

面向空天地一体化信息网络的边缘计算资源融合管理方法

徐晓斌¹⁾ 王琪¹⁾ 范存群²⁾ 梁中军³⁾ 薛依琪²⁾ 王尚广⁴⁾

¹⁾(北京工业大学信息学部, 北京 100124)

²⁾(国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心)卫星数据与资源室, 北京 100081)

³⁾(国家气象信息中心信息安全室, 北京 100081)

⁴⁾(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 随着空天地一体化信息网络的建设和发展,无线网络的全球无缝覆盖与泛在的人工智能成为了可能.卫星与无人机作为天基边缘计算节点,辅助地面设备完成各项任务,成为6G网络中的重要应用场景.当前针对卫星、无人机边缘计算的研究处于起步阶段,这些研究在边缘计算服务模式及实际应用方面仍有待进一步深入.单个卫星或无人机的计算能力薄弱,通常难于独立提供较复杂的数据处理服务.现有资源管理算法通常需要多轮博弈才能收敛,难于满足空天地一体化场景中资源管理方法快速收敛的需求.针对以上挑战,本文在天算星座边缘计算服务场景基础上,对空天地一体化网络中天基资源的服务模式进行了分析,提出了组合及聚合两种计算服务融合方式.本文将天基边缘计算资源的管理建模为两阶段的斯坦科尔伯格博弈模型,提出了分布式混合动态迭代算法与分布式分组动态迭代算法,加快了博弈过程的收敛速度.本文基于分布式场景构建了仿真实验,并在典型参数设置下对算法性能进行了分析.仿真实验结果表明:在两种不同服务模式下,本文提出的方法能够使空中边缘计算节点与用户设备获得最大收益;相比近年相关研究,本文所提方法的收敛时间能够缩短60%以上.

关键词 6G网络;空天地一体化信息网络;边缘计算;计算服务融合;资源管理;斯坦科尔伯格博弈

中图法分类号 TP393 DOI号 10.11897/SP.J.1016.2023.00690

An Aggregated Edge Computing Resource Management Method for Space-Air-Ground Integrated Information Networks

XU Xiao-Bin¹⁾ WANG Qi¹⁾ FAN Cun-Qun²⁾ LIANG Zhong-Jun³⁾

XUE Yi-Qi²⁾ WANG Shang-Guang⁴⁾

¹⁾(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

²⁾(Satellite Data and Resources Department, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather) Beijing 100081)

³⁾(Information Security Department, National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

⁴⁾(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract With the construction and development of space-air-ground integrated information networks, the global coverage of wireless networks and ubiquitous artificial intelligence have become possible. As space-based edge computing nodes, satellites and UAVs can assist ground

收稿日期:2021-11-19;在线发布日期:2022-11-05. 本课题得到北京市自然科学基金项目(No. L212032),国家自然科学基金项目(No. 62032003, No. 61922017)资助. 本文所述工作在天算星座(www.tiansuan.org.cn)所提供的边缘计算平台基础上开展研究. 徐晓斌, 博士,副教授,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究领域为天地一体化信息网络、物联网、移动边缘计算. E-mail: xuxiaobin@bjut.edu.cn. 王琪, 硕士研究生,主要研究领域为天地一体化信息网络、物联网、移动边缘计算. 范存群(通信作者), 博士,高级工程师,主要研究领域为卫星数据处理、遥感数据服务. E-mail: fancq@cma.gov.cn. 梁中军, 博士,正研级高级工程师,主要研究领域为云计算、大数据管理. 薛依琪, 硕士,工程师,主要研究领域为异构融合网络、移动边缘计算. 王尚广, 博士,教授,主要研究领域为服务计算、6G网络、移动边缘计算.

servers to complete various tasks. These applications become important application scenarios in 6G networks. The current research on satellite and UAV edge computing is in the initial stage. Edge computing services provided by satellites and UAVs still need deep analysis and detailed modeling in terms of service modes and practical applications. Since computing hardware of satellites and UAVs is scarce and expensive, one single node usually difficult to provide complex data processing services independently. Existing resource management algorithms for satellites and UAVs focus on the full utilization of hardware resources. These algorithms usually require multiple rounds to converge the optimal solution. In the distributed scenario of space-air-ground integrated network applications, these algorithms are difficult to meet the requirements of rapid convergence. To solve the above problems, this paper focuses on the integration of multi-node resources and efficient resource management methods based on the distributed scenario of space-based edge computing. Based on the satellite computing capability of Tiansuan constellation, this paper analyzes the service mode of space-based resources in the space-air-ground integrated networks. Two modes of computing service integration named composition and aggregation are proposed. According to these two service integration modes, this paper present general computing tasks and special computing tasks. To accomplish these tasks, computing resource management are described as two types of service renting. Based on practical application scenarios, we model these service rent processes as two-stage Stackelberg games and establish the utility functions of user devices and edge nodes. We analyze the Stackelberg games of two types of renting services and prove the existence of Nash equilibrium. To solve the slow converges problem in the existing two-stage dynamic iterative algorithm, we propose two distributed algorithms. One is distributed hybrid dynamic iterative algorithm and the other is distributed grouping dynamic iterative algorithm. These algorithms only need one stage of dynamic iteration to obtain the optimal pricing scheme of edge computing resources and the optimal resource renting strategy of user devices. The proposed algorithms aim to reduce the number of iterations between edge computing nodes and user equipments. Less iterations will speed up the convergence speed of the game process. To verify the performance of the proposed method, this paper constructs a simulation experiment based on distributed scenarios. Under the setting of typical parameters, we analyze the resource allocation results, the utility of user devices and edge nodes, and the convergence speed of the algorithm. The simulation results show that the proposed method can achieve the optimal allocation of space-based edge computing resources, and enhance the applicability of the algorithm in real space-air-ground integrated information network scenarios. Under two different computing service modes, the proposed method can maximize the benefits of edge computing service providers and consumers; Compared with the related research in recent years, the convergence time of the proposed method can be reduced by more than 60%.

Keywords 6G networks; space-air-ground integrated information networks; edge computing; computing service integration; resource management; Stackelberg game

1 引言

近年来,信息和通信技术高速发展,移动网络取得了重大突破.在第五代移动通信技术(the 5th generation mobile networks,简称5G)商用即将满一年、商用范围逐步扩大的情况下,国际电信联盟

(International Telecommunication Union,简称ITU)于2020年2月启动了第六代移动通信技术(the 6th generation mobile networks,简称6G)的研究.关于6G网络,国内外许多研究者提出了各自的愿景^[1-4].在这些愿景中,6G网络有两大重要演进方向:在网络的覆盖方面,地面无线网络将与卫星网络、近地无人机网络全面融合,构建一个无线信号全覆盖,无线

网络全连接的世界^[1]. 在网络应用方面,6G将提供无处不在的人工智能与服务^[3]. 为了实现6G网络在这两个方向的演进,空天地一体化网络与边缘计算^[5]成为了近年来研究的热点.

卫星及无人机既可以在地面网络不可达的环境下,为用户设备提供网络服务^[6];又能够在地面网络较差的情况下,辅助地面网络提供网络能力的扩展^[7]. 卫星和无人机与用户设备的距离相对较近,随着卫星与无人机计算能力的增强,传输技术的完善与发展,卫星与无人机的应用越来越广泛. 在传统的通信、导航、遥感应用之外,以提供算力为主的天算星座开始建设^[8],这也催生出了天基边缘计算这一新的研究方向^[9]. 作为云计算的有效补充,边缘计算是近年来近端云计算的主要形式^[10]. 将卫星作为边缘计算节点提供边缘计算服务^[11-15],将无人机应用于物联网场景中提供边缘计算服务^[16-18]均成为当前研究的热点. 在这些研究中,卫星及无人机有限的硬件能力,不稳定的运行环境,是限制应用发展的主要瓶颈. 卫星与无人机两类天基设备的融合^[19-21],也成为当前天基网络应用的重要发展方向.

天基边缘计算在6G网络应用中的主要难题包括以下两个方面:(1)从应用层面看,当前6G网络的研究仍处于起步阶段,卫星及无人机如何提供边缘服务,如何进行资源融合,仍缺乏具体的应用场景;(2)从资源管理层面看,受限於应用场景的缺失,空天地计算资源的融合管理问题尚不存在较为完整的模型,研究有待进一步完善.

围绕这些难题,本文在天算星座所提供的卫星边缘计算框架基础上,提出6G网络中天基边缘计算的应用场景:卫星和无人机等天基资源由天基网络运营商进行运营,这些节点除了具备数据传输能力之外,还具备一定计算能力,可以为用户设备提供边缘计算服务. 在地基网络不可达的区域或者地面网络能力不足的场景中,用户设备可以通过租赁边缘计算服务,将自身计算任务委托给天基边缘节点进行. 当单个天基节点受覆盖范围或计算能力限制,不足以独立完成地面用户设备所需要的计算任务时,将由多个天基节点联合为用户设备提供服务. 围绕这一场景,本文重点针对空天地一体化信息网络中边缘计算资源的融合管理方法进行研究.

当前针对卫星、无人机的资源管理及优化配置方面已经有学者开始研究,并提出了许多有价值的方法. 然而这些研究在以下几个方面有待进一步深化:(1)对天基边缘节点所能提供的应用及服务模式

的研究有待进一步加深;(2)针对复杂应用中多节点的联合服务场景及资源的融合管理方面的研究有待加深;(3)在天基网络传输时延高、可靠性低的场景中,基于多轮博弈的资源管理算法在收敛速度方面有待进一步提升.

针对以上三个方面的问题,本文以6G场景中的天基边缘计算场景作为出发点,重点针对多节点资源的融合以及高效的资源管理方法开展了研究. 本文的主要贡献如下:

(1)对空天地一体化信息网络的应用场景进行了分析,提出了天基计算资源组合与聚合两种资源融合服务模式;在这两种服务模式基础上,将计算资源的租赁过程分为通用服务租赁与专用服务租赁两种情况,将服务租赁过程建模为两阶段的斯坦科尔伯格博弈模型.

(2)对两种类型服务租赁的斯坦科尔伯格博弈模型进行了分析,证明了其纳什均衡点的存在;针对当前基于斯坦科尔伯格博弈的资源管理方法中两阶段动态迭代算法收敛速度过慢的问题,提出了分布式混合动态迭代算法与分布式分组动态迭代算法,以上两种算法仅需一个阶段的动态迭代即可得到边缘计算资源最优定价方案以及用户设备的最佳资源租赁策略,使迭代次数大幅降低,更加适用于实际场景,加快收敛速度.

(3)围绕6G网络中天基资源租赁的场景设计了资源管理的过程. 在场景模拟的基础上进行了仿真实验,并对本文所提出方法在资源分配结果、用户设备及边缘节点效用、算法收敛速度等方面进行了分析. 与当前已有资源分配方法进行了对比,证明了算法在收敛速度及效率方面的提升. 通过不同参数的设置,对算法的特性进行了进一步讨论.

本文其余部分内容如下,第2节重点对6G天基边缘计算的场景进行了分析,提出了空天地一体化资源的两种融合模式,第3节提出了6G网络中空天地一体化边缘计算租赁的场景,进而建立了空天地一体化计算资源融合管理的问题模型,第4节给出了求解最优资源管理策略的方法,第5节进行了仿真实验,第6节描述了卫星资源管理的相关研究,第7节总结全文.

2 空天地一体化计算资源融合模式

2.1 6G网络中空天地一体化边缘计算场景分析

空天地一体化信息网络通常以高轨卫星作为天

基骨干网,以低轨卫星作为天基接入网或者天基用户设备.其中,无人机既可以作为天基接入网或地面网络的延伸为地面终端提供网络服务,又可以作为空基用户设备,访问天基网络资源.空天地一体化信息网络总体框架如图1所示:

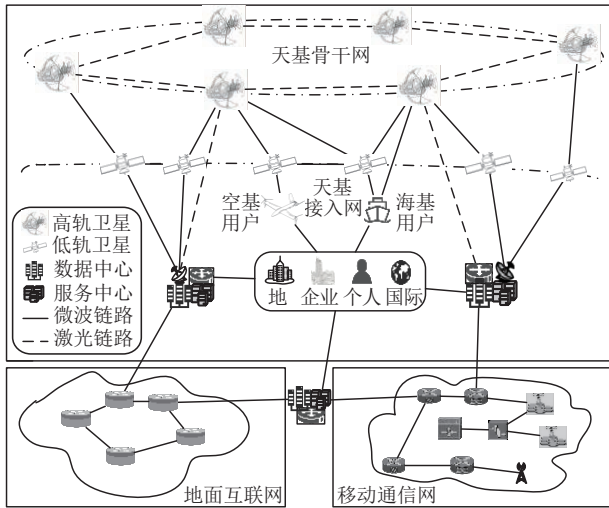


图1 空天地一体化信息网络总体架构图

空天地一体化信息网络可以为地面多种类型的终端提供无处不在的网络覆盖.在此基础上,6G网络还需要为地面移动终端提供无处不在的智能服务.这些服务的核心是多种多样的数据处理算法.在地面网络不可达的区域以及地面基站损坏或能力不足的场景中,卫星及无人机等空中节点作为边缘服务器为终端提供智能的计算服务是6G网络的重要需求.Mao等人提出了6G网络中天基物联网等应用场景^[21],并设计了卫星作为中继接入地面云平台,无人机作为边缘节点向地面设备提供边缘计算服务的场景.文献中同时也提到了节点移动性所带来的服务持续性与边缘节点算力的挑战.这一研究为本文的场景设计提供了重要的参考.本文在此基础上,针对节点的移动性与算力不足的问题,重点面向多节点联合向地面用户设备提供边缘计算服务的场景,提出了6G网络中天基边缘计算的两种典型应用形式:

(1) 天基边缘计算节点作为地面网络的辅助,提供通用的计算能力.现有的地面网络很难在沙漠,海洋等地面网络不可达的区域进行工作,地震、海啸等突发情况也可能导致地面网络系统的瘫痪.面向地基网络不可达的区域或者地面网络能力不足的场景,卫星及无人机可以作为地面网络的补充,为地面设备提供通用的计算服务,辅助其完成复

杂的运算任务.这一应用模式适用于恶劣条件下用户设备运算能力不足,需要天基设施辅助的情况,例如卫星辅助无人机进行环境侦察的场景.

