

# 基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型

孙伊<sup>1</sup>, 熊翱<sup>1</sup>, 蒋承伶<sup>2</sup>, 王威<sup>3</sup>, 于东晓<sup>4</sup>, 郭少勇<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000;  
3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211100; 4. 山东大学计算机科学与技术学院, 山东 青岛 266237)

**摘要:** 无线通信网络中, 边缘侧的频谱、计算、存储等资源存量受限, 传统分散、独占式资源分配造成资源复用能力弱且利用率低下。同时, 在传统资源调度过程中由于归属方的主体间信任缺失, 难以保障资源共享的公平性。首先提出了基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型, 在模型中建立了一个资源市场, 资源买方与卖方通过双向拍卖的方式进行资源分配; 其次采用区块链存储各买家与卖家的资源信息, 解决网络中各方的互信问题; 最后进行实验仿真, 验证所提模型有效提升了系统性能与资源利用效率。

**关键词:** 边缘计算; 资源分配; 市场模型; 双向拍卖; 区块链

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2022210

## Blockchain-based computing and wireless communication resource joint management double auction model

SUN Yan<sup>1</sup>, XIONG Ao<sup>1</sup>, JIANG Chengling<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, YU Dongxiao<sup>4</sup>, GUO Shaoyong<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China  
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China  
3. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China  
4. School of Computer Science and Technology, Shandong University, Qingdao 266237, China

**Abstract:** In wireless communication networks, the stock of spectrum, computing, storage and other resources at the edge was limited. The traditional decentralized and exclusive resource allocation resulted in weak resource reuse capability and low utilization rate. At the same time, it was difficult to ensure the fairness of resource sharing in the traditional resource scheduling process due to the lack of trust between the owners. First, a double auction model of computing and wireless communication resource joint management based on blockchain was proposed. In the model, a resource market was established, in which resource buyers and sellers allocated resources through double auctions. Secondly, blockchain was used to store the resource information of buyers and sellers to solve the mutual trust problem of all parties in the network. Finally, the experimental simulation was carried out to verify that the proposed model effectively improved the system performance and resource utilization efficiency.

**Keywords:** edge computing, resource allocation, market model, double auction, blockchain

## 0 引言

随着 5G/6G 网络的发展, 由 Wi-Fi、运营商网络、无线专网等组成的边缘网络支撑着各类时延敏感型

业务的低时延、高速率运行<sup>[1-3]</sup>。但在边缘网络环境中, 计算与无线通信资源受限, 传统分散、独占式资源分配模式限制了边缘网络资源的复用能力<sup>[4]</sup>, 考虑如何通过多种资源联合管理实现分散边缘网络资源

收稿日期: 2022-07-23; 修回日期: 2022-10-20

通信作者: 郭少勇, syguo@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2020YFB1005900)

**Foundation Item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1005900)

的共享共用,全面提升网络资源利用率成为移动边缘计算(MEC, mobile edge computing)的新发展趋势。

由于传统的集中式资源调度流程不透明,网络主体间缺乏信任,在资源分配过程中易出现收益分配不均等问题。除此之外,网络中可能存在恶意节点发出虚假资源请求或向系统谎报自身资源拥有量,影响资源分配流程,降低系统整体性能。区块链的应用将成为有效解决节点间信任问题、降低恶意节点影响的有效手段<sup>[5-7]</sup>。

在边缘网络领域,学术界提出了大量资源调度方案。文献[8]提出了一种单个无线通信资源无预算市场,文献[9]在此基础上提出了一种新的联合资源和收入优化模型,使更多网络切片能得到满足的同时提高了网络的收入。文献[10]提出了一种基于双向拍卖法的市场化资源分配模型,使系统达到一个所有代理都受益的竞争平衡,解决了移动数据卸载市场中频谱资源分配问题。为解决资源分配过程中的信任与安全问题,区块链技术逐渐被研究者采用。文献[11]提出了一种基于区块链的边缘计算场景下的计算资源分配框架,该框架利用区块链解决了计算资源分配过程中的安全和隐私问题。文献[12]提出了一种适应边缘设备局限性的区块链系统,可以公平、高效地分配边缘设备上的存储资源。文献[13]提出了一种基于区块链的移动虚拟网络运营商之间的资源交易框架,解决了无线网络中的安全和隐私问题对运营商之间资源交易的影响。文献[8-13]虽然都提出了有效的资源分配方式,但都仅考虑单种资源的有效利用,未考虑多种资源的联合管理分配。文献[14]提出了一种综合考虑价格策略和计算资源分配策略的激励机制,使用基于 Stackelberg 博弈的方法实现了价格与资源的均衡。文献[15]提出了一种边缘云任务卸载能耗最小化模型,通过综合考虑数据的传输功率与边缘侧计算能力,最小化任务卸载的能量消耗。文献[14-15]都对多种资源进行了联合优化,实现了资源的有效利用,但其集中式的任务卸载与资源分配决策易出现公平性问题,且易受到恶意攻击。文献[16]提出了一种预算有限的市场模式,并扩展到文献[17]的入场控制,提出一种融合准入控制与资源分配技术的网络切片架构,并证明了该系统可保持纳什均衡。文献[18]提出了一种计算与无线通信资源联合优化方法,然而该方法将计算任务卸载到云端降低了移动边缘侧的压力,在无线通信资源受限场景下难以满足业务的时延要

求。文献[19-20]都使用游戏理论工具处理计算资源分配问题,提出了基于费舍尔市场的移动边缘计算资源管理模型。文献[16-20]虽然对多种资源的联合管理问题进行了研究,且多采用市场化分配方式,但并未考虑市场中节点间的信任问题。

为解决以上问题,本文提出了基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型,主要研究工作如下。

1) 提出一种多资源联合管理模型,并基于该模型提出了多资源联合管理的拍卖算法,利用双向拍卖机制实现计算与无线通信资源分配,在资源分配过程中进行多种资源联合管理,有效降低资源瓶颈问题对系统性能带来的影响。

2) 将节点资源、资源分配结果等信息存储于区块链中,即使在跨域资源分配的场景下,这些信息也无法被篡改,同时在资源拍卖前基于这些信息进行可信检查,解决资源共享过程中各方信任缺失问题。

3) 通过性能分析验证了网络中资源瓶颈对系统性能与资源分配结果的影响,将本文所提算法与传统资源分配算法进行比较,验证本文模型有效提高了系统性能以及资源利用率。

## 1 系统模型

### 1.1 计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型

本文提出的基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型如图 1 所示。模型主要包括用户、服务提供者(SP, service provider)、边缘计算节点、无线通信基站、区块链平台(由区块链节点组成)。其中,服务提供者是参与拍卖的买方主体,收到用户服务请求后购买所需资源,边缘计算节点与无线通信基站作为资源拥有者即卖方,向区块链提交收集到的信息并参与拍卖。拍卖基于区块链进行,并可随时查询存储于区块链账本中的各节点信息,确保买卖双方可信。区块链接收到买方资源请求和卖方资源信息与报价后,自动触发双向拍卖智能合约,进行资源分配。同时,资源分配结果将向全网广播,保证资源分配结果的透明性及可靠性。

