边缘网络的承载能力和节点体验至关重要。

为此,当数据传输的带宽不足时,可以采用基于可伸缩视频编码(SVC, scalable video coding)的 IoT 节点协作传输,如图 6 所示。其中, SVC 可以输出多层码流(包括基本层和增强层),基本层的数据可以使解码器完全正常地解码出基本视频内容,但是基本层的数据获得的视频图像分辨率较低或者质量较低。当需要该区域的高清图像视频时,多个 IoT 节点可以通过增强层协作传输的方式来增强其他节点的视频质量,从而满足不同的业务需求。此

外,当节点自身能量不足时,可以通过协作 SVC 将增强层内容传输到其他节点,帮助其上传数据。

4 数值分析

为验证所提“端—边—云”协同算法的有效性,本文采用 MATLAB 对所提算法进行验证。

时延随任务数量的变化如图 7 所示,随着任务数量的增加,本文所提“端—边—云”协同算法与“边—云”算法,两种机制平均时延呈现出逐步上升趋势。其中,“端—边—云”协同算法相比“边—云”协同算法数据投递平均时延更低。这是由于终端处于边缘网络的末端,处理数据所需要的时间短。然而,其计算能力有限,需要结合“边—云”协同计算才能相辅相成、各显所长,与此同时,边缘网络需要充分挖掘网络中边缘终端的计算能力,在边缘终端处执行部分计算或全部计算,从而降低边缘端和云端的计算负载以及能量消耗。

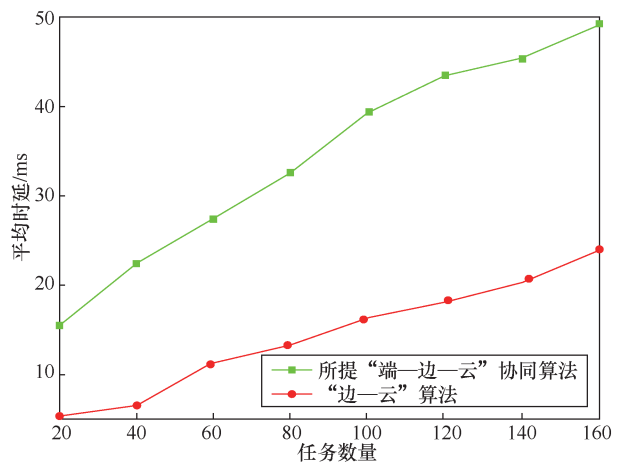


图 7 时延随任务数量的变化

能耗随任务数量的变化如图8所示,随着任务数量的增加,本文所提“端—边—云”协同算法与“边—云”算法,两种机制的能耗均逐渐增大。其中,“端—边—云”协同算法相比“边—云”协同算法能量消耗更低。这是由于“端—边—云”协同计算极大地提高了整个系统中资源的最大使用效率和传输效率,使得整个网络的能量消耗降低了。

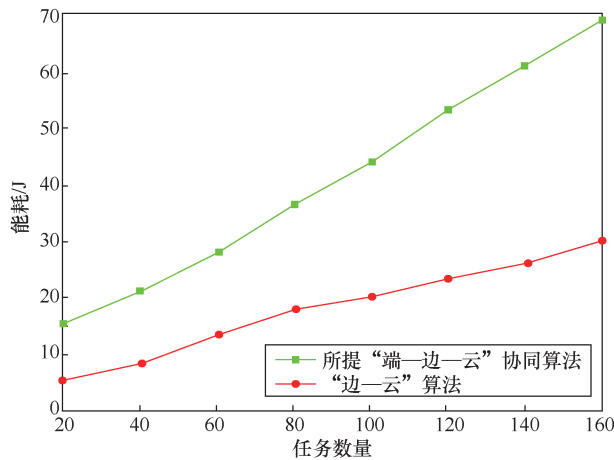


图8 能耗随任务数量的变化

5 结束语

智慧 IoT 不仅将渗透到智能交通、智能城市、环境保护、节能减排、公共安全、智能家居等领域,还将极大地推动经济发展,成为新的经济增长点。但智慧 IoT 对接入网络的时延性能和计算能力要求较高。而对边缘和终端进行数据处理能保证更短的响应时间和更高的可靠性,使得服务可以从云端移至网络边缘,加强 IoT 业务的实时性。因此,“端—边—云”协同的网络结构为智慧 IoT 的发展带来了新的机遇和挑战。然而,目前相关领域的研究较为有限,“端—边—云”协同的智慧物联网的关键技术还有待深入研究,以下是对边缘驱动下智慧 IoT 的展望。