(2) 天基边缘计算节点作为服务的直接提供者利用其独有的数据或运算能力,提供专用的计算服务.这一应用模式适用于多个天基设施联合完成任务的情况,例如多个低轨卫星或无人机提供持续的目标监测服务.在这一场景中,低轨卫星所拍摄的高分遥感图像及遥感图像分割算法,无人机的航拍图像及物品识别算法是天基边缘计算所特有的数据及算法.天基边缘计算节点可以基于自身所特有的数据及算法,共同提供专用的计算服务.这种策略既可以减少传输的能耗,也可以减少数据终端的负担.

在以上两个典型场景中,用户设备均需要天基边缘计算资源的支撑.由于单个卫星或无人机计算能力有限,考虑到需要多个边缘服务器计算资源的情况,本文提出了聚合和组合两种计算资源融合方式,并给出其定义.两种方式如图2所示.

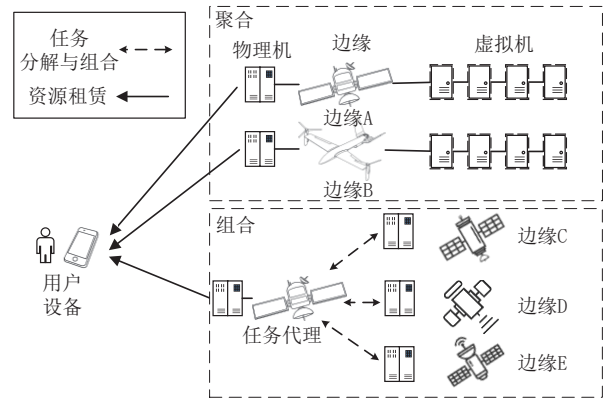


图2 空天地一体化边缘计算资源聚合和组合示意图

定义1. 空天地一体化边缘计算资源聚合. 卫星、无人机等天基设备搭建相同的基础计算平台,基于相同的接口标准提供无差别的边缘计算算力;用户设备根据边缘计算资源的需求,自行选择一个或多个天基边缘节点,租赁边缘计算算力并进行任务的分配;天基边缘节点总算力达到用户设备需求,即可完成边缘服务.这种边缘计算资源的融合方式称为边缘计算资源聚合.

定义2. 空天地一体化边缘计算资源组合. 卫星、无人机等天基设备围绕各自特有的数据或算法,基于相同的接口标准提供各不相同的边缘计算服务;用户设备根据实际应用的需求,选择相应的任务代理,租赁边缘计算服务;天基任务代理根据用户的

边缘计算需求,进行任务的分配与汇总,向用户设备交付边缘计算结果.这种边缘计算资源的融合方式称为边缘计算资源组合.

空天地一体化场景中,卫星及无人机均可向地面用户设备提供服务,且同样需要面临算力不足,移动性强,链路不可靠等情况.为此本文所提出的边缘计算资源融合方法,可以基于卫星及无人机两类天基设备,在应用层面建立较为普适的模型.不同的应用场景通过不同的网络参数进行区分.

在边缘计算资源组合模式中,选择任务代理统一接收用户请求是由于天基设备通常相对地面具有较强的移动性,而天基设备之间相对位置往往较为稳定,可以维持较为稳定的链路.例如同轨道面的低轨卫星之间,或者同一集群内的无人机之间.因此可以将与用户设备通信条件最好的节点作为任务代理,接收资源租赁请求,并在集群内部进行任务的分配.任务代理既可以是卫星,也可以是无人机,由实际的应用场景决定.

2.2 空天地一体化边缘计算资源聚合

空天地一体化边缘计算资源的聚合为用户设备提供通用的边缘计算服务.参考天算星座中的卫星边缘计算框架,空天地一体化边缘计算资源的聚合需要如下支撑:

(1) 硬件层面:卫星及无人机节点中应搭载一定的计算硬件,具备一定的计算能力.

(2) 平台层面:构建轻量级5G核心网网元,至少应具备其中的用户面功能(User Plane Function, UPF)网元,从而可以将数据分流至边缘计算平台.在边缘计算平台中提供虚拟机及容器管理平台,从而支持以虚拟机或容器为基本单位的资源分配.

(3) 软件层面:提供通用的虚拟机租赁服务,提供跨节点的虚拟机分配、管理等功能.

边缘计算资源聚合模式的核心是为用户设备提供计算能力的租赁、调度及管理.每一个边缘服务均提供通用计算任务,服务之间并不进行协调及功能组合.当用户设备所需计算任务量较大,单个边缘计算节点不能满足计算需求时,用户设备可以自行将任务进行分解,并向多个通用边缘计算节点租赁虚拟机.用户设备只需保证总的计算能力满足其应用需求,即可完成所需计算任务.

将空天地一体化边缘计算资源的管理与地面边缘计算场景相对应,聚合模式相当于在平台即服务(Platform as a Service,简称PaaS)层面提供计算平台的租赁,用户可以以虚拟机或者容器为单位进行

计算资源的租赁.单个边缘计算节点能提供的计算资源有其上限,该上限由边缘计算节点硬件所能提供的算力上限决定.

2.3 空天地一体化边缘计算资源组合

空天地一体化边缘计算资源组合为用户设备提供专用的计算服务,需要具备如下支撑:

(1) 硬件层面:每个边缘节点均需搭载一定的感知、计算、传输硬件,具备数据的采集、处理与传输能力.

(2) 平台层面:除了基本的边缘服务平台之外,还提供面向专用边缘服务的任务处理功能模块,支持任务的接收与管理.

(3) 软件层面:提供面向专用边缘服务的任务管理、数据切割、子任务划分、结果组合等功能.

由于单个天基边缘计算节点计算能力有限,且具有一定的移动性.而图像处理通常需要消耗较多的计算资源与较长的时间.若多个天基边缘计算节点之间需要进行协作,需要预先将一个任务分解为若干个子任务,由各个边缘节点协作完成.遥感图像和航拍图像具有不可替代性,此时天基边缘计算节点所提供的计算能力也具备不可替代性,卫星或无人机均需按照预设的任务,执行各自的操作.

将空天地一体化边缘计算资源的管理与地面边缘计算场景相对应,组合模式相当于在软件即服务(Software as a Service,简称SaaS)层面向用户设备提供面向遥感图像或航拍图像的应用.当应用涉及到多个边缘节点时,其协作方式与协作过程由软件预设,用户设备只需直接租赁云软件即可.

3 天基边缘计算资源融合管理模型

3.1 天基边缘计算资源租赁场景

在未来6G场景中,天基边缘计算由天基网络运营商负责管理.运营商提供计算资源的租赁业务,在用户设备可接受的开支范围内实现利润最大化.用户设备租赁天基边缘计算服务,并在满足计算需求的前提下达到效益的最大化.

未来6G网络中,服务的注册与发现是泛在智能边缘服务的前提.本文提出6G网络中需要具备多个服务注册中心.通用计算边缘节点和专用计算任务代理将各自的服务在服务注册中心进行发布.考虑到服务注册中心未必实时可达,用户设备同样需要在本地维护服务列表,用于根据服务需求发现天基边缘服务.用户设备在网络情况良好的情况

下,将定期与服务注册中心进行信息交互,用于更新服务列表.在此基础上,边缘计算资源的租赁过程如图3所示,具体过程如下:

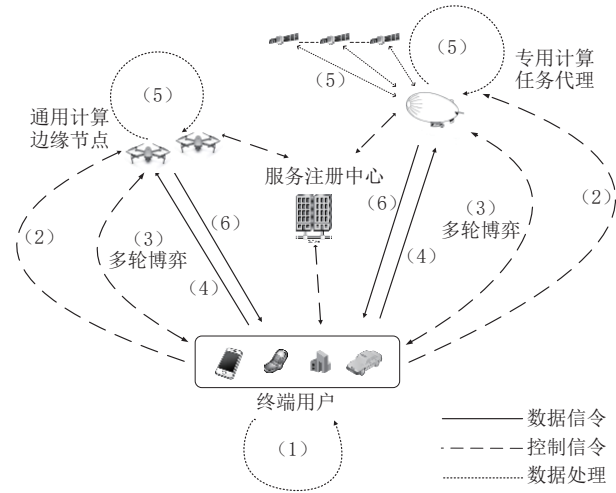


图3 空天地一体化边缘计算资源租赁场景

(1) 分析边缘服务需求:每个用户设备中都维护一个服务列表,用于记录所有计算服务的类型及所在的位置.当服务请求到来时,用户设备首先需要判断所需要的服务是通用计算任务还是专用计算任务,进而查找能够满足服务需求的天基边缘服务.

(2) 发送请求给天基边缘计算节点:对于通用的计算任务,用户设备可以根据自身计算资源的需求,向不同的边缘服务器租赁资源;对于专用的计算任务,用户设备需要先将计算请求发送给任务代理,任务代理对具体任务进行分配.

(3) 服务提供方与使用者之间的定价博弈:对于通用的计算任务,每个提供通用计算服务的节点将和用户设备进行直接博弈.服务节点给出计算资源的定价,用户设备根据定价决定卸载任务量.服务节点根据当前的利润情况调整定价,用户设备根据定价改变租赁策略.经过多轮博弈后,双方得到最终策略.对于专用的计算任务,将由任务代理与用户设备进行博弈.双方轮流做出决策,经过多轮博弈后,代理运营商确定最终的资源定价,用户设备则确定最终的计算资源租赁策略.

(4) 用户设备发送数据:对于通用的计算任务,用户设备根据任务需求对原始数据进行分解,并把分解后的原始数据发给多个通用计算边缘节点;对于专用的计算任务,用户设备把所有原始数据发给专用计算任务代理.

(5) 计算任务处理:针对通用的计算任务,每个天基边缘计算节点独立完成计算任务;针对专用的计算任务,任务代理需要对任务进行分解,分解后按部分下发给多个节点进行运算,节点协作完成计算任务,并将各自的运算结果返回给任务代理,由任务代理进行汇总,得到最终运算结果.

(6) 返回结果:天基设备完成计算任务后,将结果返还给地面用户设备.

3.2 基于斯坦科尔伯格博弈的天基边缘计算资源管理

空天地一体化边缘计算资源租赁场景中,用户设备可以租赁天基边缘计算服务,将部分计算任务委托给天基边缘节点进行运算,从而节省自身计算资源开销.作为服务的提供者,卫星和无人机希望通过制定合适的价格,最大化地获取利润;作为服务的使用者,用户设备希望通过租赁合适的计算资源,从而使自身效用最大化.天基边缘计算资源管理的核心是一个双方多阶段的博弈过程.其中,服务的提供者拥有强势地位,称为领导者,可以首先设定服务的价格.服务的使用者称为追随者,需要根据服务的价格决定计算资源租赁策略.这一过程是一个典型的斯坦科尔伯格博弈过程.

当前对卫星资源管理的研究中,斯坦科尔伯格博弈也是其中最常被用到的模型之一.文献[22-25]均采用斯坦科尔伯格博弈模型,对卫星资源进行管理.资源分配的过程其实是一个博弈双方谋求最大效用,最终达到纳什均衡状态的过程.斯坦科尔伯格博弈模型表示为: $SG = \{EN, UE, G, F, P, Q\}$.其中, EN, UE 分别表示服务的提供者及消费者, G, F 分别表示提供者及消费者的效用函数, P, Q 分别表示服务提供者的定价策略和服务消费者的资源租赁策略.其中资源租赁策略 Q 表示服务消费者租赁服务进行处理的数据量,定价策略 P 则表示租赁服务处理单位数据量所需缴纳的费用.

在空天地一体化边缘计算场景中, $UE = \{1, 2, \dots, M\}$ 表示用户设备集合,用户设备总数量为 M 个.使用 $EN = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示边缘节点集合,边缘节点总数量为 N 个.天基边缘节点是服务的提供者,宣布将计算资源出售给用户设备的价格 P ,通过价格的设定,使其效用函数 G 达到最优.用户设备是服务的消费者,它们为边缘计算资源付费并从边缘节点接收计算服务,通过调节服务租赁策略 Q ,使其效用函数 F 达到最优.假设用户设备计

算资源租赁策略为 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_M\}$, 边缘节点计算资源定价集合为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$.