考虑一个移动边缘计算场景,其中多个边缘计算节点构成 MEC 聚类,令  $M$  为此聚类中的边缘计算节点集合,  $R$  为不同计算资源类型集合(如 CPU 资源、存储资源),  $C_{m,r}^{MEC}$  为边缘计算节点  $m \in M$  中类型为  $r \in R$  的资源可用容量,由于本文模拟一个

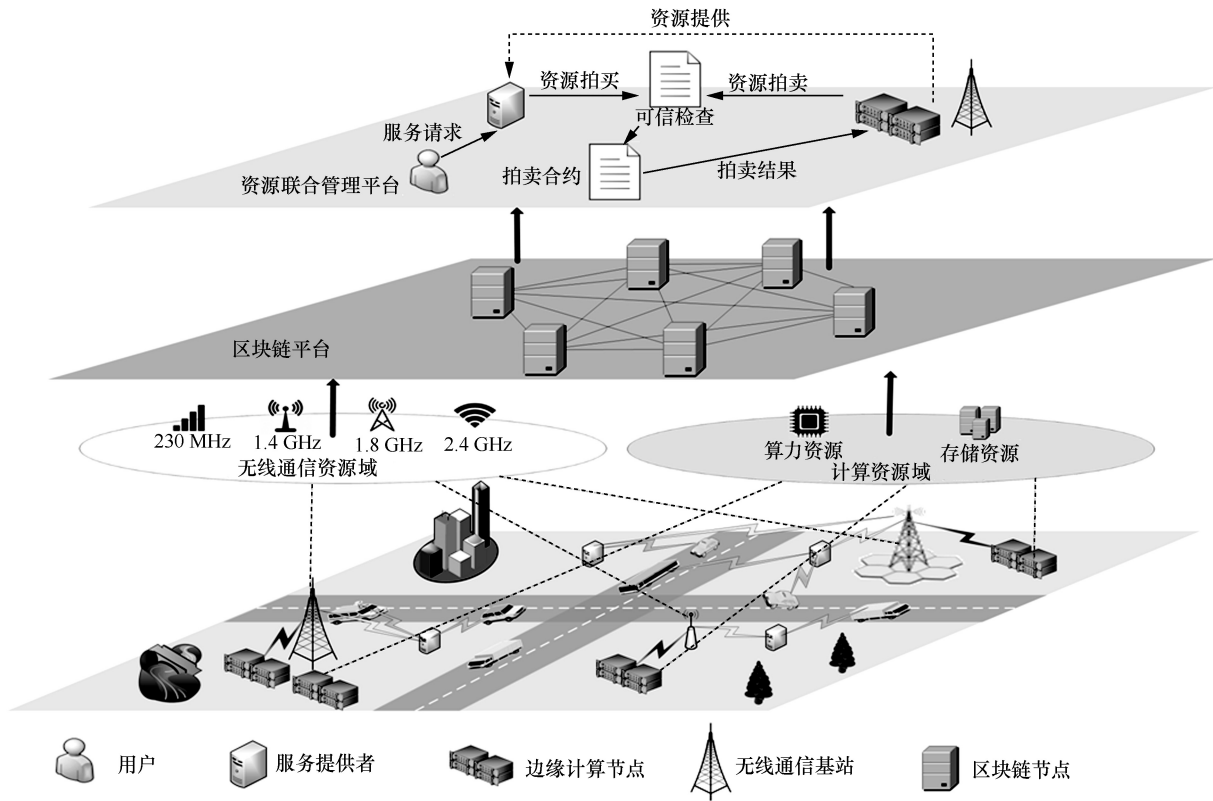


图 1 基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型

异构的 MEC 集群，因此原则上  $C_{m,r}^{MEC}$  各不相同。考虑一个无线接入网络，边缘计算系统中的用户可以通过无线接入网络将工作上传到边缘计算节点中。令  $W$  为可用于访问 MEC 聚类的无线通信基站集合， $C_w^{RAN}$  为基站  $w \in W$  可用的无线通信资源容量。服务提供者以网络切片的形式拥有计算和无线通信资源的虚拟捆绑包，并使用这些资源为用户提供特定的 MEC 服务。独立于网络中不同的域，向同一服务提供者请求的服务因其工作内容相同，往往也会表现出相同的资源需求。令  $S$  为服务提供者集合，对于特定服务提供者  $s \in S$ ，本文将  $c_{s,r}^{MEC}$  定义为完成  $s$  的一项工作所需的  $r$  型计算资源量，同样， $c_{s,w}^{RAN}$  表示通过基站  $w$  上传  $s$  的工作所需的无线通信资源量，这 2 个参数表示最少为特定工作分配多少资源量即可使其正常运行。本文将这些参数用于描述特定服务类型。值得注意的是，鉴于 MEC 应用种类繁多，服务可以呈现不同的需求描述，可能有 CPU 密集型服务，其 CPU 需求可能相对高于其内存需求，或者工作有效载荷大于其他有效载荷的网络密集型服务，因此需要更高的频谱资源分配，即频谱密集型服务。在第 3 节的实验中，本文将配置

不同的资源需求数量来模拟现实中的多种服务类型。系统参数及其相关含义如表 1 所示。

表 1 系统参数及其相关含义

参数	含义
$M$	边缘计算节点集合
$W$	无线通信基站集合
$R$	计算资源类型集合
$S$	服务提供者集合
$C_{m,r}^{MEC}$	边缘计算节点 $m$ 中类型为 $r$ 的资源可用容量
$C_w^{RAN}$	基站 $w \in W$ 可用无线通信资源容量
$c_{s,r}^{MEC}$	完成 $s$ 的一项工作所需的 $r$ 型计算资源量
$c_{s,w}^{RAN}$	通过基站 $w$ 上传 $s$ 的工作所需的无线通信资源量
$u_{s,m,r}$	$m$ 中保留给 $s$ 的 $r$ 型计算资源数量
$v_{s,w}$	无线通信基站 $w$ 中分配给服务提供者 $s$ 的网络资源
$H_s^{MEC}, H_s^{RAN}$	$s$ 在各资源域中同时执行的最大作业数
$U_s, V_s$	计算与无线通信资源分配方案
$f_s$	服务提供者的效用
$B_s$	服务提供者参与资源交易的预算

