

基于拍卖的边缘云期限感知任务卸载策略

裴翠, 范贵生, 虞慧群, 岳一鸣

引用本文

裴翠, 范贵生, 虞慧群, 岳一鸣. [基于拍卖的边缘云期限感知任务卸载策略](#) [J]. 计算机科学, 2023, 50(4): 241-248.

PEI Cui, FAN Guisheng, YU Huiqun, YUE Yiming. [Auction-based Edge Cloud Deadline-aware Task Offloading Strategy](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(4): 241-248.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于抽象语法树裁剪的智能合约漏洞检测研究](#)

Smart Contract Vulnerability Detection Based on Abstract Syntax Tree Pruning
计算机科学, 2023, 50(4): 317-322. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300063>

[深空环境中基于云边缘协同的任务卸载方法](#)

Task Offloading Method Based on Cloud-Edge-End Cooperation in Deep Space Environment
计算机科学, 2023, 50(2): 80-88. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220800156>

[边云协同计算中成本感知的物联网数据处理方法](#)

Cost-aware IoT Data Processing in Edge-Cloud Collaborative Computing
计算机科学, 2022, 49(11A): 211000101-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211000101>

[移动边缘计算中任务卸载研究综述](#)

Survey of Research on Task Offloading in Mobile Edge Computing
计算机科学, 2022, 49(11A): 220400161-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400161>

[基于预训练技术和专家知识的重入漏洞检测](#)

Reentrancy Vulnerability Detection Based on Pre-training Technology and Expert Knowledge
计算机科学, 2022, 49(11A): 211200182-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211200182>

基于拍卖的边缘云期限感知任务卸载策略

裴 翠¹ 范贵生^{1,2} 虞慧群¹ 岳一鸣¹

1 华东理工大学计算机科学与工程系 上海 200237

2 上海市计算机软件评价与测试重点实验室 上海 200237

(peicui0703@163.com)

摘 要 随着万物互联和 5G 时代的到来,移动用户需要处理的数据量与其处理数据能力不匹配。将大量任务卸载到有限的边缘服务器上执行势必会产生竞争,拍卖模型的引入可以解决用户之间对资源的竞争问题。目前大多基于拍卖的任务卸载工作忽略了任务的期限感知,普遍的任务卸载工作只单一考虑延迟敏感任务,并且未考虑到保证卸载过程的安全性。基于此,提出了一种基于拍卖的期限感知任务卸载(Auction Based Deadline-aware Task Offloading,ABDTO)策略,利用基于智能合约的拍卖机制实现期限感知任务(延迟敏感型任务和非延迟敏感型任务)到边缘服务器的最优分配,以总效用(即总利润)作为评价标准,实现移动用户和边缘服务器的共赢。利用启发式遗传算法进行仿真实验,相比 TACD,UPPER 和 RND 算法,ABDTO 策略的整体效用更高,最后利用 Remix 和 Ganache 等建立以太坊私有区块链网络进行仿真,证明了所提策略的正确性和可行性。

关键词: 边缘云;拍卖机制;期限感知;任务卸载;智能合约

中图法分类号 TP301

Auction-based Edge Cloud Deadline-aware Task Offloading Strategy

PEI Cui¹, FAN Guisheng^{1,2}, YU Huiqun¹ and YUE Yiming¹

1 Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

2 Shanghai Key Laboratory of Computer Software Evaluating and Testing, Shanghai 200237, China

Abstract With the advent of the Internet of everything and the 5G era, the amount of data that mobile users need to process does not match their data processing capabilities, offloading a large number of tasks to limited edge servers for execution is bound to produce competition. The introduction of auction model can solve the problem of resource competition among users. At present, most task offloading works based on auction ignore the deadline perception of tasks, the general task offloading work only considers delay-sensitive tasks, and does not consider ensuring the security of the offloading process. Therefore, an auction based deadline-aware task offloading(ABDTO) strategy is proposed, which uses the auction mechanism based on smart contract to realize the optimal allocation of deadline-aware tasks(delay-sensitive tasks and non-delay-sensitive tasks) to the edge servers, and the total utility(i. e. total profit) is taken as the evaluation criterion to achieve a win-win situation between mobile users and edge servers. The heuristic genetic algorithm is used to conduct simulation experiments. Compared with TACD, UPPER and RND algorithms, ABDTO strategy has higher overall utility. Finally, using Remix, Ganache, etc. to establish the Ethereum private blockchain network for simulation, which proves the correctness and feasibility of the strategy.

Keywords Edge cloud, Auction mechanism, Deadline aware, Task offloading, Smart contract

1 引言

随着万物互联以及 5G 高带宽、低时延时代的到来,数据量呈爆炸式增长,给计算设施带来了实时性、网络依赖性和安全性等方面的要求^[1]。边缘云作为中心云的延伸被提出,其将云的部分服务和能力扩展到边缘基础设施之上,显著减少了延迟和网络负载。然而,边缘云的资源有限导致用户之间势必产生竞争,拍卖是解决资源分配问题的重要手段。买卖

双方可以自由地对资源进行估价,并最终就资源的支付达成协议。拍卖过程也可能出现买卖双方恶意串通的行为,可以利用区块链将拍卖信息存储在区块中保证拍卖过程的安全性。区块链 2.0 中引入了智能合约^[2],智能合约运行于分布式区块链系统之上,具有其他一切分布式系统的优势,使数据安全和高可用性得到了很好的保证^[3-4]。利用智能合约技术实现拍卖过程,减少拍卖的管理成本^[5-6]。

本文针对边缘云环境提出了基于拍卖的期限感知任务

到稿日期:2021-12-16 返修日期:2022-01-13

基金项目:国家自然科学基金(622776097)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(622776097).