5.1 知识为中心的边缘

MEC 有效地解决了 5G 移动网络中计算能力有限的问题,因而得到了业界的广泛关注。目前,关于边缘驱动的智慧物联网的研究有很多,例如,智慧城市、智能制造、智能交通及智能家居等,但是边缘网络还不够智能,缺乏知识的引导。为了动态和智能地管理边缘网络,应在边缘网络中引入知识层,构成以知识为中心的边缘(KCE, knowledge-centric edge)。首先,物理层通过边缘

节点收集数据,KCE 服务器可以通过对收集数据的分析和学习,进而使用新的知识来控制物理层资源,例如通过机器学习、社交计算等智能计算获取新的知识。

5.2 边缘驱动下的物联网搜索

随着物联网的普及和发展,物联网搜索是摆在学术界和工业界面前迫切需要解决的问题,因此物联网搜索成为当前的一个研究热点。用户通过蜂窝移动终端与基站服务器互联,可实现对物理空间中智慧实体的搜索。实体的时空状态动态变化,对实体搜索的实时性、可靠性、智能性提出了较高要求。边缘驱动下的物联网搜索将搜索任务迁移到网络边缘节点,可降低实体搜索任务的响应时延并缩短边缘搜索服务器与移动设备的距离,提高搜索服务器的搜索效能。此外,实体的知识体系构建、知识索引存储、搜索任务响应为移动边缘搜索的核心技术,其设计合理性直接关系到实体的搜索效能。

参考文献:

- [1] 孙玉. 我国物联网产业发展趋势[J]. 物联网学报, 2017, 1(3):1-5.
SUN Y. Development trend of IoT industry in China[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3):1-5.
- [2] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [3] AL-FUQAHA A, KHREISHAH A, GUIZANI M, et al. Toward better horizontal integration among IoT services[J]. IEEE Communications Magazines, 2016, 53(9): 72-79.
- [4] AMADE A, CAMPOLO C, QUEVEDO, et al. Information centric networking for the Internet of things: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2016, 30(2):92-100.
- [5] ZANELLA A, BUI N, CASTELLANI A, et al. Internet of things for smart cities[J]. IEEE Internet Things Journal, 2014, 1(1):22-32.
- [6] TSAI C W, LAI C F, CHIANG M C, et al. Data mining for Internet of things: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 77-97.
- [7] MIORANDI D, SICARI S, PELLEGRINI F D, et al. Internet of things: vision, applications and research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(7):1497-1516.
- [8] BANDYOPADHYAY D, SEN J. Internet of things: applications and challenges in technology and standardization[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 58(1): 49-69.
- [9] DOMINGO M C. An overview of the Internet of things for people with disabilities[J]. Journal of Networks & Computer Applications, 2012, 35(2):584-596.
- [10] WANG R, YAN J, WU D, et al. Knowledge centric edge computing based on virtualized D2D communication systems[J]. IEEE Communication Magazine, 2018, 56(5): 32-38.
- [11] ZHANG K, LENG S, HE Y, et al. Mobile edge computing and networking for green and low-latency Internet of things[J]. IEEE Com-

munications Magazine, 2018, 56(5): 39-45.

- [12] GUSEV M, DUSTDAR S. Going back to the roots the evolution of edge computing, an IoT perspective[J]. IEEE Internet Computing, 2018, 22(2): 5-15.
- [13] FAN Q, ANSARI N. Application aware workload allocation for edge computing-based IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(3): 2146-2153.

[作者简介]



吴大鹏（1979-），男，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为泛在无线网络、无线网络服务质量管理等。



张普宁（1988-），男，博士，重庆邮电大学讲师，主要研究方向为物联网、边缘计算技术研究。



王汝言（1969-），男，博士，重庆邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为泛在网络、全光网络理论与技术、多媒体信息处理等。