令  $u_{s,m,r}$  为边缘计算节点  $m$  中保留给服务提供者  $s$  的  $r$  型计算资源的数量, 对于任何资源  $r$ ,  $\frac{u_{s,m,r}}{c_{s,r}^{\text{MEC}}}$  表示  $s$  的并发作业的最大数量。由于并发执行工作的实际数量受瓶颈资源的限制, 因此本文必须考虑所有计算资源中最稀缺的类型。通过对系统中的节点求和, 本文获得了服务提供者  $s$  在 MEC 域中可以接受的性能同时执行的最大作业数, 即

$$H_s^{\text{MEC}}(U_s) = \sum_{m \in M} \min \left\{ \frac{u_{s,m,r}}{c_{s,r}^{\text{MEC}}} \right\} \quad (1)$$

其中,  $U_s$  表示特定计算资源分配方案。

同样, 通过将  $v_{s,w}$  设为无线通信基站  $w$  中分配给服务提供者  $s$  的网络资源, 可以将  $v_{s,w}$  与  $c_{s,w}^{\text{RAN}}$  之间的比率确定为可以通过基站  $w$  同时发送到的服务提供者  $s$  的最大工作负载数。综合系统中的所有基站, 本文可以得出在给定的网络资源分配方案  $V_s$  下通过 RAN 域上传到服务提供者  $s$  的最大作业数, 即

$$H_s^{\text{RAN}}(V_s) = \sum_{w \in W} \left\{ \frac{v_{s,w}}{c_{s,w}^{\text{RAN}}} \right\} \quad (2)$$

最后, 由于并发执行的作业数受性能最低的资源域的限制, 不能超过在性能最低域内所能执行的任务数, 因此本文可以将服务提供者的效用, 即服务提供者所能并发执行的最大作业数表示为

$$f_s(U_s, V_s) = \min \{ H_s^{\text{MEC}}(U_s), H_s^{\text{RAN}}(V_s) \} \quad (3)$$

因此, 系统性能可由各服务提供者效用得出, 本文定义单个服务提供者的效用为其预算与所执行作业数相乘, 则系统整体效益的优化目标函数可表示为

$$\max \sum_{s \in S} B_s f_s \quad (4)$$

其中,  $B_s$  为服务提供者  $s$  参与资源交易的预算, 由所收到的服务请求的预算综合确定, 特定服务的预算与其重要性相关并事先确定, 即服务重要性越高预算也就越高, 所能购买的资源越多。

该模型优化目标函数旨在考虑系统性能瓶颈的前提下最大化系统效益, 以服务提供者的预算为其所执行的作业数加权, 预算越高则优先级越高, 能为系统带来的效益越高。

在此模型中, 本文希望服务提供者成为理性的代理, 所有这些服务提供者的目标都是在预算约束下购买资源, 同时可实现最大化系统效用 (即最大化同时可执行的工作数量) 的资源组合来追求其利

益。每个提供者的预算额都具有执行服务优先级的附加功能。例如, 假设 2 个服务提供者具有相同的需求特征, 但预算不同, 则预算较高的服务提供者将受到市场模型的青睐, 因为它有能力购买更大的资源包, 即能为系统总体效用提供更大贡献。

为保证  $f_s$  为整数, 避免理论效益与实际效益产生偏差, 令  $h_{s,m}$  为在边缘计算节点  $m$  中执行的服务提供者  $s$  所执行的并发任务数 (整数),  $h_{s,w}$  为服务提供者  $s$  通过无线通信基站  $w$  同时上传的任务数量 (整数), 该优化模型的约束为

$$\begin{aligned} \text{s.t. } C_1 : h_{s,m} &\leq \frac{u_{s,m,r}}{c_{s,r}^{\text{MEC}}} \\ C_2 : h_{s,w} &\leq \frac{v_{s,w}}{c_{s,w}^{\text{RAN}}} \\ C_3 : f_s &\leq \sum_{m \in M} h_{s,m} \\ C_4 : f_s &\leq \sum_{w \in W} h_{s,w} \\ C_5 : \sum_{s \in S} u_{s,m,r} &\leq C_{m,r}^{\text{MEC}} \\ C_6 : \sum_{s \in S} v_{s,w} &\leq C_w^{\text{RAN}} \\ C_7 : u_{s,m,r}, v_{s,w}, h_{s,m} &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 约束  $C_1$  代表服务提供者  $s$  在边缘计算节点  $m$  中所执行的任务数量不能超过  $m$  分配给其的计算资源限制; 约束  $C_2$  代表服务提供者  $s$  通过基站  $w$  上传的任务数不能超过  $w$  分配给其的通信资源限制; 约束  $C_3$  代表服务提供者  $s$  的效用, 即完成的任务总量不能超过在边缘计算节点  $m$  中执行的任务总量; 约束  $C_4$  代表服务提供者  $s$  完成的任务总量不能超过分配给其的无线通信资源的限制; 约束  $C_5$  和  $C_6$  分别代表分配给所有服务提供者的计算资源与无线通信资源总量不能超过网络中计算资源与无线通信资源存量的限制; 约束  $C_7$  代表分配给各服务提供者的资源数量与边缘计算节点  $m$  执行的任务数量为正数。

在双向拍卖中, 买方希望为获得所需资源而付出的价格尽量低, 卖方则希望售出的资源能获得更高的利润, 即成交价尽量高, 因此双向拍卖追求更高的买方价格与更低的卖方价格达成交易。假设在某轮拍卖中共有  $n$  笔交易达成, 在第  $i$  笔拍卖交易中某买方  $s$  以  $p_{s,i}$  的出价与出价为  $q_{m,i}$  的卖方  $m$  达成交易, 则拍卖模型可表示为

$$\max \sum_{i=1}^n (p_{s,i} - q_{m,i}) \quad (6)$$

该拍卖模型服从以下约束

$$\begin{aligned} \text{s.t. } C_8 : \sum_{i=1}^n p_{s,i} &\leq B_s \\ C_9 : p_{s,i}, q_{m,i} &\geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

其中,约束  $C_8$  代表买方所有出价的总和不能超过其预算限制;约束  $C_9$  保证买卖双方出价为正数。

式(4)为系统性能的优化函数,式(6)为拍卖过程中的买卖双方收益优化函数,本文系统希望同时优化这 2 个指标,并保证系统性能与买卖双方收益的最大化。

## 1.2 资源调度流程

由于边缘环境中各类资源分布零散,因此本文在系统中设置了网络管理员,统一管理一定范围内的资源,并根据管理范围内的资源存量进行资源定价,作为资源拥有者的代理,以卖方身份参与资源拍卖。