3.3 天基边缘计算资源租赁开销建模

地面边缘计算节点通常具有较强的算力, 通常1个边缘计算节点就可以支撑较大范围内所有用户设备所请求的边缘计算任务. 天基边缘计算节点通常算力较弱, 1个边缘计算任务需要多个边缘计算节点同时支撑的情况将成为常态. 这一特点使得边缘计算任务在进行计算卸载时需要选择多个边缘计算节点. 边缘计算资源的聚合由用户设备进行任务的切分与边缘计算节点的选择, 而边缘计算资源的组合由提供边缘服务的节点内部进行任务的切分与边缘计算节点的选择.

考虑空间中随机分布的多个边缘节点与多个用户设备的场景. 假设在这些边缘节点中存在跨节点的专用计算服务, 提供专用计算服务的边缘节点集合记作 $EG = \{eg_1, eg_2, \dots, eg_L\}$, 其中共有 L 个专用服务. 对于第 l 个服务, 共同提供专用服务的节点集合记作 $eg_l = \{en_{l_1}, \dots, en_{l_{n_l}}\}$, 其中, 对于任意 $1 \leq l_1 < l_2 \leq L$, $1 \leq k_1 \leq n_{l_1}$, $1 \leq k_2 \leq n_{l_2}$ $en_{l_1 k_1}, en_{l_2 k_2} \in EN$ 且 $en_{l_1 k_1} \neq en_{l_2 k_2}$. 假设边缘节点之间能够通过无线链路彼此通信. 对于通用计算服务, 每个用户设备中的任务可以卸载到边缘节点, 且设备只能同时与一个边缘节点通信. 对于需要多个节点协作的专用计算服务, 由一个代理直接与用户设备通信. 代理节点协调并控制节点集合内部的计算及传输过程. 根据空地一体化边缘计算资源的两种服务提供形式, 采取确定性边缘服务模式, 给出两种类型的边缘计算任务: 通用计算任务及专用计算任务. 两种类型任务的数学表示如下:

(1) 通用计算任务, 记作 $J_m = \{Q_m, T_m^{max}\}$, 其中 Q_m 代表传输到边缘节点的任务量. T_m^{max} 代表任务 J_m 可接受的最大时延. 在实际应用场景中, 天基节点的移动性往往导致网络拓扑及链路的不稳定. 可以将当前链路的持续时间作为 T_m^{max} 的取值. 天基边缘计算服务并不追求最小化时延, 只需在最大时延内交付边缘计算结果, 即可视作任务完成.

(2) 专用计算任务, 专用计算任务可以看作面向专用服务节点集合的计算任务. 其数学表示为: $SJ_m = \{SQ_m, ST_m^{max}\}$, 其中 SQ_m 代表租赁专用服务的任务量, ST_m^{max} 代表任务 SJ_m 可接受的最大时延.

本节对通用计算任务及专用计算任务的开销进

行建模, 计算任务的开销主要受边缘节点任务处理的时间影响, 最终所产生的开销则包括时延和能耗两个方面. 为了使模型在未来6G网络多样化的应用场景中具有更好的普适性, 本节将数据传输速率及信号发射功率作为模型最小单位, 不对网络拓扑及无线通信方式进行建模. 随着天基边缘计算场景的进一步细化完善, 数据传输速率及信号发射功率可以根据链路的实际情况进行更精细的建模计算. 更细致的建模最终表现为本文所提模型中网络参数的不同取值, 并不会影响现有模型.

通用计算任务的计算资源融合主要由用户设备进行实现. 用户设备选择一个边缘节点中的服务进行租赁, 租赁后如不能满足运算需求, 则可继续租赁其他边缘节点中的服务. 对通用计算任务开销建模如下:

(1) 处理时间. 边缘节点处理任务的时间受任务量的影响, 当前针对边缘计算的研究^[26]通常认为处理时间与任务量正相关. 对于任意边缘计算任务, 其处理时间为 $T_{mm}^c = \frac{\lambda_m Q_m}{C_n}$. 其中, λ_m 为第 m 个任务处理1字节数据的CPU周期数, 其取值由实际的处理算法决定^[27]. C_n 为边缘节点的计算能力.

(2) 时延. 用户设备一次卸载任务的全部时延可以表示为 $T_{mm} = T_{mm}^t + T_{mm}^q + T_{mm}^c$. 传输时延 T_{mm}^t 可以通过公式 $T_{mm}^t = \frac{Q_m}{r_{mm}}$ 进行计算, 其中 r_{mm} 代表天基边缘服务节点 n 为用户设备 m 所提供的数据传输速率, 具体数值由实际场景中的空地网络信道情况决定, 不同用户设备速率可能会有较大偏差. 排队时延可计算为: $T_{mm}^q = \frac{\lambda_m R Q_m}{C_n}$. 排队模型采取先来先服务的原则^[28], $R Q_m$ 表示当前天基边缘服务节点 n 还未运行任务的任务量.

(3) 能耗. 从用户设备 m 卸载到边缘节点 n 的传输能耗公式 $E_{mm}^t = \rho_{mm} T_{mm}^t$, ρ_{mm} 是用户设备传输功率, 受多样化应用场景、天基网络不稳定特性影响, 不同用户设备传输功率可能会有较大偏差. 由于数据接收的能耗远小于数据发送的能耗, 而边缘节点运算后计算结果的数据量很小, 因此本文仅考虑边缘节点的计算能耗. 任务 J_m 在边缘节点 n 的计算能耗公式为 $E_{mm}^c = \eta_n T_{mm}^c$, 其中 η_n 代表边缘节点 n 的能耗系数.

对于专用计算任务, 边缘计算资源的融合由任务代理进行管理. 其表现形式为, 任务代理接收资

源租赁请求,并根据需要对计算任务进行切分,分配给组内每一个边缘服务节点.因此,边缘服务的时延与能耗的计算与通用计算任务的区分主要体现为任务分配的开销.其开销建模如下:

(1) 处理时间.专用计算代理将任务分配给 k 个专用计算节点进行计算,数据量分配系数为 $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$, $\sum_{i=1}^k \omega_i = 1$, 则专用计算节点数据量分别为 $\{\omega_1 SQ_m, \omega_2 SQ_m, \dots, \omega_k SQ_m\}$. 对于任意边缘计算任务,其处理时间为 $ST_{mi}^c = \max \frac{\omega_i}{C_{mi}} \lambda_m SQ_m$, C_{mi} 代表第 i 个专用计算节点的计算能力.

(2) 时延.任务 SJ_m 从用户设备 m 卸载到专用计算任务代理 n ,专用计算任务的传输时延以及排队时延与通用计算任务的计算类似.专用计算任务的总时延可表示为 $ST_{mn} = ST_{mn}^t + ST_{mn}^c + ST_{mn}^g + ST_{mn}^a$. 传输时延计算为 $ST_{mn}^t = \frac{SQ_m}{r_{mn}}$, 若当前时隙边缘节点 n 还未运行任务的量为 RSQ_m , 则在时隙 τ 边缘节点中的剩余任务在边缘节点计算所花费的时延计算为 $ST_{mn}^g = \frac{\lambda_m RSQ_m}{C_n}$. 任务分配时延公式为: $ST_{mn}^a = \frac{SQ_m}{r_n}$, 其中 r_n 表示专用计算代理向其组内节点传输数据的速率,该速率由实际场景中的空天地网络信道情况决定.

(3) 能耗.对于专用计算任务,尽管能耗由多个节点共同承担,然而在计算成本时,仍需将所有能耗累加,统一考虑.专用计算任务中,用户设备进行卸载的能耗公式与通用计算任务相同.不同的是边缘节点的总能耗.使用 E_{mn}^s 表示边缘节点总能耗,则 $E_{mn}^s = E_{mn}^{sc} + E_{mn}^{sa}$, 其中, E_{mn}^{sc} 表示计算总能耗,其计算公式为 $E_{mn}^{sc} = \sum_{i=1}^k \eta_i ST_i^c$, η_i 表示第 i 个专用计算节点的能耗系数. ST_i^c 为第 i 个专用计算节点计算所需的时间,表示为 $ST_i^c = \frac{\omega_i}{C_{ni}} \lambda_m SQ_m$. E_{mn}^{sa} 表示任务分配总能耗,其计算公式为 $E_{mn}^{sa} = \rho_n ST_{mn}^a$, ρ_n 表示任务代理 n 的传输功率.

3.4 天基边缘计算资源管理模型

在面向空天地一体化网络的边缘计算应用场景中,天基边缘计算节点与用户设备之间的资源管理是一个斯坦科尔伯格博弈过程.天基边缘计算节点与用户设备的效用函数决定了资源分配结果.

在实际场景中,围绕本文第2节所提出的两种

计算资源融合方式,本文的边缘计算服务租赁过程同样可以分为通用计算服务租赁与专用计算服务租赁两种场景.

对于通用计算任务,本节模型中的服务提供者和消费者的效用函数如下:

(1) 用户设备的效用函数.参考文献[25, 29]中的建模方式,对用户设备 m , 其效用函数 $F_m(P_n, Q_m, Q_{-m})$ 建模为公式(1).

$$F_m(P_n, Q_m, Q_{-m}) = U_m - D_m - \zeta E_{mn}^t = a \ln(1 + Q_m) - P_n \times Q_m - \zeta \rho_{mm} \frac{Q_m}{r_{mm}} \quad (1)$$

其中 D_m 表示用户设备 m 的支付开销,计算为 $D_m = P_n \times Q_m$, P_n 为通用计算服务定价, Q_m 为通用计算任务数据量. ζ 是用户设备能耗的价格系数,用于确定传输能耗的成本权重. U_m 表示用户设备 m 的满意度,根据韦伯-费希纳定律,其计算采用对数函数. a 表示用户设备的满意度系数.

(2) 边缘节点的效用函数.对于边缘节点 n ,其效用函数等于收入减去自身的开销,即边缘节点的总效用值.公式表示为式(2).

$$G_n(P_n, Q_m) = \sum_{F(m,n)=1} (P_n \times Q_m - \xi E_{mn}^c) = \sum_{F(m,n)=1} \left(P_n \times Q_m - \xi \eta_n \frac{\lambda_m Q_m}{C_n} \right) \quad (2)$$

其中 ξ 是边缘节点能耗的价格系数,用于确定能耗的成本权重. $F(m, n) = 1$ 表示用户设备 m 选择天基边缘服务节点 n 进行计算任务的卸载.

对于专用计算任务,本节模型中的服务提供者和消费者的效用函数如下:

(1) 用户设备的效用函数.与通用计算任务中的用户设备效用函数类似,对于用户设备,边缘节点的评价通过对数函数的满意度来建模.对用户设备 m , 其效用函数 $F_m^s(P_n^s, SQ_m, SQ_{-m})$ 建模为公式(3).

$$F_m^s(P_n^s, SQ_m, SQ_{-m}) = U_m^s - D_m^s - \alpha E_{mn}^{st} \quad (3)$$

其中 D_m^s 表示用户设备 m 的支付开销,公式表示为 $D_m^s = P_n^s \times SQ_m$, P_n^s 为专用边缘计算服务定价, SQ_m 为专用计算任务数据量. α 是能耗的系数因子,用于确定传输能耗的成本权重. U_m^s 表示用户设备 m 的满意度,计算采用对数函数,如公式(4).

$$U_m^s = b \ln(1 + SQ_m) \quad (4)$$

其中 b 表示用户设备的满意度系数, SQ_m 表示用户设备 m 向专用计算任务代理申请的计算任务量.

综上,对任意用户设备 m ,效用函数 $F_m^s(P_n^s, SQ_m, SQ_{-m})$ 可以表示为公式(5)

$$F_m^s(P_n^s, SQ_m, SQ_{-m}) = U_m^s - D_m^s - \alpha E_{mm}^s = b \ln(1 + SQ_m) - P_n^s \times SQ_m - \alpha \rho_{mm} \frac{SQ_m}{r_{mm}} \quad (5)$$

(2) 边缘节点的效用函数. 对于边缘节点 n ,其效用函数等于利润减去自身的开销,公式表示为式(6).

$$G_n^s(P_n^s, SQ_m) = \sum_{F(m,n)=1} (P_n^s \times SQ_m - \beta E_{nn}^s) = \sum_{F(m,n)=1} \left(P_n^s \times SQ_m - \beta \left(\sum_{i=1}^k \eta_i \frac{\omega_i}{C_{ni}} \lambda_m SQ_m + \rho_n \frac{SQ_m}{r_n} \right) \right) \quad (6)$$

其中 β 是边缘节点总能耗的系数因子,用于确定传输能耗的成本权重.

无论是通用计算任务还是专用计算任务,边缘节点及用户设备所做决策的目的都是追求自身效用函数的最大化.

4 天基边缘计算资源融合管理策略

4.1 基于斯坦科尔伯格博弈的纳什均衡分析

上节中已给出边缘节点及用户设备效用函数的计算方法,本节将分析边缘节点和用户设备之间的斯坦科尔伯格博弈过程. 首先假设边缘节点与用户设备均可共享双方的完整信息,参考文献[25],本节对这一博弈过程进行纳什均衡分析.