通信作者:范贵生(gsfan@ecust.edu.com)

卸载 (ABDTO) 策略, 在拍卖中考虑买方延迟敏感型任务 (硬期限任务) 和非延迟敏感型任务 (软期限任务) 的卸载, 设置任务优先级, 提高硬期限任务的获胜机率, 优先完成硬期限任务, 兼顾软期限任务。同时考虑了参与拍卖任务的最大可容忍延迟, 当预计卸载执行时间超过该值时, 则自动放弃此次拍卖等待下轮拍卖, 或者直接在本地执行。ABDTO 策略最大限度地满足了期限感知任务的卸载, 实现了拍卖参与者的最大效用。

- 本文的主要贡献如下:
- (1) 建立考虑期限感知的双拍卖模型, 实现买方任务到卖方边缘服务器的卸载, 旨在使期限范围内拍卖参与者达到最高的效用和利润。
 - (2) 提出了基于拍卖的期限感知任务卸载 (ABDTO) 策略。将任务分为高优先级、低优先级队列, 通过影响买方获胜机率, 来解决具有不同期限的任务卸载问题。
 - (3) 将拍卖部署于智能合约, 保证了过程的安全性和卸载结果的真实性, 将以太坊平台作为仿真实验环境模拟智能合约作为拍卖商的拍卖活动。

2 相关工作

近年来, 边缘云环境中旨在减少成本能耗时间等的任务卸载工作研究颇丰。Gao 等^[7]建立了移动边缘计算环境中深度神经网络计算任务卸载的时间和能耗评价模型。Wei 等^[8]在多个移动用户将任务上传到服务器中, 提出了任务可分的移动设备节能优选问题, 提出了一种选择最大节约能量优先算法来实现求解问题。Yu 等^[9]通过考虑完成时间和能量, 将移动边缘计算的计算卸载问题转化为系统成本最小化问题。Sun 等^[10]研究了多用户、多服务器车辆边缘计算场景中的任务卸载算法, 有效地优化了任务延迟和计算资源消耗。

针对任务延迟的调度问题也有大量相关研究。Chakroun 等^[11]提出了一种基于 Lyapunov 优化的随机网络优化方法来优化移动云计算 (Mobile Cloud Computing) 资源分配的方法。Sarkar 等^[12]提出了一种截止时间感知的动态任务放置方法 (Deadline-aware Dynamic Task Placement), 根据任务利用率和队列分配策略对截止日期敏感的任务进行分类。Mithun 等^[13]优化边缘计算中的定价模型, 为不同的截止日期的任务设计价格, 目的是在各自的截止日期内完成任务的同时实现收入的最大化。

上述相关工作主要集中关注优化卸载的能耗成本, 严格满足延迟敏感型任务的卸载, 未考虑不同期限的任务卸载及过程的安全性。当前安全隐私等问题已经成为用户关注的重点。拍卖作为解决资源分配问题的重要手段应用广泛, 部署在区块链上的拍卖机制更是为其提供了安全保证。

近年来, 研究人员对拍卖机制进行了不断的改进。Zhou 等^[14]在无线接入网络中利用三阶段的拍卖进行微云的部署。AP 接入点对用户来说是卖方, 对边缘服务器, 以此来说是买方。文献^[15]是对文献^[14]的改进, 同样是三阶段的拍卖, 但是 Xia 等^[15]将临近 AP 的移动用户分为同组, 每个 AP 只能申请一个边缘服务器来减少延迟。Liu 等^[16]在买方用户分组的情况下引入团购机制, 团购优惠购买有利于提高买方的

利润和资源利用率。拍卖机制在云市场资源分配中的应用已有一些研究成果, Kumar 等^[17]提出了一种真实的组合双拍卖机制, 用于云市场中计算资源的分配和定价, 实现市场的利润最大化。Tafsiri 等^[18]将市场中分配 VM 实例的问题建模为组合双拍卖模型, 目的是有效分配 VM 实例集 (不同属性和不同数量), 根据每个 VM 的 CPU、内存、存储和带宽等为其设置权重实现最优分配。Aggarwal 等^[19]提出了一种多属性组合逆向拍卖模型, 该模型被应用于云/雾市场, 考虑到用户的移动性将雾资源按照远程和本地定价, 并且通过计算卖方的得分对其进行奖励/惩罚, 激励其真实出价。

拍卖中买卖双方的恶意串通等非诚信行为会严重破坏规则, 扰乱市场。基于移动区块链的拍卖保证了过程的公平和安全。Ma 等^[20]提出了一种基于区块链的分布式和基于反馈的组合多单元双重拍卖机制, 以建立一个既能产生高社会福利, 又能激励参与者提供高质量服务的云资源市场。Gao 等^[21]在移动区块链中提出了一种基于拍卖的边缘服务器资源分配模型, 采用 Benders 分解得到动态资源分配策略。Asif 等^[22]在联邦云的资源分配中引入了多买方多卖方的双拍卖机制。Liu 等^[23]在移动区块链中为了提高拍卖参与者的总体效用, 提出了一种基于智能合约的双重拍卖机制。子任务可以从一个移动设备卸载到异构边缘服务器。Desai 等^[24]提出了一种新颖的混合区块链架构, 在私有区块链上投标, 利用公共区块链公布拍卖结果。Liu 等^[25]提出了一种基于区块链的 MEC 网络架构, 以分散和安全的方式处理来自不同用户设备的大规模视频请求。

上述利用拍卖实现资源分配的研究仅考虑了所有参与者的最大效用, 重点集中在买卖双方的真实性并对其进行奖励或惩罚, 未考虑实际拍卖中买方任务的期限问题。本文在拍卖中考虑到任务的期限感知, 通过任务优先级影响获胜者的选择, 目的是在满足各类任务顺利执行的同时实现拍卖效用的最大化, 将拍卖部署在区块链上, 通过智能合约的触发完成拍卖, 保证整个任务卸载的安全。