另一方面,服务提供者购买资源为用户提供特定服务,即作为用户的代理以买方的身份参与资源拍卖。

基于该模型的双向拍卖资源分配流程主要包括拍卖准备阶段、报价提交阶段、拍卖合约执行阶段和资源分配阶段。

1) 拍卖准备阶段。用户根据所需服务向特定服务提供者请求服务,服务提供者根据收到的服务请求确定参与拍卖的预算。边缘计算节点与无线通信基站确定参与此次拍卖的资源量后将其提交给网络管理员,网络管理员根据资源存量确定资源定价。同时,用户将所需服务及对应资源需求提交到区块链节点,边缘计算节点与无线通信基站将参与拍卖的资源信息存储于区块链中,方便智能合约对买卖双方提交的信息进行检查。区块链借助其信息不可篡改的性质可有效保护这些信息,防止恶意节点篡改相关信息,影响拍卖阶段的可靠检查流程。

2) 报价提交阶段。拍卖开始之前买卖双方向区块链节点提交资源与报价信息,这些信息将被记录于区块链中留待拍卖合约的调用。服务提供者(买方)提交此次拍卖所需购买的资源以及对各类资源的报价,网络管理员(卖方)提交参与此次拍卖的资源数量以及对其的出价。

3) 拍卖合约执行阶段。每隔一段时间拍卖合约自动触发并获得买卖双方提交的资源与报价信息。

合约从区块链中查询用户所需服务信息、边缘计算节点与无线通信基站资源存量,并与买卖双方所提交的数据进行核对,核对一致后合约确定当前参与拍卖的节点可信,根据各方报价,按照资源分配算法确定最优分配方案,得出拍卖结果。智能合约借助其自动执行且不可逆的优势,保证交易过程不受外界干扰,可保障交易的公平性、有效性。

4) 资源分配阶段。拍卖结束之后买卖双方得和资源分配方案,网络管理员进行网络资源的具体分配,资源提供者向对应买家即服务提供者提供对应资源,服务提供者获得对应资源后向用户提供所需服务。资源分配方案将被存储于区块链中,所有流程信息公开透明,受所有节点共同监督,且不会被篡改,可有效解决参与资源交易的节点间的信任问题。

考虑到资源分配方案的时效性,网络中的资源需求和资源拥有者对资源的定价会随着时间变化。网络中的用户会随时提出新的服务请求,服务提供者也就会产生资源需求的变化;同时,随着网络中分配出去的资源被利用完毕,空闲资源存量发生变化,网络管理员也会根据资源存量变化动态调整资源定价以获得更高收益<sup>[21]</sup>。最优资源分配方案也将随之变化,因此本文模型将在每轮拍卖中对资源进行重新分配。每轮拍卖结束后的一段时间内,网络中的用户将会提出新的服务请求,产生新的资源需求,对于预算更高(即优先级更高)的任务,本文拍卖模型将采用抢占式资源分配方式,将已分配给较低优先级任务的资源重新分配给较高优先级任务,待高优先级任务执行完成后再将资源返还给低优先级任务。同时,每轮拍卖后资源拥有者将根据网络中资源需求与存量情况调整资源定价,同样影响下一轮的资源分配结果。

## 1.3 资源交易联盟区块链

公有区块链和联盟(或私有)区块链是区块链现有的 2 种形式。边缘计算环境下一些设备无法满足公有区块链资源需求,如工作量证明(PoW, proof of work)共识的高资源需求。此外,对于公有区块链,大量的边缘计算设备使交易验证效率较低。与公有区块链相比,联盟区块链中的交易验证只需要预先选择高功率节点,其成本更小,效率更高<sup>[22]</sup>,因此,本文利用联盟区块链构建资源交易平台。

除此之外,传统的 PoW 共识将会消耗大量的能量,共识效率低;而权益证明(PoS, proof of stake)

共识虽然提高了共识效率、降低了计算成本，同时也面临着无利害攻击、长程攻击等安全威胁，因此本文所设计的区块链系统采用文献[23]提出的交易量证明 (PoT, proof of trading) 共识。PoT 共识结合 2 种传统共识机制，在保证安全性的前提下提高了共识的效率。

在本文的资源交易系统中，区块链节点作为连接服务提供者与资源拥有者的桥梁，应当证明区块链节点促进了成功的资源交易而不是在 PoW 共识中单纯地解决了一个哈希谜题，对于某区块链节点，PoT 共识以一段时间内成功完成的交易量为其股权，根据股权动态调整求解哈希谜题的难度，交易量越多求解难度越低，该节点也就越容易获得记账权。通过这一方式，PoT 共识大大提高了共识效率，降低了共识的能量消耗，更适用于边缘计算场景与时延敏感型业务。

## 2 算法设计

基于以上系统模型，本文利用智能合约设计了计算与无线通信资源联合管理分配算法，算法流程如图 2 所示，主要包括拍卖前的可信检查和资源拍卖 2 个部分。

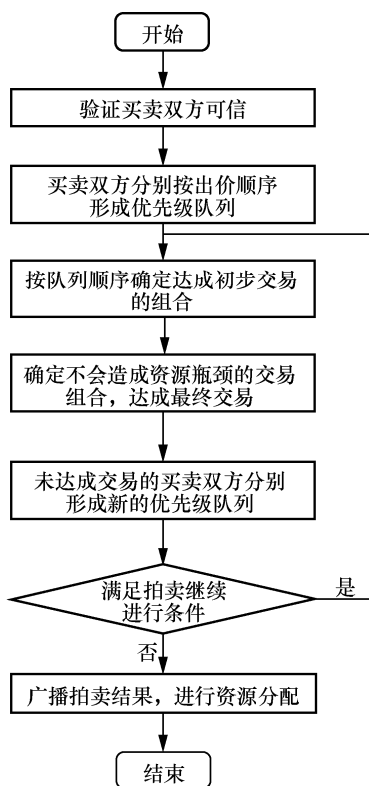


图 2 基于智能合约的计算与无线通信资源联合管理分配算法流程

### 2.1 可信检查

拍卖合约确认拍卖双方可信主要包括 2 个流程，1) 服务请求方 (用户) 和资源拥有者 (边缘计算节点与无线通信基站) 向区块链上传自身服务需求或资源存量信息，2) 智能合约从区块链中获取这些数据并与拍卖双方代理 (各服务提供者与网络管理员) 所提交的报价、资源量进行对比，保证买方所提交的预算、资源需求量符合用户的实际服务需求，卖方所提交的参与拍卖的资源量符合实际情况，随后开始拍卖流程。

用户需同时向区块链发送自身所需服务信息，由于同种服务类型具有相同的资源需求量与预算，因此拍卖合约可根据用户所需的服务信息确定买方所需资源总量与预算，保证买方未伪造自身资源需求与预算来获得更多资源分配量。资源拥有者同时向网络管理员和区块链提供自身所能提供的资源信息，拍卖合约通过查询区块链获取资源拥有者的实际资源存量，与卖方所提交的资源存量进行对比，保证卖方未伪造资源存量以获得额外收益或影响实际资源分配。