首先对用户设备的效用函数进行分析,求公式(1)的一、二阶导数,得到公式(7)、(8).

$$\frac{\partial(F_m(P_n, Q_m, Q_{-m}))}{\partial Q_m} = \frac{a}{(1 + Q_m)} - P_n - \frac{\zeta \rho_{mm}}{r_{mm}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2(F_m(P_n, Q_m, Q_{-m}))}{\partial(Q_m)^2} = -\frac{a}{(1 + Q_m)^2} \quad (8)$$

由于 $a > 0$ 且 $(1 + Q_m)^2 > 0$,用户设备的效用函数是严格的凸函数,存在极大值. 令公式(7)数值等于零,此时方程等价于 Q_m 的一元一次方程,直接求解即可得到最优的计算资源租赁策略. 在3.3节建模得到的函数中,传输能耗和计算能耗与任务量正相关. 为了防止卫星、无人机能量耗尽,边缘节点需要对每一个用户设备的最大任务量做出约束,以确保边缘节点的能量不至于耗尽. 任务最大值记为 Q_{max} . 单个任务的最大值须确保任务在最大时延内交付,可得到如下约束:

$$\frac{Q_m}{r_{mm}} + \frac{\lambda_m R Q_m}{C_n} + \frac{\lambda_m Q_m}{C_n} \leq T_m^{max} \quad (9)$$

求解该公式,可得:

$$Q_m \leq \frac{r_{mm}(C_n T_m^{max} - \lambda_m R Q_m)}{C_n + r_{mm} \lambda_m} \quad (10)$$

$$\text{即, } Q_{max} = \frac{r_{mm}(C_n T_m^{max} - \lambda_m R Q_m)}{C_n + r_{mm} \lambda_m} \quad (11)$$

最终最优计算资源租赁策略可以表示为:

$$\begin{cases} Q_m^* = \frac{ar_{mm}}{r_{mm}P_n + \zeta\rho_{mm}} - 1 & \text{if } Q_m^* < Q_{max} \\ Q_m^* = Q_{max} & \text{if } Q_m^* \geq Q_{max} \end{cases} \quad (12)$$

当用户设备选择了最优的计算资源租赁策略时,可将公式(12)代入公式(1),边缘节点 n 的效用函数如公式(13)所示.

$$\begin{aligned} G_n(P_n, Q_m^*) &= \sum_{m=1}^M (P_n \times Q_m^* - \xi E_{nn}^c) \\ &= \sum_{F(m,n)=1} \left(\left(P_n - \xi \frac{\eta_n \lambda_m}{C_n} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\frac{ar_{mm}}{r_{mm}P_n + \zeta\rho_{mm}} - 1 \right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

在此基础上,对边缘节点的效用函数进行分析. 求公式(13)的一、二阶导数,得到式(14)(15).

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(G_n(P_n, Q_m^*))}{\partial P_n} \\ &= \sum_{F(m,n)=1} \left(\frac{ar_{mm}(\zeta C_n \rho_{mm} + \xi r_{mm} \eta_n \lambda_m)}{C_n(r_{mm}P_n + \zeta\rho_{mm})^2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2(G_n(P_n, Q_m^*))}{\partial(P_n)^2} \\ &= \sum_{F(m,n)=1} \frac{-2ar_{mm}^2(\zeta C_n \rho_{mm} + \xi r_{mm} \eta_n \lambda_m)}{C_n(P_n r_{mm} + \zeta\rho_{mm})^3} \end{aligned} \quad (15)$$

由于公式(12)中所有参数均大于0,因此效用函数的二阶导数小于0,边缘节点的效用函数是严格的凸函数,存在最大值.

由于在博弈中,边缘节点及用户设备均存在优势策略,该斯坦科尔伯格博弈存在纳什均衡点. 在天基边缘计算资源管理场景中,边缘节点及用户设备经过多轮博弈,最终可达到纳什均衡状态. 此时通用边缘计算节点给出了最佳定价,用户设备选择了最优计算资源租赁策略.

在专用计算任务中,用户设备的效用函数与通用计算任务的效用函数基本一致,因此用户设备存在最优专用计算资源租赁策略,且可以直接得出最优计算资源租赁策略公式,公式如下:

$$\begin{cases} SQ_m^* = \frac{br_{mm}}{r_{mm}P_n^s + \alpha\rho_{mm}} - 1 & \text{if } SQ_m^* < SQ_{max} \\ SQ_m^* = SQ_{max} & \text{if } SQ_m^* \geq SQ_{max} \end{cases} \quad (16)$$

求公式(6)边缘节点的效用函数的一、二阶导数,得到公式(17)(18).

$$\frac{\partial(G_n^s(P_n^s, SQ_m^*))}{\partial P_n^s} = \sum_{F(m,n)=1} \left[\frac{br_{mm} \left(r_n \alpha \rho_{mm} + \beta \rho_n r_{mm} + r_{mm} r_n \beta \sum_{i=1}^k \eta_i \frac{\omega_i \lambda_m}{C_{ni}} \right)}{r_n (r_{mm} P_n^s + \alpha \rho_{mm})^2} - 1 \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial^2(G_n^s(P_n^s, SQ_m^*))}{\partial (P_n^s)^2} = \sum_{F(m,n)=1} \frac{-2br_{mm}^2 \left(r_n \alpha \rho_{mm} + \beta \rho_n r_{mm} + r_{mm} r_n \beta \sum_{i=1}^k \eta_i \frac{\omega_i \lambda_m}{C_{ni}} \right)}{r_n (r_{mm} P_n^s + \alpha \rho_{mm})^3} \quad (18)$$

由于公式(18)中所有参数均大于0,因此效用函数的二阶导数小于0,是严格的凸函数,专用边缘计算节点存在最优定价策略. 综上,在专用计算资源租赁过程中,博弈双方同样可以达到纳什均衡状态,专用边缘计算节点给出最优定价,用户设备选择了最优资源租赁策略.

4.2 天基通用计算服务租赁场景下的资源优化方法

假设边缘节点可以提前获取所有用户设备的资源租赁策略,则边缘节点可以直接计算得到最优的定价策略,并给出定价,直接实现资源的优化分配. 然而在实际的资源租赁场景中,边缘节点不可能提前获取所有用户设备的资源租赁策略. 边缘节点每次进行定价,均需要至少一次交互,获取用户设备当前的资源租赁信息. 边缘节点与用户设备的博弈轮数,决定了双方信息交互的次数. 因而,博弈达到纳什均衡的时间取决于算法收敛至最优解所需的博弈轮数.

为了达成最优的任务量及资源定价,文献[25]在工业物联网场景中提出了一种两阶段动态迭代的方法. 即在服务的提供者与服务的使用者双方均对各自的策略进行动态迭代,直到达到纳什均衡,博弈双方的效用值达到最优. 这一方法在收敛速度方面尚存在不足. 在工业物联网场景中,用户设备和边缘节点距离通常较近,因而收敛速度对算法性能的影响并不明显. 然而在天基计算资源租赁场景中,

博弈双方通信时延长,传输不可靠. 当算法收敛速度过慢,博弈过程轮次较多时,博弈过程持续时间较长,甚至可能因关键信息缺失引起博弈失败,最终导致资源的浪费. 因此,如何提升算法收敛速度,降低博弈持续时间,成为天基边缘计算资源管理中的核心问题.

根据上节中定理1的证明过程可知,用户设备的效用值存在最优解,且该最优解可以根据用户设备本身的参数计算得到,具体见公式(12). 因此,当服务的提供者,即边缘节点给定了定价方案后,服务的使用者,即用户设备通过公式(12)计算得到用户设备在当前定价中的最优资源租赁策略,不再通过动态迭代的方式求解最优资源租赁策略.

对于边缘计算节点而言,求解最优定价方案过程为:令边缘节点效用函数的一阶导数等于零,得到如下方程.

$$\sum_{F(m,n)=1} \left(\frac{ar_{mm}(\zeta C_n \rho_{mm} + \xi r_{mm} \eta_n \lambda_m)}{C_n (r_{mm} P_n + \zeta \rho_{mm})^2} - 1 \right) = 0 \quad (19)$$

受空天地网络特性的影响,不同的用户设备向同一个边缘计算节点传输数据,传输速率与发射功率率会有较大的偏差. 这在模型中体现为 r_{mm}, ρ_{mm} 数值具有较大的偏差,不能进行近似合并. 当选择边缘节点的用户设备数量大于2时,等式(19)可以等价于 P_n 的一元多次方程,且最高次数大于4. 此时等式(19)难于直接求解,边缘计算节点需要通过动态迭代的方式使定价逐步趋近最优.

本节以提升收敛速度为目标,提出适用于实际的天基边缘计算资源管理场景的分布式混合动态迭代算法. 该算法在用户设备中直接计算得到租赁策略,在边缘计算节点中采取动态迭代方式得到最优定价. 相比两阶段动态迭代算法,分布式混合动态迭代算法仅需在边缘计算节点中进行动态迭代,用户设备可直接获得最优资源租赁策略,从而降低了迭代轮次,具有更快的收敛速度.

算法1给出了分布式混合动态迭代算法的伪代码. 在本算法中,计算资源租赁策略通过公式(12)直接计算得到,下一代价格则根据导数方向计算,使斯坦科尔伯格博弈模型逐渐逼近纳什均衡.

算法1. 分布式混合动态迭代算法.

任意通用计算服务边缘节点 n :

输入: 请求服务的用户设备集合 $UE_n = \{1, 2, \dots, M_n\}$, 步长 Δ , 最小迭代阈值 t , 租赁策略阈值 QT , 最大迭代轮数 R_{max} ;

输出: 最优定价 P_n^* ;
 初始化: 随机生成初始定价 P_n , 并广播;
 $Q_n = \{0, 0, \dots, 0\}, P_n' = P_n + t + 1, r = 0$;
WHILE 收到新的租赁策略 Q^* & & + + $r \leq R_{max}$
 IF $Max(|Q^* - Q|) > QT$
 WHILE $|P_n' - P_n| > t$
 $P_n = P_n'$;
 根据公式(14)计算 $\frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;
 $P_n' = P_n + \Delta \frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;
 END WHILE
 $Q = Q^*$;
 向用户设备广播定价 P_n' ;
END IF
END WHILE
 $P_n^* = P_n'$;
 向用户设备广播最优定价 P_n^* 并宣布资源分配结束;
RETURN P_n^* ;

任意用户设备 m :

输入: 价格阈值 PT ;

输出: 最优租赁策略 Q_m^* ;

初始化: $P = 0$;

WHILE 收到新的定价 P^*

IF $|P^* - P| > PT$

 根据公式(12)计算 Q_m^* ;

$P = P^*$;

END IF

END WHILE

向边缘服务节点发送租赁策略 Q_m^* ;

RETURN Q_m^* ;

在算法1执行过程中, 每轮博弈每个用户设备直接带入公式(12)即可计算得到租赁策略. 公式(12)的计算较简单, 仅包括基本的四则运算, 容易在用户设备中实现, 计算与存储开销均为 $O(1)$. 每轮博弈每个边缘节点需要多次迭代执行公式(14)中的计算过程. 公式(14)的计算较简单, 仅包括基本的四则运算, 容易在边缘节点中实现. 若 M_n 个用户设备租赁该边缘节点的资源, 则算法的空间复杂度为 $O(M_n)$, 若算法循环 k 轮后收敛, 则运算的时间复杂度为 $O(kM_n)$. 受限于天基设备的硬件能力, M_n 数量通常较小. 算法所需的空间开销较低. 算法收敛速度主要取决于步长设置, 合适的步长将有效降低算法的时间开销.

4.3 天基混合服务租赁场景下的资源优化方法

在混合服务租赁场景下, 请求中不仅存在通用

的计算任务, 也存在专用的计算任务. 在请求专用计算任务的网络场景下, 假设计算资源租赁应用中存在一个中心代理, 将边缘计算资源进行组合. 博弈模型中的每个参与者都将自己的信息传递给中心代理, 中心代理对任务进行分配, 协作完成任务, 最终求出最优的策略.

对于其中的专用计算服务而言, 虽然其中若干节点同时提供服务, 然而可以通过节点的归并, 使之成为一个虚拟节点, 之后建立斯坦科尔伯格博弈模型. 具体如下: 首先将边缘节点分为两组. $EN = \{GEN, SEN\}$. 其中 GEN, SEN 分别表示通用计算服务和专用计算服务中的边缘节点集合. 令每一组提供专用服务的节点集合合并, 每个节点集合成为一个虚拟边缘节点: $SEN_n = \{en_1, \dots, en_{N_g}\}$. 则边缘节点集合 $EN' = \{GEN_1, \dots, GEN_{N_g}, SEN_1, \dots, SEN_{N_g}\}$. 其中, N_g 为提供通用计算服务的边缘节点个数, N_s 为提供专用计算服务的虚拟节点数量. 混合服务租赁仍可建模为一个斯坦科尔伯格博弈模型.

与算法1类似, 本小节针对专用计算服务的租赁, 提出了一种分布式组合动态迭代算法, 并在算法2中给出伪代码.

算法2. 分布式组合动态迭代算法.