3 双拍卖期限感知任务卸载模型

本节提出了一个考虑任务期限感知的双拍卖模型, 用于边缘云环境中的任务卸载工作, 适用于多个用户和多个边缘云服务器的场景。具体的拍卖模型如图 1 所示。

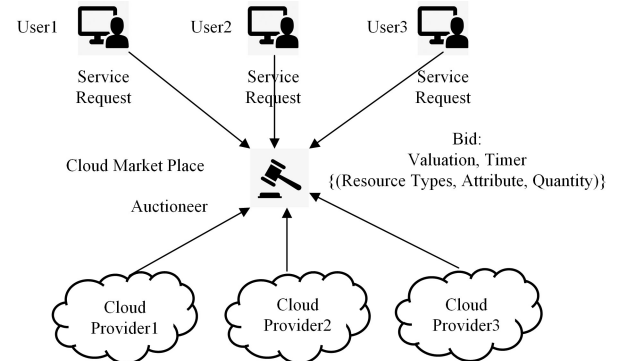


图 1 基于边缘云环境的拍卖模型

Fig. 1 Auction model based on edge cloud environment

(1) 移动用户。作为使用和访问服务的实体, 需要请求

资源执行任务,因此将移动用户的任务作为拍卖的买方,向拍卖商发送资源出价等信息。

(2)边缘云服务器。作为资源的拥有者,边缘云服务器包括 CPU、内存、存储和网络资源等,因此可以将其作为拍卖的卖方。卖方把资源拥有量和成本价发送给拍卖商。

(3)拍卖商。负责收集买卖双方的资源信息和报价情况,根据事先约定的分配算法定时执行确定拍卖的获胜者,最后将拍卖结果返回给买卖双方。

本文引入智能合约作为受信任的拍卖商,智能合约的内容提前由买卖双方约定,有效防止了拍卖活动中可能出现的恶意串通行为,维护参与者的利益和拍卖的公平。智能合约接收买卖双方的信息,交易数据通常被打包以区块的形式加以记录,每个区块内包含了一段时间内发送的所有交易记录的完整信息。基于智能合约的拍卖模型如图 2 所示。

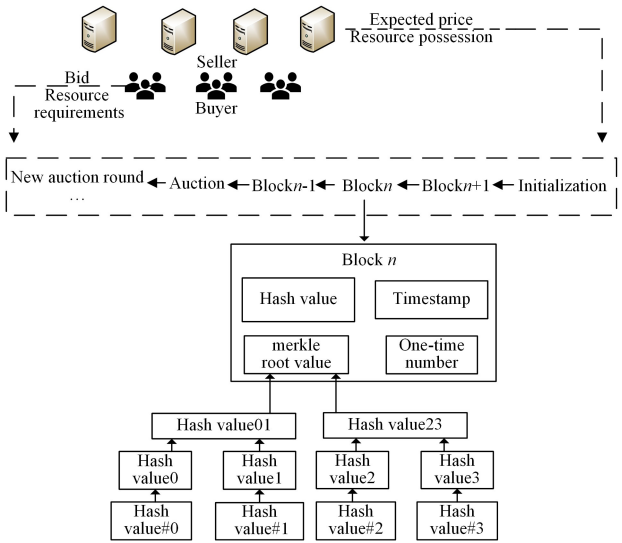


图 2 基于智能合约的拍卖模型
Fig. 2 Auction model based on smart contract

智能合约本质上是定义在区块链上的代码,它包含一组规则,以确定相关方如何相互交互,因此只要满足了这些预定义的规则,合约就会自动执行。区块链由防篡改和有序块组成,后一个区块由前一个区块头的哈希值组成。任何一个块的数据更改都会导致其后面所有块的哈希值发生更改。因此将智能合约作为拍卖商能够保证拍卖活动的公平和安全进行。基于智能合约的拍卖流程如图 3 所示。

(1)初始化。初始化买方的资源需求量、估价、期限范围、最大可容忍延迟、任务类型和任务大小;卖方的资源拥有量和成本价格、拍卖开始时间 t_{begin} 、结束出价时间 t_{endbid} 、结束时间 $t_{finished}$ 、开始审核时间 t_{review} ,开始交易时间 $t_{begintransaction}$ 。

(2)创建。所有参与者都可以创建智能合约。为了防止恶意拍卖,买卖双方都必须支付一定的保证金,在拍卖完成后进行验证后退回。

(3)资源分配。当拍卖出价时间结束,智能合约自动触发,将运行 ABDTO 以确定任务卸载结果和清算价格的结果。

(4)审核。智能合约得到执行结果,允许各方在 $t_{begintransaction}$ 之前提出异议,如果异议的人数超过参与总人数的 $2/3$,则认为本次拍卖结果争议过大,结果作废,等待

下一次拍卖开始。

(5)交易。若无异议, $t_{begintransaction}$ 双方便按照结果执行,卖方为买方提供资源,买方卸载资源到对应的卖方,同时按照成交价格进行支付。

(6)提取存款。交易完成后,买卖双方可以提取其存款,保证金将退还给投标人。该存款旨在提高安全性,若有参与者不遵守规则,可以扣除保证金作为惩罚。

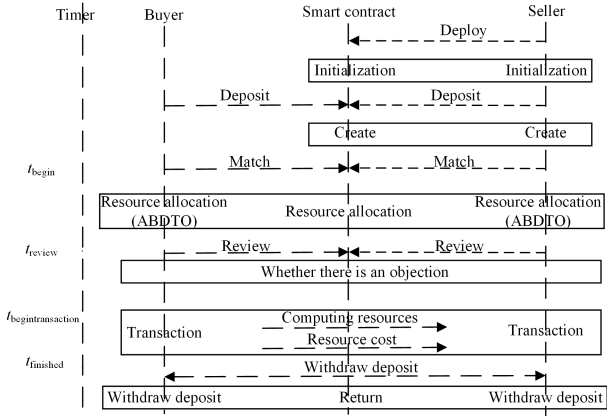


图 3 基于智能合约的拍卖流程
Fig. 3 Auctionprocess based on smart contract

4 基于拍卖的期限感知任务卸载策略 (ABDTO)