作为一个分布式账本，区块链中的数据由链上所有节点共同拥有和维护，同时区块链的共识机制使网络中节点对信息的修改需获得其他节点的同意，保证了数据的真实可靠与不可篡改性。因此采用区块链可有效保证拍卖合约准确判断参与拍卖节点的可信性，排除不可信节点，保证资源分配有效进行。

### 2.2 联合管理双向拍卖算法

在传统双向拍卖中，买卖双方提交报价后，拍卖算法将买方报价降序排序，卖方报价升序排序，即买方出价越高优先级越高，卖方出价越低优先级越高，按照此规则确定拍卖最终结果。但如第 1 节中所述，不同域的资源与同域不同类资源分配场景中，资源瓶颈的问题影响着系统整体性能，因此不能仅考虑单种资源拍卖结果，也需考虑该分配方式下资源瓶颈带来的影响。因此本文提出了多资源联合管理双向拍卖 (JMDA, joint management double auction) 算法。

通过分析可知，并发执行的作业数受到性能最低域的限制，因此本文分配算法首先找到性能最低的资源域，以服务提供者对该资源的需求量进行加权，得到新的优先级，并以此得到拍卖的最终结果。因对某种资源需求越高或是系统资源量越少，则在

某项资源上等候时间越长, 该资源域性能也就越低, 因此可用某种资源的需求指数来找到性能最低的资源域。

令  $D_r^{\text{MEC}}$  为计算资源域中所有边缘计算节点的  $r$  型计算资源总量,  $n_{s,r}^{\text{MEC}}$  为某服务提供者所需要的  $r$  型计算资源总量, 则在系统中  $r$  型计算资源的需求指数  $N_r^{\text{MEC}}$  可表示为

$$N_r^{\text{MEC}} = \frac{D_r^{\text{MEC}}}{\sum_{s \in S} n_{s,r}^{\text{MEC}}} \quad (8)$$

同理, 在无线通信资源域中,  $D_w^{\text{RAN}}$  为无线通信资源域中所有无线通信资源总量,  $n_{s,w}^{\text{RAN}}$  为某服务提供者所需要的无线通信资源总量, 系统对无线通信资源的需求指数  $N_w^{\text{RAN}}$  可表示为

$$N_w^{\text{RAN}} = \frac{D_w^{\text{RAN}}}{\sum_{s \in S} n_{s,w}^{\text{RAN}}} \quad (9)$$

按照系统内各类资源排序后得出最易产生资源瓶颈的资源类型, 按照各个服务提供者对该资源的需求数进行加权得到加权预算, 即新的优先级, 并以此确定拍卖的胜者。当  $r$  型计算资源或  $w$  型无线通信资源成为资源瓶颈时, 加权预算  $B'_s$  可分别由式(10)和式(11)得出。

$$B'_s = \frac{B_s}{n_{s,r}^{\text{MEC}}} \quad (10)$$

$$B'_s = \frac{B_s}{n_{s,w}^{\text{RAN}}} \quad (11)$$

得出新的买方预算后将买方预算按降序排列形成买方优先级队列  $P_b$ , 同时将不同种类资源卖方的报价按照升序分别排列形成多个卖方优先级队列  $P_{s,r}$  与  $P_{s,w}$ 。拍卖流程开始后, 买方选择资源量符合自身需求且优先级最高的卖方, 卖方将在选择自身的买家中挑选优先级最高, 即预算最高的买方。为避免资源死锁, 只有在某轮拍卖中所有资源需求都得到满足的买方才可与各卖方达成交易, 未能满足所有资源需求的买方即使被某卖方选择, 也无法与其达成交易。未达成交易的买卖双方将形成新的优先级队列  $P'_b$ 、 $P'_{s,r}$  与  $P'_{s,w}$ , 达成交易的卖方若还有资源存量, 则更新本轮拍卖后自身剩余资源, 并加入优先级队列中开始下一轮拍卖, 若在某轮中没有达成任何交易或产生的优先级队列有一个为空, 则结束此次双向拍卖流程。因此最终的资源联合管

理双向拍卖算法如算法 1 所示。

**算法 1** 资源联合管理双向拍卖算法

查询所需数据, 初始化  $D_r^{\text{MEC}}$ 、 $D_w^{\text{RAN}}$ 、 $n_{s,r}^{\text{MEC}}$ 、

$n_{s,w}^{\text{RAN}}$ ;

1) 根据式(8)~式(9)计算所有类型的资源需求指数  $N_r^{\text{MEC}}$  与  $N_w^{\text{RAN}}$ ;

2) 将需求指数排序, 找出成为性能瓶颈的资源类型;

3) 根据式(10)和式(11)对买方预算进行加权, 更新参与拍卖的实际预算;

4) 按照买卖双方报价排序生成优先级队列  $P_b$ 、 $P_{s,r}$  与  $P_{s,w}$ ;

5) 循环

6) 根据  $B_s$  确定买方购买各项资源的预算  $p_{s,i}$ , 根据式(6)确定双向拍卖初步匹配结果;

7) 检查初步匹配后各买家资源需求, 如果某买方所有资源需求均达成匹配, 则确定与对应资源买方达成交易, 更新资源量  $D_r^{\text{MEC}}$  与  $D_w^{\text{RAN}}$ ;

8) 否则该买方本轮交易失败;

9) 未达成交易的买卖双方形成新的优先级队列  $P'_b$ 、 $P'_{s,r}$  与  $P'_{s,w}$ , 达成交易的卖方更新资源存量并加入新的优先级队列;

10) 直到本轮未达成交易或优先级队列有一个为空, 循环结束。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真参数配置

本文仿真所构建的网络采用 CPU 资源与存储资源代表 2 种不同的计算资源。为表现网络中不同服务需求的资源异质性, 本文定义了 4 种不同的服务模板, 这 4 种模板分别代表了边缘计算中可能出现的 4 种不同服务配置, 其中, 3 种按照对某种资源的大量需求, 分为 CPU 密集型服务、存储密集型服务和频谱密集型服务, 另外一种为各类资源均有较高需求的均衡型服务。表 2 列出了这些服务模板的具体数值配置。

**表 2** 服务模板的具体数值配置

服务模板名称	$c_{s,\text{CPU}}^{\text{MEC}}$ / 个	$c_{s,\text{MEM}}^{\text{MEC}}$ / GB	$c_{s,w}^{\text{RAN}}$ / MHz	$B_s$ / 个
CPU 密集型	4	8	3	10
存储密集型	1	32	3	10
频谱密集型	1	8	10	15
均衡型	5	40	5	20

其中,  $c_{s,CPU}^{MEC}$  和  $c_{s,MEM}^{MEC}$  分别代表该服务所需的 2 种计算资源数目,  $c_{s,w}^{RAN}$  则代表了该种服务所需要的频谱资源。