任意专用计算服务代理 n :

输入: 组内边缘节点集合 $SEN_n = \{en_1, \dots, en_{N_s}\}$, 组内计算

任务分配比例系数集合 $\Omega_n = \{\omega_1, \dots, \omega_{N_s}\}$, 请求服务的用户设备集合 $UE_n = \{1, 2, \dots, M_n\}$, 步长 Δ , 最小迭代阈值 t , 租赁策略阈值 QT , 最大迭代轮数 R_{max} ;

输出: 最优定价 P_n^* ;
 初始化: 随机生成初始定价 P_n , 并广播;
 $Q_n = \{0, 0, \dots, 0\}, P_n' = P_n + t + 1, r = 0$;
WHILE 收到新的租赁策略 Q^* & & + + $r \leq R_{max}$
 IF $|Q^* - Q| > QT$
 WHILE $|P_n' - P_n| > t$
 $P_n = P_n'$;
 根据公式(17)计算 $\frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;
 $P_n' = P_n + \Delta \frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;
 END WHILE
 $Q = Q^*$;
 向用户设备广播定价 P_n' ;
END IF
END WHILE
 $P_n^* = P_n'$;
 向用户设备广播最优定价 P_n^* 并宣布资源分配结束;

输出: 最优定价 P_n^* ;

初始化: 随机生成初始定价 P_n , 并广播;

$Q_n = \{0, 0, \dots, 0\}, P_n' = P_n + t + 1, r = 0$;

WHILE 收到新的租赁策略 Q^* & & + + $r \leq R_{max}$

IF $|Q^* - Q| > QT$

WHILE $|P_n' - P_n| > t$

$P_n = P_n'$;

 根据公式(17)计算 $\frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;

$P_n' = P_n + \Delta \frac{\partial G_n}{\partial P_n}$;

END WHILE

$Q = Q^*$;

 向用户设备广播定价 P_n' ;

END IF

END WHILE

$P_n^* = P_n'$;

向用户设备广播最优定价 P_n^* 并宣布资源分配结束;

```

FOR  $i = 1:N_n$ 
     $Q_i^* = \omega_i Q$ ;
    向组内编号为  $i$  的边缘节点发送组内分配任务量;
END FOR
RETURN  $P_n^*$ ;

```

任意用户设备 m :

输入: 价格阈值 PT ;

输出: 最优租赁策略 Q_m^* ;

初始化: $P = 0$;

WHILE 收到新的定价 P^*

IF $|P^* - P| > PT$

根据公式(16)计算 Q_m^*

$P = P^*$;

END IF

END WHILE

向边缘服务节点发送租赁策略 Q_m^* ;

RETURN Q_m^* ;

与算法1类似,算法2中用户设备每轮博弈计算与存储开销均为 $O(1)$. 边缘服务代理每轮博弈空间复杂度为 $O(M_n + N_n)$. 若算法循环 k 轮后收敛,则运算的时间复杂度为 $O(kM_n + N_n)$. 算法通过基本的加减乘除运算即可得出结果,能够在天基边缘节点及用户设备中实现. 算法收敛速度同样取决于步长,合适的步长将有效降低算法的时间开销.

本文所提出的两个算法适用于边缘计算节点与用户设备距离较远,交互时间较长,且状态变换较频繁的场景,例如无人机集群为灾区环境提供空中边缘服务,或天算星座为遥感卫星、飞行器等设备提供在轨边缘计算服务的场景. 集中式算法需要执行算法的节点具有全局状态信息. 卫星、无人机通常具有较强的移动性,因而本文所提出的算法难于通过集中式的方式求解.

5 仿真实验

为了验证本文所提出的资源管理方法的性能,本节设计了6G边缘计算中单一服务租赁与混合服务租赁两种场景,并构建了仿真实验. 之后在资源分配结果,系统效用,算法收敛性等三个方面对仿真实验结果进行了分析与讨论. 在算法收敛性的分析方面,本文设计与参考文献[25]中的两阶段动态迭代算法的对比实验,进一步说明了本文方法在实际场景中的有效性.

5.1 实验设计

本文实验场景如图4所示:3颗同轨道面的低轨卫星向地面用户设备提供遥感图像处理等专用计算服务. 目标区域设置一个高空平台作为服务代理,接受用户设备的计算任务请求. 同轨道面的低轨卫星协作完成任务,不直接与地面终端通信. 高空平台不仅可以通过Ka波段连接多颗卫星进行回程,而且还可以通过专用C波段与地面用户设备进行通信. 近地空间有三架无人机为地面用户设备提供通用计算服务. 本文所设计的仿真实验总时长为1小时,这段时间内,天基边缘计算节点与地面区域维持稳定的地空信道.

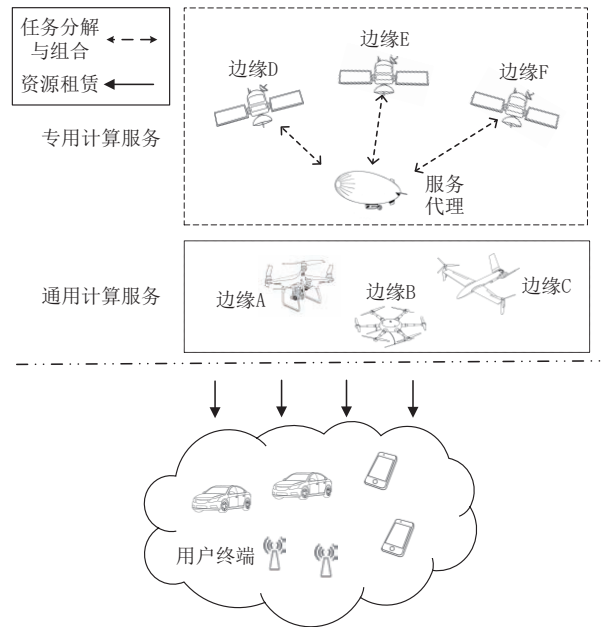


图4 仿真实验场景

基于以上基础设定,在MATLAB R2019b中建立模拟实验环境. 本文设置了两种场景,一种是只有通用计算服务的单一场景,一种是通用计算服务与专用计算服务并存的场景. 根据两种边缘计算场景,分别给出相关参数设置,如表1所示.

表1的参数设定中,通信、计算、能耗的相关参数主要参考了现有卫星及无人机应用中的硬件参数. 效用函数及算法中其他相关参数的设定主要参考了文献[5]、[30]、[31]. 基于以上参数设定,构建仿真实验,并对结果进行分析.

在对比实验的设计方面,由于本文所提出的应用场景与问题模型与现有方法均不相同,选择对比对象是重要的难点. 文献[25]应用场景及问题模型与本文均不相同,然而在求解纳什均衡时,文献

表1 服务租赁场景仿真实验参数表

服务类型	参数	符号	数值
单一/混合	通用任务用户设备满意系数	a	10
混合	专用任务用户设备满意系数	b	10
单一/混合	用户设备能耗价格系数	ζ	1
单一/混合	边缘节点能耗价格系数	ξ	1
单一/混合	初始计算资源租赁策略	Q_m	随机数,范围[1,2]
单一/混合	初始资源定价	P_n	随机数,范围[0,1]
单一/混合	单次搜索步长	α	0.03
单一/混合	最大迭代次数	t_{max}	20
混合	用户设备向卫星发送数据的功率	ρ_m	500 mW
混合	卫星间发送数据功率	ρ_n	200 mW
单一/混合	用户设备向无人机传输数据的功率	ρ_{mn}	100 mW
单一/混合	用户设备与边缘节点1轮交互时间	t_i	100 ms
混合	用户设备向卫星传输速率	r_m	100 Mbps
混合	卫星间节点传输数据速率	r_n	100 Mbps
单一/混合	地面向无人机传输数据的速率	r_{mn}	512 Mbps
混合	卫星节点的计算能力	C_s	5 GHz
单一/混合	无人机节点的计算能力	C_v	4 GHz
混合	卫星单元计算能耗	η_m	4 J/Hz
单一/混合	无人机单元计算能耗	η_n	3 J/Hz
单一/混合	CPU周期数/MB	λ_m	0.0003,0.001,0.002,0.006

[25]中提出了一种两阶段动态迭代算法,这与本文所提出的分布式组合动态迭代算法具有一定相似性.为此,我们在本文的应用场景与问题模型中复现了分布式两阶段动态迭代算法,用以求解最优的资源分配策略.由于两种算法最终均可以求出最优解,因此两种算法的资源分配与系统效用结果相同,其主要区别在于收敛性.因此本文从收敛性方面与文献[25]进行对比.

5.2 资源分配结果分析

第一部分仿真实验用以验证资源分配的结果,该结果主要包含两方面内容:(1)用户设备选择在边缘节点进行计算的任务量.我们对每一个用户设备的任务量 Q_m 分别进行记录,并计算每个边缘计算节点中用户设备任务量的总和,这一数值表示每个边缘计算节点所提供的边缘服务总量.(2)边缘节点的资源定价策略.这一数值表示边缘计算节点所提供的服务的价格,我们对每一个边缘计算节点所提供的服务的价格 P_n 分别进行记录,并展示结果.资源分配的结果可以用来分析边缘服务的能力、资源的价值、用户设备的资源租赁策略等,进而分析资源管理结果的合理性.

在单一服务租赁场景下,应用仅提供通用计算资源租赁服务,且每个通用边缘节点所提供的运算

服务类型不同.仿真实验参考文献[27]中的设定,选择不同类型服务的 λ_m 值.3架无人机向地面提供服务,地面有6个用户设备,同时向无人机申请通用计算资源.为了完整地展示算法本身的收敛情况,在这组实验中,不设定用户设备申请计算资源的范围,也不设定计算任务的时延要求.用户设备计算资源租赁策略结果如图5所示.

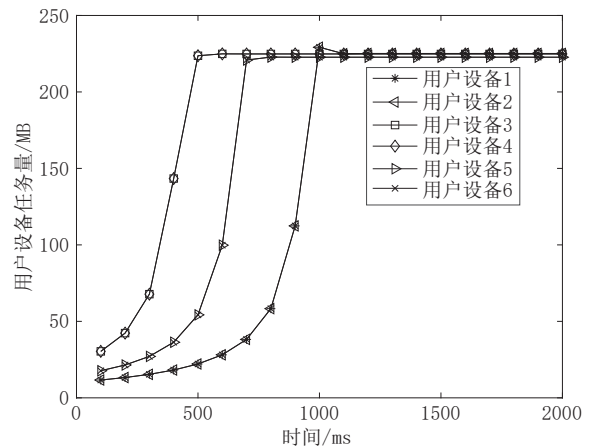


图5 单一场景下用户设备计算资源租赁策略

在单一服务租赁场景下,3个边缘节点对于用户来说具有同等地位,6个用户设备对3个边缘节点进行了等概率的随机选择,最终分为相互重合的3组,每组2个设备.每组中的2个设备数据传输速

率、发射功率、所选择的任务类型等设定均相同，2个用户设备收敛的情况也相同，均按照较平滑的曲线逐步增加任务量，最终每组收敛到各自的最大值。在0.6秒左右，第1组用户设备达到最大值，0.8秒左右，第2组用户设备达到最大值，1.2秒左右，第3组用户设备达到最大值。之后，6个用户设备的任务量保持不变，且保持在3组不同的最大值。这一结果表明：(1)当存在3个边缘计算节点时，6个用户设备均匀分成了3组，3组用户设备所租赁的计算资源随博弈轮数而增加，最终收敛为最大值；(2)每2个用户设备选择同一个边缘计算节点进行任务卸载，2个节点将采取相同的卸载策略，并具有相同的收敛特性，最终收敛为相同的结果；(3)对于不同的边缘计算节点，用户设备所选择的计算任务类型不同，计算开销也不同，3组用户设备的收敛过程及资源分配结果也不相同。

为了进一步验证上述结论，我们对3个边缘节点的资源定价情况进行了分析，结果见图6。在图6中，三个边缘节点初始定价不同，最终收敛为三组不同的结果。其中，3号边缘节点的资源定价在0.5秒左右达到最小值，2号边缘节点的资源定价在1.1秒左右达到了最小值，1号边缘节点在0.7秒左右达到了最小值，之后定价保持稳定。这一结果符合现实世界中博弈的规律，随着竞争的进行，同一资源的定价将逐步趋近于一个相同的数值，形成统一价格。边缘节点的定价变化与用户设备的计算卸载量变化保持一致，进一步验证了上述结论。

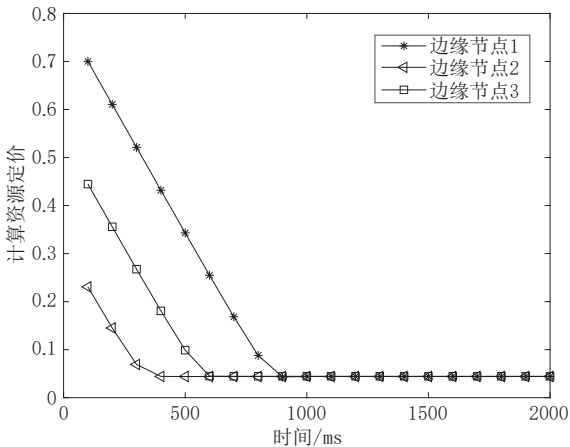


图6 单一场景下边缘节点定价

在混合服务租赁场景下，3颗卫星共同向地面提供专用计算服务。对于用户设备请求的专用计算任务，3颗卫星按照[0.2, 0.3, 0.5]的比例分配计算任务。3架无人机向地面提供通用计算服务。地面用