4.1 系统模型

本文将边缘云环境中任务卸载到边缘服务器上处理的问题建模为双拍卖模型。假设每个任务都是相互独立的,且允许每个移动用户的独立任务分配到不同的边缘服务器。考虑参与拍卖任务的期限感知,如果任务卸载预估花费时间超过其最大可容忍延迟,那么该任务就默认不参与此次拍卖,等待下一轮或者直接在本地处理。描述系统模型的主要参数如表 1 所列。

表 1 系统模型各参数的意义

Table 1 Meaning of each parameter of the system model

参数	意义
m	number of sellers
n	number of buyers
S_j	jth seller
Y_i	ith buyer
$type_i$	type of the ith buyer
d_i^{tb}	start time of the ith buyer's term
d_i^{tn}	end time of the ith buyer's term
Ψ_i	priority factor of the ith buyer
c_j	cost unit price of jth seller
o_j	resources of jth seller
b_i	Valuation of ith buyer
r_i	resource demand of ith buyer
d_i	maximum tolerable delay of ith buyer
t_{ij}	service time from ith buyer and jth seller
a_i	size of the ith buyer(in megabytes)
$d_{i,j}$	transmission rate of ith buyer and jth seller
f_j	processing rate of jth seller
e_i	size of the calculation result of ith buyer
v_{ij}	transaction unit price of ith buyer andjth seller
u_j^s	the jth seller utility
u_i^b	the ith buyer utility

更为细致地区分硬期限任务和软期限任务,只考虑效用可能就会导致硬期限任务或者软期限任务永远没有机会被卸载。考虑在拍卖开始出价到结束出价的这段时间,动态地为参与的买方设置优先级,采用一个按时间段排列的系统,范围为 $t = \{0, 1, \dots, t\}$, 维护两个虚拟队列,即高优先级队列 Q_h 和低优先级队列 Q_l , 如图 4 所示。高优先级队列存放硬期限任务,低优先级队列存放软期限任务,也就是说,与高优先级任务相比,低优先级任务可以容忍更长的延迟。

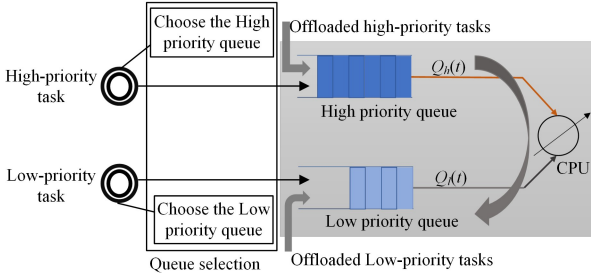


图 4 任务队列示意图

Fig. 4 Schematic diagram of task queue

本文设计了一种在 n 个任务之间分配 m 个边缘服务器资源的真实拍卖机制。拍卖涉及到的实体如下。

卖方(即边缘服务器)集合由 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 表示,对于每一个卖方(边缘服务器) $S_j \in S$ 来说, c_j 表示边缘服务器 S_j 的单位资源成本价格,成本向量表示为 $\mathbf{C} = (c_1, c_2, \dots, c_m)$; 集合 o_j 表示边缘服务器 S_j 所能提供的资源总量,资源向量表示为 $\mathbf{O} = (o_1, o_2, \dots, o_m)$ 。

买方(即任务)集合由 $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 表示,对于任务 $Y_i \in Y$ 来说, b_i 表示买方 Y_i 的估值,即任务得到资源服务后的价值,估值向量表示为 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, r_i 表示任务的资源需求量,资源需求向量表示为 $\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$,任务类型表示为 $\mathbf{T} = \{type_1, type_2, \dots, type_n\}$, $type_i \in \{0, 1\}$, 这里用 0 表示硬期限任务,1 表示软期限任务。

对于所有买方 $Y_i \in Y$, 向量 $\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_i)$ 表示每个任务对应的最大可容忍延迟。此外,每个任务卸载到边缘服务器处理的服务时间取决于任务上传时间、处理时间和计算结果的下载时间,分别用 d_{up} , $d_{process}$, d_{down} 表示。那么任务卸载的服务时间 t_{ij} 可以表示为:

$$t_{ij} = d_{up} + d_{process} + d_{down} \quad (1)$$

任务上传时间是由计算任务的大小和任务与边缘服务器之间的传输速率决定的。

$$d_{up} = \frac{a_i}{d_{i,j}} \quad (2)$$

边缘服务器上的处理时间是由计算任务的大小和边缘服务器的处理速率决定的。

$$d_{process} = \frac{a_i}{f_j} \quad (3)$$

计算结果的下载时间是由计算结果的大小和结果与边缘服务器之间的传输速率决定的。

$$d_{down} = \frac{e_i}{d_{i,j}} \quad (4)$$

初始高优先级队列 Q_h 和低优先级队列 Q_l 都会空,当拍卖开始出价陆续有买方参与,每个买方需要给出其任务特性

$type_i$ 和期限范围 $[dl_i^b, dl_i^m]$, 即任务期限的初始时间和结束时间。根据 $type_i$ 的值来确定当前任务进入 Q_l 或者 Q_h 。

$$\begin{cases} Q_h(t) \leftarrow Q_h(t) \cup Y_i, & type_i = 0 \\ Q_l(t) \leftarrow Q_l(t) \cup Y_i, & type_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

对于队列内部的优先级,是根据期限范围差 $ts_i = dl_i^m - dl_i^b$ 和 dl_i^b 共同决定的,即当任务的初始时间越早且期限范围差越小,任务的优先级就越高,就把它放在对应队列的前端。在拍卖结束出价之前,买方任务的优先级是动态调整的:买方 Y_i 参与,先根据 $type_i$ 选择队列,再根据 ts_i 和 dl_i^b 对比队列中的已有的买方调整优先级参数 Ψ_i (从 1 开始设置),优先级越高, Ψ_i 就越小。