对于卖方, 即各类资源拥有者, 本文构建了异构网络基站与计算资源节点组成的 MEC/RAN 系统。对于 MEC 域, 本文确定了两类边缘计算节点, 一类是具有更多 CPU 资源的 CPU 节点, 另一类是具有更多存储资源的存储节点; 对于 RAN 域, 本文确定了可提供 40 MHz 的大无线通信基站与可提供 20 MHz 的小无线通信基站。边缘计算节点与无线通信基站的具体配置如表 3 所示。

表 3 边缘计算节点与无线通信基站的具体配置

名字	CPU 资源量/个	存储资源量/GB	频谱资源量/MHz
CPU 节点	32	128	—
存储节点	16	256	—
大基站	—	—	40
小基站	—	—	20

本文所构建的网络包括 5 个 CPU 节点与 5 个存储节点, 同时配置大小无线通信基站各 2 个。

### 3.2 系统性能对比

在实验的每次流程中, 若干上述服务模板中包含的服务将被随机分配给 15 个不同的服务提供者, 模仿不同用户向服务提供者发出服务请求。同一服务提供者可能收到多个服务请求, 模仿网络中多个用户向同一服务提供者发出请求的情况。

本文使用系统整体效率观察系统整体性能, 定义系统整体效率为一次资源分配后成功执行的任务收益总量与网络中所被请求的任务收益总量之比, 在系统整体可提供资源数量固定的情况下, 采取不同资源分配策略, 执行相同系列任务的效率越高, 则采用该算法的系统性能越高。

本文将所提出的 JMDA 算法与已有研究中的单轮双向拍卖 (SRDA, single round double auction) 算法与动态价格双向拍卖 (DPDA, dynamic price double auction) 算法<sup>[24]</sup>进行对比。SRDA 算法只进行一轮拍卖就结束拍卖流程, 能在短时间内达成交易匹配, 同时采用 VCG 机制抑制买方伪造资源需求的行为; DPDA 算法在拍卖过程中动态调整各方的出价进行多轮拍卖, 以达成更多的交易匹配数量。以上 2 种算法均将不同资源的交易当作独立的过程, 而 JMDA 算法考虑了稀缺资源对任务执行的影响, 将不同类型

资源进行联合管理, 减少了资源的浪费; 同时, JMDA 算法通常连续进行多轮拍卖, 提升了资源交易达成数量。系统整体效率对比如图 3 所示。

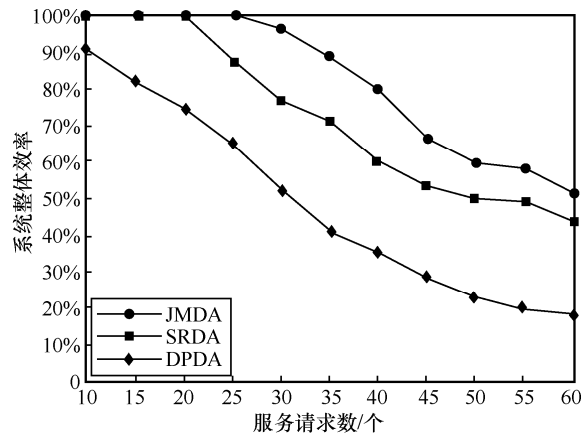


图 3 系统整体效率对比

对 3 种算法对比分析可知, 随着服务请求数不断提升, 采用 SRDA 算法和 DPDA 算法的系统因未考虑资源瓶颈的影响, 整体效率迅速降低, 而 JMDA 算法则可有效避免资源瓶颈并保持高效率, 之后效率则会受系统资源总量限制而下降。其中, SRDA 算法因仅进行一轮拍卖, 大量买卖双方单轮交易中难以达成交易, 造成其系统整体效率长期处于较低状态。

在本节仿真环境中, 由于系统中资源存量相同, 系统效率越高也就意味着系统中的资源得到了更好的利用, 当系统整体效率无法达到 100% 时, 意味着使用这种算法的系统性能达到极限, 无法利用系统资源完成当前所有任务。由图 3 可知, 使用其他 2 种算法的系统均比使用本文算法的系统更快达到性能极限; 在服务请求数达到 30 之后, 3 种算法的系统效率都不足 100%, 而使用本文算法的系统性能始终高于其他 2 种系统。以上两点说明本文算法提高了系统的资源利用率。

### 3.3 系统性能与预算的关系

为了验证系统中买方预算对资源分配的影响, 本文使用 JMDA 算法分别从系统角度和单个服务的角度进行对比分析。在实验中, 本文固定总服务请求数为 60, 保持其他类型服务的预算不变, 逐渐增加前述 CPU 密集型服务的预算, 得到的系统整体效率随预算变化如图 4 所示, 随着 CPU 密集型服务的预算不断提升, 系统更倾向于将资源分配给该服务, 而该服务仅需少量资源即可创造较高的收益, 相较于高资源需求型服务可有效

提高系统整体效率。存储密集型与频谱密集型服务因为与 CPU 密集型服务类似也仅需相对少的资源即可创造较高收益，因此保持其他服务的预算不变，这 2 种服务中的某种服务预算升高时，同样将使系统整体效率提高，但若均衡型服务获得更高的预算，系统整体效率将因其大量的资源需求而降低。

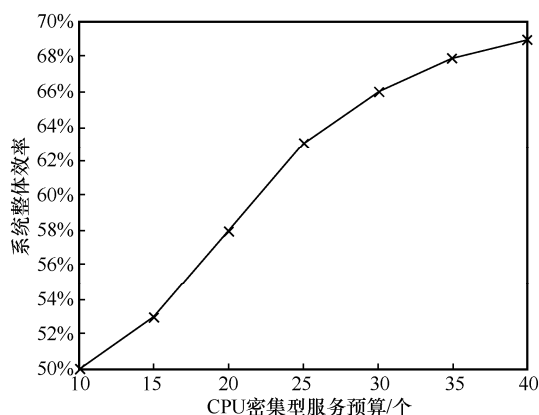


图 4 系统整体效率随 CPU 密集型服务预算变化

单个服务完成数随 CPU 密集型服务预算变化如图 5 所示。随着 CPU 密集型服务预算的增加，该服务被分配越来越多的资源，证明了 JMDA 算法的预算优先级效应，均衡型服务因在相同资源分配情况下所能提供的效益远小于 CPU 密集型，被分配的资源越来越少。