户设备数量仍设为6个，其中3个用户设备向卫星请求专用计算服务，3个用户设备向无人机请求通用计算服务。每个通用边缘节点及专用边缘节点所提供的运算类型不同，不同服务的 λ_m 值也不相同。用户设备计算资源租赁策略结果如图7所示。

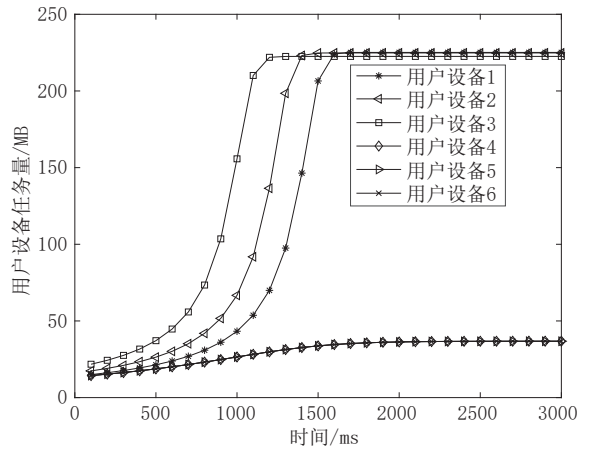


图7 混合场景下用户设备计算资源租赁策略

在图7中，用户设备4、5、6的任务量始终相同，并在2.3秒收敛。这是由于专用计算资源统一定价，三个用户设备也采取了相同的租赁策略。用户设备1、2、3分别在1.1秒、1.5秒、1.7秒收敛于不同的值，用户设备1、2、3任务量收敛后的数值均高于用户设备4、5、6任务量收敛后的数值。造成这一结果的原因是专用计算任务由卫星提供，而卫星传输距离更远，传输功率更大，能耗更高。因而专用计算任务相比通用计算任务开销更高。而相同的任务量为用户设备所带来的满意度是相同的。因此专用计算任务的最优任务量相对较小。

图8展示了混合场景下边缘计算资源定价随时间的变化情况。其中，三个通用边缘计算节点分别在1.2秒、1.4秒、1.7秒收敛；专用边缘计算代理为三个专用边缘计算节点统一定价，在2.1秒收敛。可以看出图8中三个通用计算资源定价的收敛情况与图7中租赁通用计算资源的三个用户设备的策略的收敛情况基本一致。对比图6的结果，图8中通用计算资源收敛后的定价与图6中的定价接近。

图9展示了混合场景下边缘节点任务量随时间的变化情况。由于专用计算任务中，每个节点执行的运算操作都为预先设定的算法，因此3个专用边缘节点任务量始终保持相同的比例，比例值为2:3:5。

综上，在混合计算服务租赁场景下，不同用户设备将按照计算服务的定价情况逐步收敛。由于供需

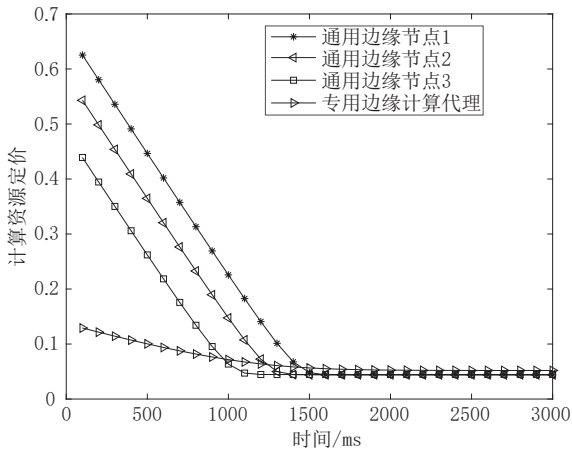


图8 混合场景下边缘节点资源定价

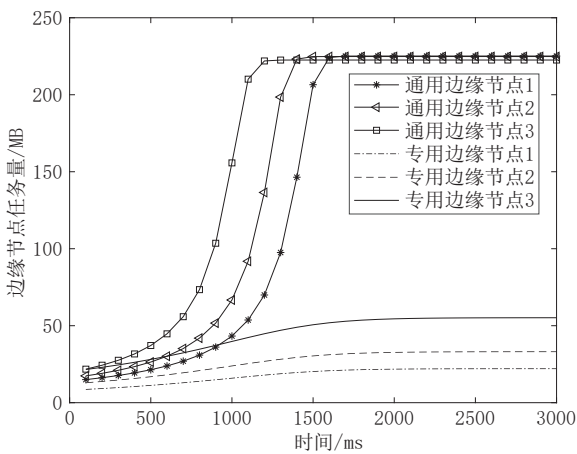


图9 混合场景下边缘节点任务量

关系不同,不同边缘节点的计算能力也不同,专用计算资源与通用计算资源最终收敛后的定价与任务量不同.最终通用计算资源的任务量将按边缘计算节点的计算能力分配到每一个边缘节点中,而专用计算资源的任务量将按照预设的计算量比例分配.

5.3 系统效用分析

第二部分仿真实验用以验证系统的效用值,该结果主要包含用户设备的总效用值以及边缘节点的总效用值.每个用户设备的效用值可以通过公式(1)、(5)分别进行计算,计算后累加得到总效用值.每个边缘计算节点效用值可以通过公式(2)、(6)分别进行计算.效用值可以看作用户设备以及边缘节点的虚拟收入.系统效用的结果可以用来分析资源管理方法为博弈双方所带来的价值,进而分析资源管理方法是否合理.

在资源分配过程中,天基节点与用户设备经过多轮博弈,双方策略最终收敛.为了验证此时双方的策略均为各自可选择的最优策略,本节构建了两组仿真实验,并对两种场景下的系统效用进行分

析.第一组仿真实验中,单一服务场景共3个通用计算节点,30个用户设备,混合服务场景则由3个通用计算节点,3个专用计算节点,30个用户设备组成.其他参数与上节中的设定相同.

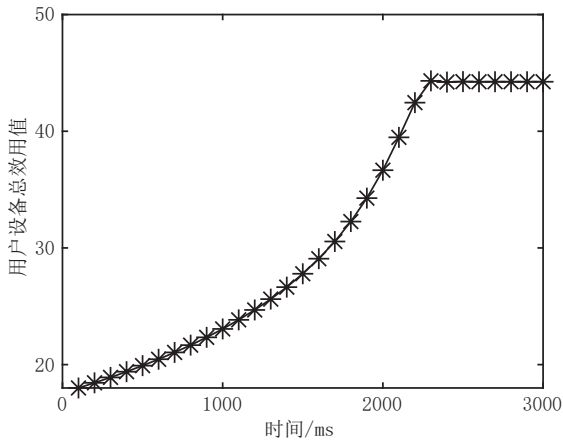
在单一资源租赁及混合资源租赁两种场景下,对博弈过程中用户设备和边缘节点的总效用值分别进行分析,结果如图10所示.其中,图10(a)为用户设备效用值总和随时间变化情况.用户设备的总效用值随时间的增长较为平滑地提高,在2.4秒时达到最大值,之后效用值不再变化.这一结果表明,在没有任务量及时延限制的情况下,用户设备的效用值是随着博弈过程逐步提高的,最终用户设备的效用达到最优.此时的资源租赁策略对于用户设备而言是最优策略.图10(b)展示了3个边缘节点的总效用值.边缘节点总效用值随时间的增长平滑上涨.在2.3秒左右,总效用值达到最大值,且不再变化,此时边缘节点的定价策略为最优定价策略.

以上结果表明在单一通用计算服务租赁场景下,用户设备及边缘节点总效用值均可在2.5秒以内达到最大值.博弈双方均做出各自的最优策略.

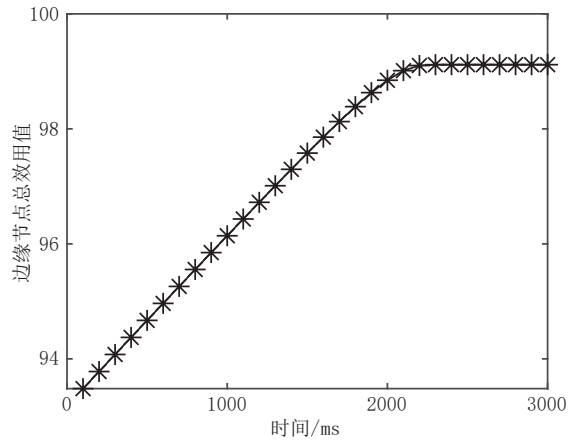
图10(c)与图10(d)为混合场景下用户设备效用值及边缘节点总效用值随时间变化情况.这一结果与图10(a)、图10(b)结果类似.其中最主要的区别在于,在3秒左右,用户设备及边缘节点效用值均达到了较高水平.在此之后,用户设备及边缘节点的总效用值开始缓慢增长,并在3.2秒达到最大值.至此实验结果收敛,用户设备及边缘节点的总效用值不再变化.这表明在混合场景中,经过多轮博弈与策略的改进,用户设备与边缘节点所制定的策略均为各自的最优策略.

为了进一步对本文所提算法的性能进行分析和讨论,我们探讨了用户设备数量对效用值的影响.我们将用户设备数量分别设置为30、60、90.用户设备平均分为两组,一组租赁通用计算资源,一组租赁专用计算资源.其他参数设置与表1中参数设置相同.实验结果如图11-12所示.

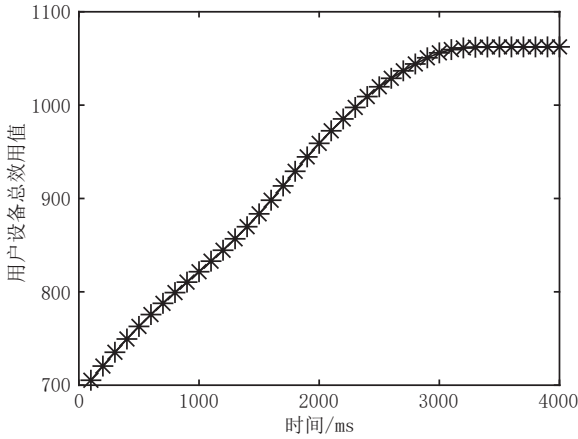
在图11中可以看到,用户设备数量越多,设备的总效用值越大,效用值增加速度也越快.当用户设备数量为90的时候,效用值在4秒内收敛;用户设备数量为60的时候,效用值在3秒内收敛;用户设备数量为30的时候,效用值在1.8秒内就达到了较高的值,然而之后出现了轻微波动,最终未能收敛.算法的收敛速度一方面取决于步长设置,另一方面也与边缘节点效用函数的一阶导数正相关.而边缘节



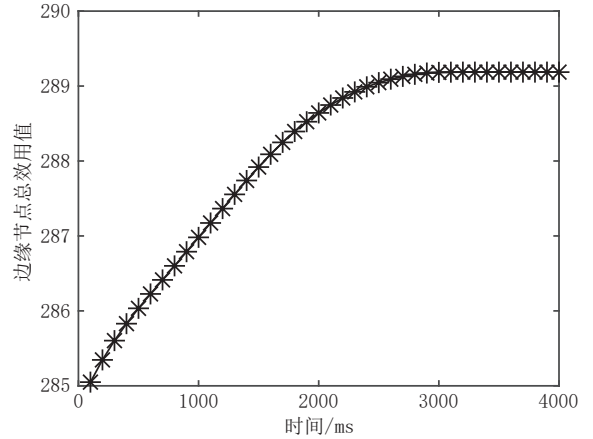
(a) 单一场景下用户设备总效用值



(b) 单一场景下边缘节点总效用值



(c) 混合场景下用户设备总效用值



(d) 混合场景下边缘节点总效用值

图10 两种场景下系统效用分析

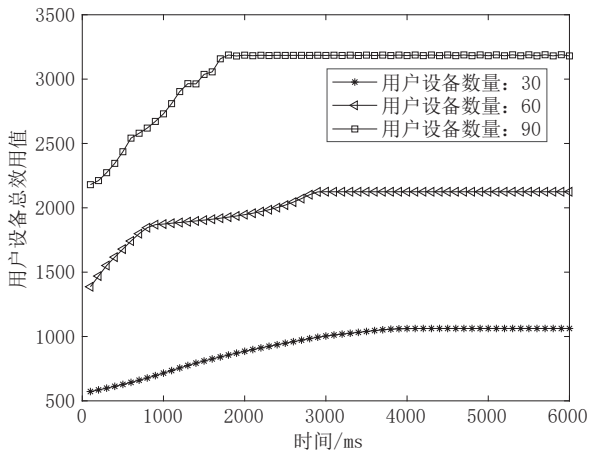


图11 不同用户设备数量用户设备总效用值

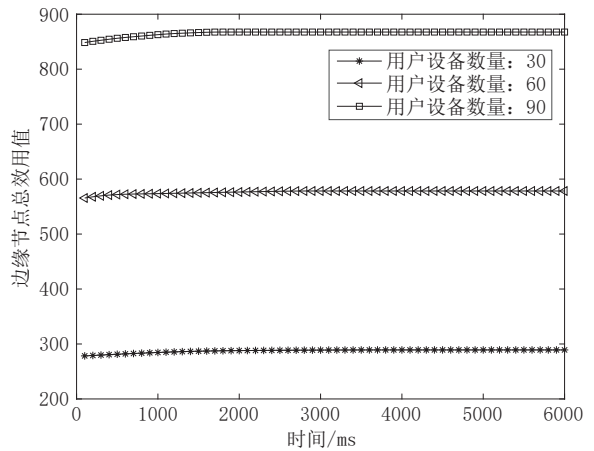


图12 不同用户设备数量边缘节点总效用值

点效用函数的一阶导数计算过程中需要将用户设备的参数进行累加. 当用户设备数量增多时, 边缘节点效用函数的一阶导数也相应增大, 因而收敛速度加快. 当用户设备数量为90个时, 时间在1.5秒后, 用户设备总效用值开始波动, 无法收敛. 这是由于当用户设备数量增大到一定程度时, 梯度上升增量过大, 将导致定价在最优点两侧跳跃, 无法收敛, 因

而用户设备总效用值也无法收敛. 算法收敛意味着边缘计算节点与用户设备关于定价与资源租赁达成一致. 算法无法收敛将导致资源分配无法达到最优. 因此在用户设备数量增多时, 可以考虑降低步长设置, 确保算法收敛.