拍卖商(智能合约):定时执行拍卖得到最终的单位成交价格 v_{ij} 和具体的分配情况,返回拍卖结果,完成此次拍卖活动。

4.2 问题表述

拍卖的最终目的是为了实现参与者的利润最大化,从而达到最优分配。

定义 1 将买方效用定义为估价减去实际的付出。买方的效用还受 Ψ_i 的影响,其作为为争取获胜的额外花费,提高了高优先级任务的获胜机率。假设用户的估值就是投标价格,支付费用包括买方购买资源的费用和执行智能合约消耗的 gas 值。当买方赢得这次拍卖时,买方 Y_i 的效用 u_i^b 的计算式如下:

$$u_i^b = \sum_{j=1}^m x_{ij} (b_i - r_i v_{ij} - \eta \Psi_i) - \lambda \theta_i \quad (6)$$

其中, θ_i 表示 Y_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 智能合约的消耗 gas 值, λ 和 η 是一个常数系数。 x_{ij} 表示买方 Y_i 所包含任务的分配矩阵:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i \text{ 分配给 } s_j \\ 0, & x_i \text{ 未分配给 } s_j \end{cases} \quad (7)$$

定义 2 将卖方效用定义为收入减去成本。成本包括卖方提供的资源成本价格和使用智能合约的费用。当卖方赢得这次拍卖时,卖方 S_j 的效用 u_j^s 的计算式如下:

$$u_j^s = \sum_{i=1}^n x_{ij} r_i (v_{ij} - c_j) - \lambda \theta_j \quad (8)$$

可以将上述多目标优化问题转化为单目标优化问题。

$$\max (\alpha \sum_{i=1}^n u_i^b + \beta \sum_{j=1}^m u_j^s) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} b_i \leq budget_i \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} r_i < o_j \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} r_i v_{ij} < \sum_{j=1}^m x_{ij} b_i \\ t_{ij} \leq d_i \end{cases} \quad (11)$$

$$\quad (12)$$

$$\quad (13)$$

其中, $\alpha + \beta = 1$, α 和 β 分别表示买卖双方的权重。最终目标函数(9)就是求得所有参与者的效用最大值。式(10)一式(13)分别约束每个买方的估值不能超过其最大预算、买方请求的资源量要小于卖方所拥有资源的总量、买方最后所支付的费用要小于买方的估值以及买方的预估服务时间不大于其最大可容忍延迟。

根据上述的问题表述,将基于拍卖的期限感知任务卸载问题转化为多维 0-1 背包问题,多维背包问题已经被证明是

NP 难题。针对 NP 问题,本文采用启发式遗传算法(GA)来求得问题的最优解。

4.3 算法设计

上文提到将问题转化为 0-1 背包问题,求得目前函数的最优解。启发式算法适合用来求解问题的最优解,因此 ABDTO 使用遗传算法为所有任务做出近似最优的卸载决策,在考虑任务期限感知的前提下使拍卖参与者的效用达到最大。

ABDTO 算法伪代码如算法 1 所示。

算法 1 基于拍卖的期限感知任务卸载(ABDTO)

输入:($m, n, o_j, c_j, r_i, b_i, v_{ij}, a_i, e_i, d_i, f_j, d_{ij}$)
输出:($u_j^s + u_i^b$)
1. 初始化 size, iter, crossover, mutation
2. $pops \leftarrow \text{create_initial}(\text{pop_size})$ //第一代种群 pop
3. $[f, \text{mean}, \text{best } f, \text{best pop1}, \text{rank}] = \text{fitness}(pops, \alpha, \beta)$
4. for iter=2 to max iter + 1 do
5. $m \text{ num} = \text{size} * \text{mutation}, c \text{ num} = \text{size} * \text{crossover}$
6. for j=1 to length(list m) do
7. get the new mutated population pops new mutation
8. EndFor
9. for i=1:2:length(list c)-1 do
10. get the new crossover population pops new crossover
11. EndFor
12. Calculate the most efficient use best f
13. Reselect new population pops
14. EndFor

卸载方法部署于智能合约之上,根据图 3 所示的流程,详细的基于智能合约的拍卖流程如表 2 所列。

表 2 基于智能合约的拍卖过程

Table 2 Auction process based on smart contract

Init	$S_j[], Y_i[], C[], B[], r[], R[], T[], D_i[], t_{\text{begin}}, t_{\text{endbid}}, t_{\text{finished}}, t_{\text{review}}, t_{\text{begintransaction}}$ $\text{input}(\text{deposit}_{sj}, \text{deposit}_{yi}, t_{\text{begin}}, t_{\text{endbid}}, t_{\text{finished}}, t_{\text{review}}, t_{\text{begintransaction}})$
Create	$t_{\text{begintransaction}}$ $\text{Verify}(\text{deposit}_{sj}, \text{deposit}_{yi})$ $\text{input}(b_i, r_i, \text{type}_i, o_j, c_j, D_i)$
Match	$\text{Verify } t_{\text{begin}} < t_{\text{review}}$ $\text{ABDTO}(Q_h, Q_l, b_i, r_i, \text{type}_i, o_j, c_j, D_i)$
Review	$\text{Verify } t_{\text{begin}} < t_{\text{begintransaction}}$ $\text{Verify whether there is an objection}$ $\text{input}()$ $\text{Verify } t_{\text{begintransaction}} < t_{\text{finished}}$
Transaction	Transaction $\text{Verify } t > t_{\text{finished}}$ $\text{Send back}(\text{deposit}_{sj}, \text{deposit}_{yi})$

5 实验部分

5.1 实验环境介绍

本文对 ABDTO 策略使用 matlab2018 进行仿真模拟实验,使用以太坊区块链平台测试拍卖活动,大体上可以分为前端和后端部分(底层区块链的网络部分)。利用 Remix 进行合约的开发,使用 Ganache 客户端初始化 10 个账户,每个账户有 100 比特币,任选一个账号通过私钥添加到 MetaMask 中,它可以自定义 RPC 网络¹⁾与 Ganache 的 RPC Severe 保持