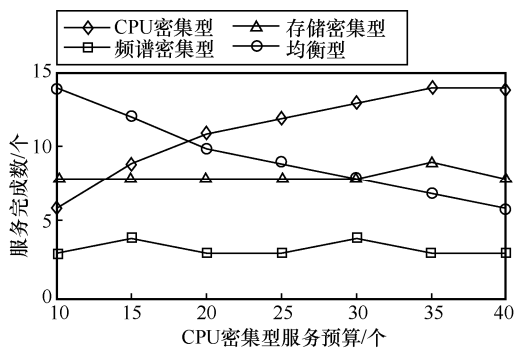


图 5 单个服务完成数随 CPU 密集型服务预算变化

### 3.4 系统性能与资源量的关系

图 6 和图 7 给出了使用 JMDA 算法的系统中，频谱密集型服务和均衡型服务的服务完成数随系统中计算资源和无线通信资源节点数目的变化。保持系统中无线通信资源节点数目不变，计算资源的逐步减少使其成为系统性能瓶颈，由于均衡型服务需要大量计算资源而频谱密集型服务仅需

少量计算资源，因此算法初始时更多地将资源分配给频谱密集型服务。当计算资源数量下降到一定程度时，频谱密集型服务的完成数也开始受到影响。保持计算资源数量不变，无线通信资源逐渐成为性能瓶颈，由于 2 种服务均有较高的无线通信服务需求，因此其完成数均有所降低。

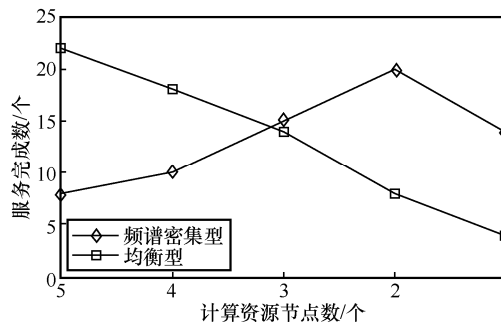


图 6 服务完成数随计算资源节点数目变化

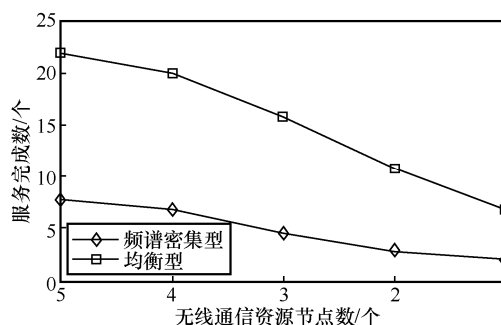


图 7 服务完成数随无线通信资源节点数目变化

本节以频谱密集型与均衡型服务为例证明了系统存在性能瓶颈并且 JMDA 算法能根据系统资源数量的变化捕捉性能瓶颈的变化情况，灵活变化资源分配方案。

除此之外，CPU 密集型与存储密集型服务同样对计算资源有较高需求，因此在计算资源减少的情况下其与图 6 中的均衡型服务类似，完成数有所降低，而这 2 种服务对无线通信资源需求较少，因此当无线通信资源节点减少时，它们的完成数变化趋势将与图 6 中的频谱密集型服务类似，先获得更高的完成数，当无线通信资源降低到一定程度影响任务正常完成时其完成数开始降低。

### 3.5 抵抗恶意节点能力分析

为验证本文所提基于区块链的资源联合管理系统可有效避免恶意节点的影响，本文在 3.2 节的网络环境基础上引入恶意节点，在 15 个服务提供者节点中将会有 5 个恶意节点，虚报自身的预算与

资源需求，其数值为实际预算与资源需求的 2 倍，以获得更高的资源分配，提升自身性能。本文实现了基于区块链的资源联合管理系统，并在该网络环境中与包含区块链的资源联合管理系统进行对比，2 种系统执行任务情况如图 8 所示。

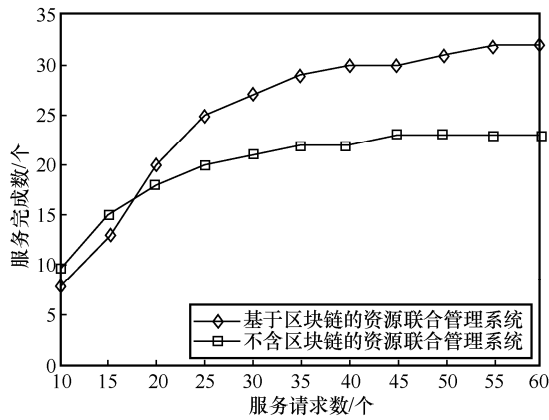


图 8 2 种系统执行任务情况

对比 2 种系统的任务执行情况可知，早期服务请求数较少，系统中资源富余，即使恶意节点多占据了一些资源，其他正常节点依旧能正常完成任务，而基于区块链的资源联合管理系统由于排除掉恶意节点，恶意节点所被分配的任务无法正常完成，因此其任务完成数略低于不含区块链的系统。随着服务请求数增长，系统中资源存量紧张，不含区块链的系统中大量资源被恶意节点占据，无法被有效利用，系统任务执行能力迅速达到瓶颈，而基于区块链的系统可检查出恶意节点并将其排除，任务执行能力保持较高水准。

为了验证恶意节点数对系统的影响，本文保持服务请求数为 60 不变，改变恶意节点数，得出的系统执行任务情况对比如图 9 所示。

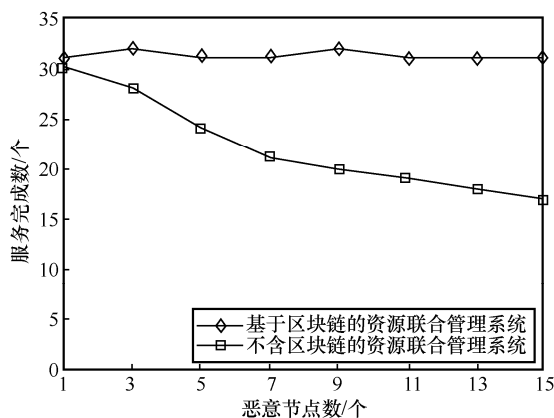


图 9 恶意节点数对系统执行任务情况的影响

由图 9 可知，随着恶意节点数的增加，基于区块链的系统并不受其影响，可保持较强任务执行能力，而不含区块链的系统受恶意节点影响逐渐增大。可以预见的是，当恶意节点更大幅度地虚报自身预算与资源需求时，更多的资源被恶意节点占据，系统的任务执行能力将进一步降低。

### 3.6 安全性与可信性分析

本文所提出的资源联合管理模型通过引入区块链，保证了资源分配过程的安全性与各分配主体间的信任，主要有以下结论与分析证明。

#### 1) 资源分配流程透明，不存在分配不均情况

**证明** 在本文所提出的资源联合管理模型中，资源分配的全流程将被记录于区块链中，作为一种分布式账本技术，区块链中存储的资源分配信息公开可查阅，受各方监督，其内容由分布式的区块链节点共同维护，无法被篡改，避免了传统集中式资源分配方式中分配流程不透明带来的信任与资源分配公平性问题。证毕。