在图12中可以看到, 随着用户设备数量的增多, 边缘节点总效用值增大. 边缘节点总效用值与

用户设备总效用值存在一致的收敛特性.

5.4 算法收敛性分析

第三部分仿真实验用以验证本文所提出算法的收敛速度. 收敛速度计算为:资源分配结果生效的时间-用户设备发起边缘计算请求的时间. 收敛速度决定了算法的实际性能,这一指标在链路不稳定的天基网络中尤为重要.

本节设计了两组仿真实验,针对不同搜索步长进行了算法收敛性的分析,并与参考文献[25]中所提出的两阶段优化算法进行了对比,进而说明本文所提出的算法在收敛性方面的特点及优势.

第一组仿真实验分析单次搜索步长对收敛速度的影响. 首先将用户设备数量设置为30个,单次搜索步长分别设置为0.003、0.004、0.005,最大博弈时间设为4秒. 用户设备及边缘节点总效用值随时间变化情况如图13-14所示.

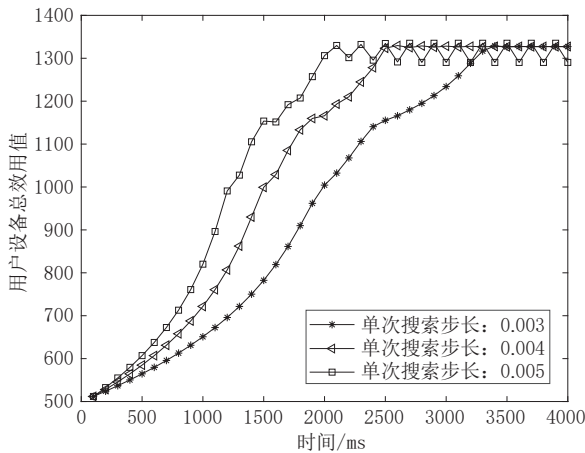


图13 不同搜索步长用户设备总效用值

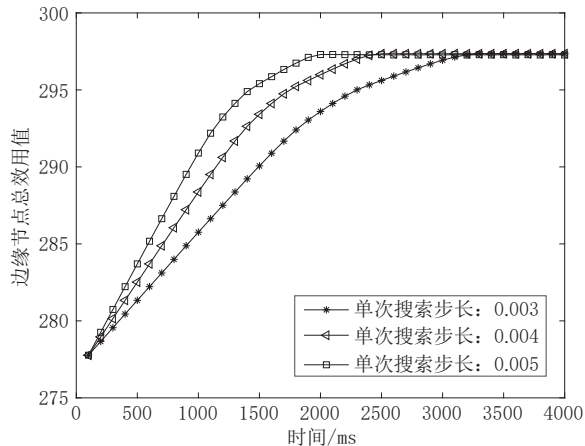


图14 不同搜索步长边缘节点总效用值

在图13中可以看到,单次搜索步长数值越小,效用值收敛速度越慢. 当单次搜索步长为0.003时,总

效用值在3.4秒收敛至最大值. 相应地,当单次搜索步长为0.004时,用户设备总效用值在2.6秒收敛至最大值. 当单次搜索步长为0.005时,用户设备总效用值在2.1秒开始进入波动状态,最终无法收敛.

图14与图13结果类似,区别在于边缘节点总效用有最大值上界,无论步长如何设置,边缘节点总效用始终无法突破理论上的最大值. 这也进一步验证了最优定价策略的存在性与唯一性. 综合以上实验结果可以得出如下结论:在本文所提出的算法中,步长的选择是影响算法性能的关键因素. 为了使算法更快地收敛,应该选择较大步长,然而若步长过大,将导致结果陷入波动状态,算法难于收敛. 这是由于步长越大,意味着变量的递增(或者递减)越快,迭代时可能错过最优解,出现不稳定的结果. 在本文仿真实验场景中,步长在0.004-0.005之间时,将有一个临界点能够使算法最快收敛.

为了进一步验证本文算法在收敛性方面的优势,本节与参考文献[25]中所提出的两阶段动态迭代算法进行了对比. 该算法在工业物联网中进行资源管理,通过两阶段动态迭代方法找到最优策略.

考虑文献[25]仿真实验中设置的用户设备最大值为30,对比实验场景设计如下:3架无人机提供通用计算资源服务,30个用户设备租赁通用计算资源,其他参数与表1中参数设置相同. 两阶段动态迭代算法的参数设置为: $\alpha=0.03$, $\beta=5$, $t_{max}=10$, $\tau_{max}=10$. 其中参数 α 与本文所提出的方法相同,以保证对比的公平性. 对比算法中, β , τ_{max} 两个参数影响了用户设备资源租赁策略的收敛速度,将 β 设为较大的值,以增加步长,将 τ_{max} 设置为较小的值,以减少迭代次数,加快其收敛速度. 用户设备及边缘节点总效用值结果如图15-16所示.

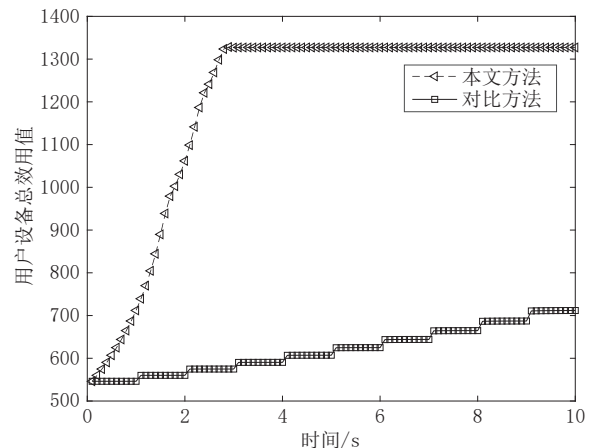


图15 用户设备总效用值对比

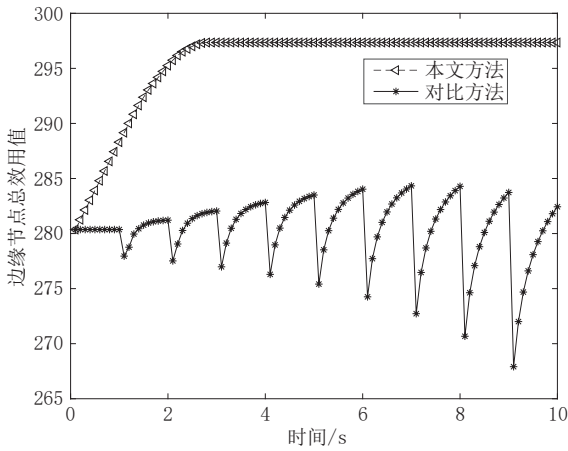


图16 边缘节点总效用值对比

实验使用了相同的参数,因此最终两种算法下用户设备和边缘节点的最大效用值是相同的,只有收敛速度发生了改变.由图15可以看出,本文所提出的方法在4秒以内即可收敛为最大值,而对比方法在第10秒时结果仍未收敛.在图16中,这一结果更加明显.相比本文所提出的方法,对比方法将放大波动性,减慢收敛速度.相比对比方法,本文所提出的方法收敛速度要更快.这是由于对比文章在算法中对价格和任务量进行了两次迭代,而本文简化了对任务量的迭代处理,在给定边缘节点定价之后,直接运算得出了用户设备的最佳资源卸载策略,而对比方法需要迭代多轮后才可达到接近的结果.尽管在边缘节点定价改变后,用户设备的资源卸载策略也需要进一步调整,然而这一策略已尽可能地降低了程序迭代次数,提升了算法效率.在文献[25]的工业物联网场景中,物联网节点与边缘节点之间通常距离很近,具有较快的交互速度与效率,迭代次数的增加对于性能的影响并不明显.在空天地一体化边缘计算场景中,天基节点与地面终端之间通信环境较差,降低迭代次数对于提升算法的可用性具有重要意义.

6 相关工作

当前边缘计算服务通常由地面基站附近的边缘计算服务器提供.随着6G网络研究的开展,空天地一体化融合的网络服务成为了研究热点,由卫星及无人机为用户设备提供边缘计算服务也成为了可能.为此,许多研究者针对空天地一体化场景中的边缘计算开展研究.

在卫星边缘计算的研究方面,许多研究者针对卫星边缘计算提出了参考的架构.唐琴琴等人^[11]以

提高用户体验质量和减少网络冗余流量出发,提出了星地协同网络和移动边缘计算技术的基本架构,并讨论了在星地协同网络中移动边缘计算平台的部署问题.Tang等人^[12]提出了一种具有三层计算架构的混合云和边缘计算低轨卫星网络,该网络可以为地面用户提供异构计算资源,并使地面用户能够获得世界各地的计算服务.Song等人^[13]提出了一种新的地面-卫星物联网移动边缘计算框架并提出了一种节能计算卸载和资源分配算法以降低移动设备的能耗.Tang等人^[14]以云边协作为目标提出了一种用于云边协同计算卸载的低轨辅助地面卫星网络架构.Ding等人^[15]提出了一种卫星-空中集成边缘计算网络,该网络将低轨卫星和空中高空平台结合起来,为地面用户设备提供边缘计算服务.在以上研究中,卫星节点均难于独立提供边缘计算服务,往往作为地面网络的延伸,作为中继节点存在,或者为少量数据提供简单的数据处理能力.限制卫星边缘计算服务能力的因素主要包括两方面:一方面是卫星本身硬件能力的限制,现有卫星通常运算载荷有所不足,算力严重受限.另一方面是卫星网络的服务能力限制,现有卫星网络通常仅作为接入网存在,核心网通常在地面,由于缺乏核心网必要网元,卫星难于提供较复杂的数据处理服务.

无人机边缘计算同样面对算力不足的挑战,因而无人机通常应用于物联网场景,为物联网设备所采集的数据提供边缘处理服务.Zhang等人^[16]提出了无人机边缘计算服务中一种新的优化问题公式,通过优化比特分配、时隙调度和功率分配以及无人机轨迹设计,最小化总能耗.Liu等人^[17]提出了一种无人机协同边缘计算网络结构,并设计了一种协作计算卸载方案,以获得最佳的计算卸载决策和资源管理策略为目标,在集中式和分布式无人机移动边缘计算网络中提出了一种基于深度强化学习的算法.Xu等人^[18]以任务完成时间最小化为目标,通过联合优化时隙大小、终端设备调度、计算资源分配和无人机轨迹,考虑了部分卸载和二进制卸载模式,提出了一种交替优化算法.在这些研究中,针对无人机算力不足,应用场景中的移动性等问题,从部分卸载、分布式算法等角度出发提出了适应于应用场景的解决方案.

由于卫星、无人机独立提供边缘计算服务能力存在不足,近几年出现了卫星和无人机相融合,共同为地面用户设备提供边缘计算服务的研究.Sharma等人^[19]考虑了一种混合卫星-地面网络,其中多天线卫星通过多重放大和转发三维移动无人机中继与地面用户设备通信.为了增强具有绿色目标

的车-网通信的性能,卫星和无人机联合应用,通过利用协调的多点传输技术来辅助地面通信设施. Dai等人^[20]研究了由地面基站,无人机和一颗卫星组成的空地综合物联网网络中的车-网通信的新型架构. 这些研究偏向于总体架构的设计,对于计算资源的融合研究有所不足,针对空地一体化混合资源分配的研究有待进一步加深.