一致,否则就无法连接到该 Ganache 私有链上。前端的开发是基于 Node.js 的。所有的实验都在处理器 Intel © Core™ i5-6200U CPU 2.10GHz、内存 16GB 的 PC 机上完成。

5.2 实验数据

将 EdgeCloudSim^[26] 模拟器工具作为仿真工具来进行资源计算和网络资源建模,该工具是一种应用于边缘计算中的仿真测试平台。这里设置移动设备的数量最小为 100,最大为 1000,执行结果如图 5 所示,输出有任务数量、失败任务数、平均的服务时间、执行时间、网络延迟等。任务的最大可容忍延迟 d_i 就取平均服务时间的最大值。

根据上文,在理想状态下假设每个移动用户的任务是相互独立的。为了更真实地展示 ABDTO 的可行性,从 CLOUDORADO 和阿里云网站收集不同虚拟机的真实售价来设置买卖双方的价格信息。卖方成本 c_j 遵循均匀分布 $U(1,3)$,买方估价 b_i 遵循均匀分布 $U(10,20)$,最终单位成交价格遵循均匀分布 $U(5,10)$ 。参考文献[14]设置卖方边缘服务器 S_j 的资源容量 O_j 服从正态分布 $N(60,5)$,买方任务的资源需求量 r_{ik} 遵循正态分布 $N(2,0.5)$,通过以太坊仿真得到平均消耗的 gas 值, λ 设置为 $(0,0.1)$, θ_i 和 θ_2 遵循 $U(0,1)$,任务大小 a_i 和结果大小 e_i 服从均匀分布 $U(1,5)$ ^[27], f_j 设置为 $[1\text{ Mbps}, 5\text{ Mbps}]$, $d_{i,j}$ 设置为 $[10\text{ Mbps}, 30\text{ Mbps}]$ ^[28]。

of tasks(Edge/Cloud/Mobile):93554(74328/19226/0)
of failed tasks(Edge/Cloud/Mobile):19251(19176/75 /0)
of completed tasks(Edge/Cloud/Mobile):74303(55152/19151/0)
of uncompleted tasks(Edge/Cloud/Mobile):137(131/1/5)
percentageoffailedtasks:22.777193%
average service time; 3.232183 seconds. (on Edge:4.102353, on Cloud:0.726222, on Mobile:NaN)
average processing time;3.068301 seconds. (on Edge:4.069976, on Cloud:0.183626, on Mobile:NaN)
average network delay;0.163882 seconds. (LAN delay:0.032377, MAN delay:NaN, WAN delay:0.542596, GSM delay:NaN)
average server utilization Edge/Cloud/Mobile: 95.047181/1.113712/0.000000

图 5 EdgeCloudSim 的执行结果

Fig. 5 Execution results of EdgeCloudSim

5.3 仿真实验结果与分析

本文用启发式遗传算法进行模拟,经过多次模拟调整初始参数发现,种群数量设置为 500,迭代次数为 200,交叉概率和变异概率设置为 0.3 时,效用值会趋于平稳。在初始值设置为买方 i 为 50,卖方 j 为 5, $\alpha = \beta = 0.5$ 的情况下进行实验模拟。

5.3.1 任务量与效用的关系

首先比较是否考虑期限感知下的买卖双方效用。当卖方数量保持不变时,买卖双方总效用如图 6 所示。任务量依次从 30,40,增加至 80,两种环境下的总效用都是依次递增的,并且考虑任务期限感知时的总效用总是低于忽略时的效用。因为若考虑期限感知下的买卖双方效用,则首先会使超过最大可容忍延迟的任务无法参与到拍卖中,并且任务为了提高获胜率而增加额外的花费,因此总效用会有所减少是符合

¹⁾ <http://127.0.0.1:7545>

预期的。但是,这将保证每个任务均能在最大可容忍延迟范围内得到处理,且硬期限任务优先处理,同时兼顾软期限任务。因此,本文所求的最大效用是在考虑任务的期限感知下得到的,也更符合实际应用。

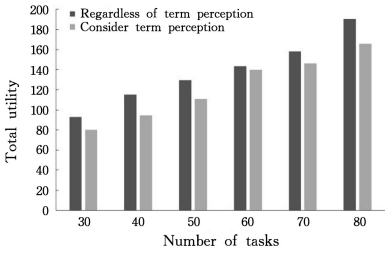


图 6 考虑和忽略任务期限感知的效用对比图

Fig. 6 Utility comparison of considering and ignoring task deadline perception

接下来分别比较期限感知下买卖双方的效用。当买方数量保持不变时,买卖双方的效用如图 7 所示。卖方效用随买方数量的增加依次递增,而买方的效用基本持平。边缘服务器的效用远远大于用户任务的效用,这与双方的出价、成本价、最终的成交价和双方权重有关,实际应用中可以根据不同场景下对买卖双方的偏好程度设置权值,或者调整成本价格平衡双方的效用等。本次权重的设置明显是偏向于卖方权益的。

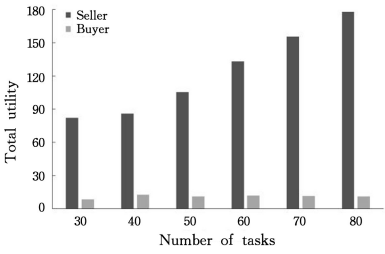


图 7 买方和卖方的效用对比

Fig. 7 Utility comparison between buyers and sellers

最后观察考虑任务期限感知时买卖双方的整体效用。当移动服务器的数量保持不变时,整体效用随着移动用户数量的增加而增加,如图 8 所示,随着任务量的增加(任务量不能超过边缘服务器所拥有的总的资源量),整体效用也随之增加。实验结果表明,ABDTO 策略在资源量充足的情况下,其效用能够稳定增长。