#### 2) 资源分配过程可避免恶意买卖双方影响正常资源交易

**证明** 通过 2.1 节所述的可信检查环节及其分析可知，拍卖合约可对服务提供者（买方）与网络管理员（卖方）所发出的交易请求信息进行检查，与底层用户、资源拥有者所提供的服务请求与资源存量信息进行核对，这些信息被存储于区块链中，即使是恶意节点也无法篡改。若有恶意买卖双方伪造自身交易信息，企图获得更高收益或影响正常网络资源分配，合约可检查出这些恶意节点并取消其交易资格。因此本文所提出的资源联合管理模型可避免恶意节点影响，保证网络资源分配的安全性与买卖双方的可信性。证毕。

## 4 结束语

在各类场景中，随着时延敏感型应用需求的不断增长，边缘计算愈发得到广泛应用。而在移动边缘计算中，资源瓶颈的存在导致资源分配方案不能仅考虑单种资源分配情况，更需对计算与无线通信资源进行综合管理。同时，随着边缘计算的广泛应用，恶意节点的出现也对资源合理分配提出了挑战。为解决这个问题，本文提出了基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型，并基于此模型提出了多资源联合管理的

拍卖算法,同时,区块链有效遏制了恶意节点对资源分配的影响。性能分析部分验证了本文算法有效提高了系统整体性能并降低了恶意节点的影响。下一步工作中,笔者将进一步优化资源分配算法,提高系统性能。

### 参考文献:

- [1] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al. Mobile edge computing: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(1): 450-465.
- [2] SIRIWARDHANA Y, PORAMBAGE P, LIYANAGE M, et al. A survey on mobile augmented reality with 5G mobile edge computing: architectures, applications, and technical aspects[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 1160-1192.
- [3] PRIYA B, SRI R, NIMMAGADDA A, et al. Mobile edge communication an overview of MEC in 5G[C]//*Proceedings of 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 271-276.
- [4] MORO E, FILIPPINI I. Joint management of compute and radio resources in mobile edge computing: a market equilibrium approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021: doi.org/10.1109/TMC.2021.3091764.
- [5] KONG M, ZHAO J H, SUN X K, et al. Secure and efficient computing resource management in blockchain-based vehicular fog computing[J]. *China Communications*, 2021, 18(4): 115-125.
- [6] 徐旭, 钱丽萍, 吴远. 基于移动边缘计算的区块链计算资源分配和收益分享研究[J]. *计算机科学*, 2021, 48(11): 124-132.  
XU X, QIAN L, WU Y. Computation resource allocation and revenue sharing based on mobile computing for blockchain[J]. *Computer Science*, 2021, 48(11): 124-132.
- [7] 陈曦, 沈苏彬. 一种基于区块链的存储资源可信分配方法[J]. *计算机技术与发展*, 2022, 32(2): 130-136.  
SHEN X, SHEN S. A storage resource allocation method based on blockchain[J]. *Computer Technology and Development*, 2022, 32(2): 130-136.
- [8] LIETO A, MALANCHINI I, MANDELLI S, et al. Strategic network slicing management in radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(4): 1434-1448.
- [9] JIANG M L, CONDOLUCI M, MAHMOODI T. Network slicing in 5G: an auction-based model[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [10] NAVEEN K P, SUNDARESAN R. Double-auction mechanisms for resource trading markets[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2021, 29(3): 1210-1223.
- [11] HE Y, WANG Y H, QIU C, et al. Blockchain-based edge computing resource allocation in IoT: a deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(4): 2226-2237.
- [12] HUANG Y D, ZHANG J R, DUAN J, et al. Resource allocation and consensus of blockchains in pervasive edge computing environments[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, 21(9): 3298-3311.
- [13] BOATENG G O, AYEPAH-MENSAH D, DOE D M, et al. Blockchain-enabled resource trading and deep reinforcement learning-based autonomous RAN slicing in 5G[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(1): 216-227.
- [14] SUN W J, ZHANG H X, WANG L Y, et al. Profit maximization task offloading mechanism with D2D collaboration in MEC networks[C]//*Proceedings of 2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [15] ZHANG X Z, ZHANG H X, ZHOU X T, et al. Energy minimization task offloading mechanism with edge-cloud collaboration in IoT networks[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [16] CABALLERO P, BANCHS A, DE VECIANA G, et al. Network slicing games: enabling customization in multi-tenant mobile networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(2): 662-675.
- [17] CABALLERO P, BANCHS A, VECIANA G D, et al. Network slicing for guaranteed rate services: admission control and resource allocation games[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(10): 6419-6432.
- [18] SARDELLITTI S, SCUTARI G, BARBAROSSA S. Joint optimization of radio and computational resources for multicell mobile-edge computing[J]. *IEEE Transactions on Signal and Information Processing Over Networks*, 2015, 1(2): 89-103.
- [19] NGUYEN D T, LE L B, BHARGAVA V. Price-based resource allocation for edge computing: a market equilibrium approach[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2021, 9(1): 302-317.
- [20] NGUYEN D T, LE L B, BHARGAVA V K. A market-based framework for multi-resource allocation in fog computing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(3): 1151-1164.
- [21] DING X J, GUO J X, LI D Y, et al. Pricing and budget allocation for IoT blockchain with edge computing[J]. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2022: doi.org/10.1109/TCC.2022.3150766.
- [22] LI Z T, KANG J W, YU R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial Internet of things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [23] LIN X, LI J H, WU J, et al. Making knowledge tradable in edge-AI enabled IoT: a consortium blockchain-based efficient and incentive approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(12): 6367-6378.
- [24] SUN W, LIU J J, YUE Y L, et al. Double auction-based resource allocation for mobile edge computing in industrial Internet of things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(10): 4692-4701.

[作者简介]



孙俨（1998- ），男，江苏连云港人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为区块链、网络管理。



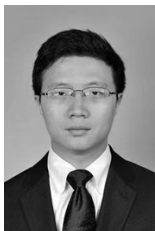
王威（1990- ），男，山东菏泽人，博士，南京航空航天大学教授，主要研究方向为无线通信、空天地集成网络、无线安全和区块链。



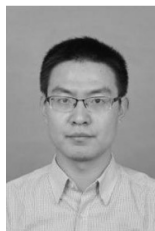
熊翱（1974- ），男，江西湖口人，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为网络管理、通信软件、区块链。



于东晓（1984- ），男，山东德州人，博士，山东大学教授，主要研究方向为边缘智能、物联网、分布式计算、数据挖掘等。



蒋承伶（1986- ），男，重庆人，博士，国网江苏省电力有限公司高级工程师，主要研究方向为无线通信、物联网与人工智能。



郭少勇（1985- ），男，河北邢台人，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为物联网与区块链。