本文的资源管理应用了斯坦科尔伯格博弈模型,在卫星资源管理的相关研究中,斯坦科尔伯格也是其中最常被用到的模型之一. Li等人^[22]提出了一种新的卫星系统功率分配和干扰定价算法,通过将潜在的资源分配问题公式化为一个动态博弈模型斯坦科尔伯格模型来解决卫星的联合干扰定价和功率分配问题. Su等人^[23]提出了一种基于斯坦科尔伯格微分对策的方法来解决卫星通信网络中的带宽分配问题,控制器和卫星之间的关系形成了一个斯坦科尔伯格博弈,该模型得到纳什均衡,从而得到带宽分配的最优价格. Deng等人^[24]考虑了一个基于卫星的卫星地面网络,设计了一种基于斯坦科尔伯格博弈的定价机制,通过共同优化C频段用户关联、Ka频段频谱分配和数据服务定价,实现斯坦科尔伯格均衡,激励卫星、地面运营商更有效地进行数据卸载. Li等人^[25]提出了一种基于两阶段斯坦科尔伯格博弈的计算卸载机制来分析多个边缘云和多个工业物联网设备之间的交互,所提出的方法在提高边缘云和工业物联网设备的利用率方面发挥了重要作用.

当前针对天基边缘计算资源管理的研究处于起步阶段,对于天基边缘计算的实际可用场景及基础技术支撑仍缺乏深入的分析. 在地面5G网络中,数据需要由5G核心网中的用户面功能(User Plane Function, UPF)网元进行分流,之后才可以进入边缘计算平台进行处理. 而现有的研究通常未能考虑卫星及无人机进行边缘计算的基础技术支撑条件,这使得当前围绕天基边缘计算的研究在实用性方面有所缺失. 天算星座实现了5G核心网上天,为卫星、无人机提供边缘计算能力提供了基础的技术支撑. 为此,本文在天算星座技术架构的基础上设计边缘计算资源融合策略,为研究的实际应用提供基础条件.

另一方面,天基设备的距离与用户设备较远,传输能耗高,时延长,可靠性差. 资源分配过程中,博弈迭代的次数越少,服务响应时间越短,资源的损失就越少. 如何加快算法的收敛速度,降低博弈轮次,提升服务效率,也是当前研究有待进一步深入的方向. 以上问题也是本文重点考虑并尝试解决的关键.

7 结 论

在6G网络研究逐渐开展的背景下,本文提出了天基边缘计算中资源租赁的典型应用场景. 在这一应用场景中设计了聚合与组合两种天基计算资源的融合模式. 围绕这两种模式,将天基边缘计算资源的管理建模为两阶段的斯坦科尔伯格博弈模型. 提出了分布式混合动态迭代算法以及分布式分组动态迭代算法,分别给出了通用计算服务租赁与混合服务租赁场景下最优资源分配策略的求解方法. 仿真实验结果表明,本文所提出的方法能够使天基边缘计算资源实现最优分配. 相比现有方法,本文所提出的方法能够有效提升收敛速度,提升算法在空地一体化网络场景中的可用性.

参 考 文 献

- [1] Saad Walid, Bennis Mehdi, Chen Ming-Zhe. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*, 2020, 34(3): 134-142
- [2] Giordani Marco, Polese Michele, Mezzavilla Marco, Rangan Sundeeep, Zorzi Michele. Toward 6G networks: use cases and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(3): 55-61
- [3] Zhang Ping, Zhang Jian-Hua, Qi Qi, Hu Zheng, Nie Gao-Feng, Niu Kai, Tian Hui. Ubiquitous-X: constructing the future 6G networks. *Scientia sinica Informationis*, 2020, 50(6): 913-930 (in Chinese)
(张平, 张建华, 戚琦, 胡铮, 聂高峰, 牛凯, 田辉. Ubiquitous-X: 构建未来6G网络. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(6): 913-930)
- [4] Chen Shan-Zhi, Liang Ying-Chang, Sun Shao-Hui, Kang Shao-Li, Cheng Wen-Chi, Peng Mu-Gen. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 218-228
- [5] Fang Juan, Ma Ao-Nan. IoT application modules placement and dynamic task processing in edge-cloud computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 16(8): 12771-12781
- [6] Jia Zi-Ye, Sheng Min, Li Jian-Dong, Zhou Di, Han Zhu. Joint HAP access and LEO satellite backhaul in 6G: matching game based approaches. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1147-1159
- [7] Zhou Fu-Hui, Hu Qingyang-Rose, Li Zan, Wang Yu-Hao. Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(1): 140-146
- [8] Wang Shang-Guang, Li Qing, Xu Meng-Wei, Ma Xiao, Zhou Ao, Sun Qi-Bo. Tiansuan constellation: an open research platform//*Proceedings of the 2021 IEEE International Conference*

- on Edge Computing (EDGE). Chicago, USA, 2021; 94-101
- [9] Xu Xiao-Bin, Zhao Hui, Liu Chang, Fan Cun-Qun, Liang Zhong-Jun, Wang Shang-Guang. On the aggregated resource management for satellite edge computing//Proceedings of the ICC 2021-IEEE International Conference on Communications. Montreal, Canada, 2021; 1-6
- [10] Zhou Yue-Zhi, Zhang Di. Near-end cloud computing: opportunities and challenges in the post-cloud computing era. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4): 677-700 (in Chinese) (周悦芝, 张迪. 近端云计算: 后云计算时代的机遇与挑战. 计算机学报, 2019, 42(4): 677-700)
- [11] Tang Qin-Qin, Xie Ren-Chao, Liu Xu, Zhang Ya-Sheng, He Ci, Li Cheng-Cheng, Huang Tao. MEC enabled satellite-terrestrial network: architecture, key technique and challenge. Journal on Communications, 2020, 41(4): 162-181 (in Chinese) (唐琴琴, 谢人超, 刘旭, 张亚生, 何辞, 李诚成, 黄韬. 融合 MEC 的星地协同网络: 架构、关键技术与挑战. 通信学报, 2020, 41(4): 162-181)
- [12] Tang Qing-Qing, Fei Ze-Song, Li Bin, Han Zhu. Computation offloading in LEO satellite networks with hybrid cloud and edge computing. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 9164-9176
- [13] Song Zheng-Yu, Hao Yuan-Yuan, Liu Yuan-Wei, Sun Xin. Energy-efficient multiaccess edge computing for terrestrial-satellite internet of things. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14202-14218
- [14] Tang Zhi-Xuan, Zhou Hai-Bo, Ma Ting, Yu Kai, Shen Xue-Min. Leveraging LEO assisted cloud-edge collaboration for energy efficient computation offloading//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Madrid, Spain, 2021; 1-6
- [15] Ding Chang-Feng, Wang Jun-Bo, Zhang Hua, Lin Min, Li Geoffrey. Joint optimization of transmission and computation resources for satellite and high altitude platform assisted edge computing. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2): 1362-1377
- [16] Zhang Tian-Kui, Xu Yu, JonathanLoo, Yang Ding-Cheng, Xiao Lin. Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5505-5516
- [17] Liu Yi, Xie Sheng-Li, Zhang Yan. Cooperative offloading and resource management for UAV-enabled mobile edge computing in power IoT system. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 12229-12239
- [18] Xu Yu, Zhang Tian-Kui, JonathanLoo, Yang Ding-Cheng, Xiao Lin. Completion time minimization for UAV-assisted mobile-edge computing systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(11): 12253-12259
- [19] Sharma Pankaj K, DeepikaGupta, Dong In Kim. Cooperative AF-based 3D mobile UAV relaying for hybrid satellite-terrestrial networks//Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). Antwerp, Belgium, 2020; 1-5
- [20] Dai Hai-Bo, Bian Hui, Li Chun-Guo, Wang Bao-Yun. UAV-aided wireless communication design with energy constraint in space-air-ground integrated green IoT networks. IEEE Access, 2020, 8: 86251-86261
- [21] Mao Bo-Min, Tang Feng-Xiao, Yui-ChiKawamoto, NeiKato. Optimizing computation offloading in satellite-UAV-served 6G IoT: a deep learning approach. IEEE Network, 2021, 35(4): 102-108
- [22] Li Feng, Kwok-YanLam, Liu Xin, Wang Jian, Zhao Kang-Lian, Wang Li. Joint pricing and power allocation for multibeam satellite systems with dynamic game model. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2398-2408
- [23] Su Jing-Tao, Yang Sheng-Song, Xu Hai-Tao, Zhou Xian-Wei. A stackelberg differential game based bandwidth allocation in satellite communication network. China Communications, 2018, 15(8): 205-214
- [24] Deng Ruo-Qi, Di Bo-Ya, Chen Shan-Zhi, Sun Shao-Hui, Song Ling-Yang. Ultra-dense LEO satellite offloading for terrestrial networks: how much to pay the satellite operator? IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6240-6254
- [25] Li Fei-Xiang, Yao Hai-Peng, Du Jun, Jiang Chun-Xiao, Qian Yi. Stackelberg game-based computation offloading in social and cognitive industrial internet of things. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5444-5455
- [26] Mao Yu-Yi, Zhang Jun, Letaief Khaled B. Dynamic computation offloading for mobile-edge computing with energy harvesting devices. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3590-3605
- [27] Miettinen AP, Nurminen JK. Energy efficiency of mobile clients in cloud computing// Proceedings of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing. Boston, USA, 2010; 4
- [28] Chen Run-Feng, Cui Li, Zhang Yu-Li, Chen Jin, Yao Kai-Ling, Yang Yang, Yao Chang-Hua, Han Han. Delay optimization with FCFS queuing model in mobile edge computing-assisted UAV awarms: a game-theoretic learning approach//Proceedings of the 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing, China, 2020; 245-250
- [29] Zhu Xiang-Ming, Jiang Chun-Xiao, Kuang Lin-Ling, Zhao Zhi-Feng, Guo Song. Two-layer game based resource allocation in cloud based integrated terrestrial-satellite networks. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 509-522
- [30] Mai Tian-Le, Yao Hai-Peng, Xu Xiao-Bin, Jin Ya-Qing, Li Fei-Xiang, Ji Zhe. Computing resource allocation in LEO satellites system: a stackelberg game approach// Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco, 2019, 919-924
- [31] Xiao Zhen-Yu, Dong Hang, Bai Lin, Oliver Wu Da-Peng, Xia Xiang-gen. Unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) deployment with millimeter-wave beamforming. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(2): 1336-1349



XU Xiao-Bin, Ph. D., associate professor. His main research interests include space-air-ground integrated information networks, internet of things, mobile edge computing.

WANG Qi, M. S. candidate. Her research interests include space-air-ground integrated information networks, internet of things, mobile edge computing.

Background

This paper is a preliminary study on the combination of edge computing and the 6G network. It mainly focuses on the heterogeneous edge computing resource management in the space-air-ground integrated information networks. The form of service provided by the 6G network is not clear at present. It is a common vision of the research community to regard the space-air-ground integrated information networks as the important basic support of the 6G network and realize the seamless coverage of the global wireless network.

Taking the space-based infrastructure as a kind of edge computing resource, the research on computing offloading and resource management is a hot topic. At present, the research on UAV clusters and LEO satellite computing resources has some frontier results. In this paper, we further expand the research on the integration direction of heterogeneous space-based infrastructure. On the one hand, two kinds of heterogeneous computing resources fusion mode are proposed, and the Stackelberg game model is established; on the other hand, the algorithm for solving the model Nash equilibrium is further improved, a hybrid dynamic iterative algorithm and a grouping dynamic iterative algorithm are proposed based on the different ways to realize the optimal path of both sides of the game. This paper solve the problem of optimal allocation of resources in heterogeneous space-based infrastructure and improve the performance of the algorithm.

This paper was supported by the Beijing Natural Science Foundation (No. L212032) and the National Natural Science

FAN Cun-Qun, Ph. D., senior engineer. His main research interests include satellite data processing, remote sensing data services.

LIANG Zhong-Jun, Ph. D., professor. His main research interests include cloud computing, big data management.

XUE Yi-Qi, M. S., engineer. Her research interests include integrated information networks, internet of things, mobile edge computing.

WANG Shang-Guang, Ph. D., professor. His main research interests include service computing, 6G networks, mobile edge computing.

Foundation of China (No. 62032003, No. 61922017). The objectives of these projects are to propose an intelligent data collection and processing method in the Space-air-ground integrated networks, which enables satellite and UAV nodes to participate in the data processing. Based on these projects, we are constructing Tiansuan constellation, which is the first constellation to provide 6G core and edge computing services. More details about Tiansuan are given in www.tiansuan.org.cn. This work is accomplished based on the edge service mode of Tiansuan constellation. This paper also provides space-based infrastructure cooperation modes for Tiansuan constellation and proposes the resource allocation method of space-based services.

The previous research results of this research group in this direction are as follows:

[1] Wang Shang-Guang, Li Qing, Xu Meng-Wei, Ma Xiao, Zhou Ao, Sun Qi-Bo. Tiansuan constellation: an open research platform//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). Chicago, USA, 2021: 94-101

[2] Xu Xiao-Bin, Zhao Hui, Liu Chang, Fan Cun-Qun, Liang Zhong-Jun, Wang Shang-Guang. On the aggregated resource management for satellite edge computing// Proceedings of the ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. Montreal, Canada, 2021: 1-6

[3] Xu Xiao-Bin, Zhao Hui, Yao Hai-Peng, Wang Shang-Guang. A Blockchain-enabled Energy Efficient Data Collection System for UAV-assisted IoT. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(4): 2431-2443