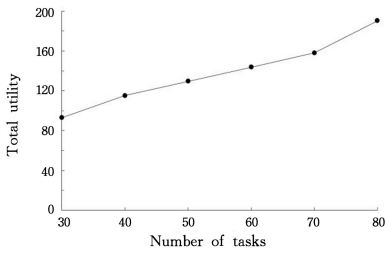


图 8 买卖双方的整体效用

Fig. 8 Overall utility of buyers and sellers

5.3.2 优先级系数与效用的关系

图 9 给出了优先级系数 η 对整体效用的影响,这里买卖双方的相关参数设置与 5.3.1 节中的一致。从图中可以看出,系数 η 的取值从 0.1 到 1,买卖双方的整体效用变化趋势

不大,说明优先级系数在 $[0,1]$ 的设置对拍卖参与者的总效用影响不大。图 10 的结果说明,给买方设置优先级引入了优先级系数,增加了硬期限任务的获胜率,但是系数的引入并不会使拍卖效用的波动变大,有利于提高拍卖活动的成功率,维护了所有参与者的效用。

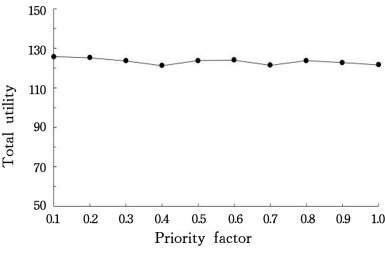


图 9 优先级系数对总效用的影响

Fig. 9 Effect of priority factor on total utility

5.3.3 与 TACD,Upper 和 RND 的效用对比

本文将 ABDTO 与文献[16]中的 TACD,Upper 和 RND 算法进行了对比实验,结果如图 10 所示。

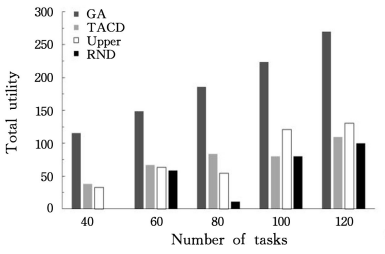


图 10 算法效用对比

Fig. 10 Algorithms utility comparison

TACD,Upper 和 RND 这 3 种算法的目标是得到买(移动用户)卖(微云)双方的最大效用。它们选择获胜者的方式相同,利用贪心的思想按照性能价格比对移动用户进行降序排序,依次进行资源的累加直到资源和超过微云所提供的资源总量,可以看出这种选择获胜者的方式更侧重于出价高且资源量需求量少的移动用户,整体更偏重于卖方利益。ABDTO 则是通过每次的随机分配迭代来使整体的利润最大化,获胜的买方个数会更多,有效地保障了更多的买方可以分配到资源。3 种算法的主要区别在于最终成交单价的选择方式不同。

假设上述拍卖的获胜者集合为 W ,最终选取移动用户 m 的出价作为最终的成交单价。TACD 选择的 m 不在获胜者集合中,Upper 选择的 m 是在 $(W/2,W)$ 之间的随机数,RND 的 $m=randi(W)$,随机选择前 $1-W$ 个元素。本文中 ABDTO 的最终成交单价是根据买卖双方各自的预期价格来决定的,服从均匀分布,是从双方的共同利益出发,保证拍卖的公平性。

从图 10 可以看出,随着买方数量的增加,TACD,Upper 和 RND 这 3 种算法的效用变化并无明显规律,任务量达到 100 之后 3 种算法的效用都呈上升趋势。而 ABDTO 策略随着任务量的增加,总效用持续增加,且总效用始终明显优于其他算法。因为 TACD,Upper 和 RND 算法总是优先选择出价更高、需求量少的用户,所以很容易受到买方出价的影响,

造成每次拍卖结果的不稳定性。而 GA 每次拍卖都考虑到买卖双方的目标价格,求得最高效用得出最佳分配结果,并且它使得每次拍卖结果稳定,受到买卖双方的共同影响。实验结果表明,ABDTO 策略一直优于其他 3 种算法,并且较其他 3 种算法的效用趋势也更加稳定。

5.3.4 部署以太坊平台

配置好 Ganache 和 MateMask 后,将 Remix 的 Auction 合同编译并执行,这里,执行环境选择注入的 web3 对象,便可以使用 MateMask 上已经登录的账户进行交易。部署成功的结果如图 11 所示。无论拍卖成功与否,只要合约成功执行,账户便会消耗一定的 gas 值,查看 Ganache 对应账户的余额信息如图 12 所示,交易信息打包成块,上链完成。



图 11 部署智能合约

Fig. 11 Smart contract deployment

Block	Index	Time	Gas	Hash
Block 2	2	2021-11-28 14:42:25	3000000	0x6f7294c2f5803582c7a72092898a85e11379a8dc0741a0f0b61c741391539
Block 1	1	2021-11-28 14:40:29	3000000	0x6f7294c2f5803582c7a72092898a85e11379a8dc0741a0f0b61c741391539
Block 0	0	2021-11-28 13:57:23	3000000	0x6f7294c2f5803582c7a72092898a85e11379a8dc0741a0f0b61c741391539

图 12 拍卖结果成块并上链

Fig. 12 Auction results are made into blocks and put on the chain

结束语 边缘云环境中,移动设备不具备足够的能力处理数据密集型任务。考虑卸载到边缘服务器上的处理任务,以及对硬期限任务和软期限任务的卸载,提出了基于拍卖的期限感知任务卸载策略(ABDTO),保证硬期限任务优先得到处理,软期限任务也尽可能地被执行,实现拍卖参与者的最大效用。实验结果表明,ABDTO 策略具有良好的经济效益,总效用高于 TACD,Upper 和 RND 算法,通过部署在以太坊平台模拟真实的拍卖验证了策略的真实性和正确性。智能合约也保证了拍卖过程的安全性,保证了任务卸载结果真实有效。毫无疑问,考虑利用区块链的智能合约来保证拍卖过程的安全性,势必会产生较大的成本,如时间成本、交易成本等,但是与当前更为重要的安全性相比,必要的成本代价是必要的。

本文研究的基于拍卖的延迟受限的任务卸载策略(ABDTO)是将智能合约作为拍卖商来保证拍卖活动的公平公正,但是智能合约依然存在漏洞可能导致拍卖失败,因此将来的工作可以考虑解决智能合约的安全漏洞问题,让智能合约更安全地为任务卸载问题服务。

参 考 文 献

[1] FU Y W, MENG X J. The Development Status and Countermeasures of Edge Computing Technology[J]. Sci-tech in China, 2019, 265(10): 12-15.

[2] WANG H Q, ZHANG F, LI T, et al. Security and privacy-pro-

tection technologies in smart contract[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 39(4): 63-71.

[3] ZHANG L, LIU B X, ZHANG R Y, et al. Overview of Blockchain Technology [J]. Computer Engineering, 2019, 45(5): 1-12.

[4] HUANG J F, LIU J. Survey on Blockchain Research[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(2): 1-8.

[5] YANG J, SUN Y, LIU F. Research on trust scheme of sealed blockchain auction based on Ethereum smart contract[J]. Computer Science and Applications, 2020, 10(5): 868-882.

[6] FAN J L, LI X H, NIE T Z, et al. Survey on Smart Contract Based on Blockchain System [J]. Computer Science, 2019, 46(11): 1-10.

[7] GAO H, LI X J, ZHOU B W, et al. Energy efficient computing task offloading strategy for deep neural networks in mobile edge computing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(6): 1607-1615.

[8] WEI F, CHEN S X, ZOU W X. A Greedy Algorithm for Task Offloading in Mobile Edge Computing System[J]. China Communications, 2018, 15(11): 149-157.

[9] YU H Y, WANG Q Y, GUO S T. Energy-Efficient Task Offloading and Resource Scheduling for Mobile Edge Computing [C]//2018 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage(NAS). Chongqing, China; IEEE, 2018.

[10] SUN J N, GU Q, ZHENG T, et al. Joint Optimization of Computation Offloading and Task Scheduling in Vehicular Edge Computing Networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10466-10477.

[11] CHAKROUN O, CHERKAoui S. Resource Allocation for Delay Sensitive Applications in Mobile Cloud Computing[C]//41st IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN). IEEE, 2016: 615-618.

[12] SARKAR I, ADHIKARI M, KUMAR N, et al. Dynamic Task Placement for Deadline-Aware IoT Applications in Federated Fog Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(2): 1469-1478.

[13] MITHUN M, VIKAS K, QI Z, et al. Optimal Pricing for Offloaded Hard- and Soft-Deadline Tasks in Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 23(7): 9829-9839.

[14] ZHOU G Q, WU J G, CHEN L. TACD: A Three-Stage Auction Scheme for Cloudlet Deployment in Wireless Access Network [C]//12th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications (WASA). Guilin, PEOPLES R CHINA; 2017: 877-882.

[15] XIA C P, CHEN H, LIU X L, et al. ETRA: Efficient Three-Stage Resource Allocation Auction for Mobile Blockchain in Edge Computing[C]//2018 IEEE 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems(ICPADS). Singapore, SINGAPORE; IEEE, 2018: 701-705.

[16] LIU X L, WU J G, CHEN L, et al. Efficient Auction Mechanism for Edge Computing Resource Allocation in Mobile Blockchain [C]//2019 IEEE 21st International Conference on High Per-

formance Computing and Communications; IEEE 17th International Conference on Smart City; IEEE 5th International Conference on Data Science and Systems(HP-CC/Smart City/DSS). Zhangjiajie, China; IEEE, 2019.

[17] KUMAR D, BARANWAL G, RAZA Z, et al. A Truthful Combinatorial Double Auction-based Marketplace Mechanism for Cloud Computing[J]. Journal of Systems and Software, 2018, 140:91-108.

[18] TAFSIRI S A, YOUSEFI S. Combinatorial Double Auction-based Resource Allocation Mechanism in Cloud Computing Market[J]. Journal of Systems and Software, 2018, 137:322-334.

[19] AGGARWAL A, KUMAR N, VIDYARTHI D P, et al. Fog-Integrated Cloud Architecture enabled multi-attribute combinatorial reverse auctioning framework[J/OL]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X21000307>.

[20] MA X Y, XU D, WOLTER K. Blockchain-enabled feedback-based combinatorial double auction for cloud markets[J]. Future Generation Computer Systems the International Journal of Escience, 2022, 127:225-239.

[21] GAO Z P, LIN B, XIAO K L, et al. A Dynamic Resource Allocation Algorithm Based on Auction Model in Mobile Blockchain Network[C]// 2019 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering(EITCE). Xiamen, China; IEEE, 2019.

[22] ASIF I M, BENAY R, SARBANI R. Auction based Resource Allocation Mechanism in Federated Cloud Environment; TARA[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2022, 15(1): 470-483.

[23] LIU T L, WU J G, CHEN L, et al. Smart Contract-Based Long-Term Auction for Mobile Blockchain Computation Offloading[J]. IEEE Access, 2020, 8(99):36029-36042.

[24] DESAI H, KANTARCIOGLU M, KAGAL L. A Hybrid Blockchain Architecture for Privacy-Enabled and Accountable Auctions[C]// 2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain). Atlanta, GA, USA; IEEE, 2019:34-43.

[25] LIU Y M, YU R, LI X, et al. Decentralized Resource Allocation for Video Transcoding and Delivery in Blockchain-Based System With Mobile Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11):11169-11185.

[26] SONMEZ C, OZGOVDE A, ERSOY C. EdgeCloudSim: An environment for performance evaluation of Edge Computing systems [C]// The 2nd International Conference on Fog and Mobile Edge Computing(FMEC 2017). IEEE, 2017.

[27] HU Q H, CHENG H C, ZHANG X Q, et al. Trusted resource allocation based on proof-of-reputation consensus mechanism for edge computing[J/OL]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12083-021-01240-0#citeas>.

[28] HUANG H, YE Q, ZHOU Y T. Deadline-Aware Task Offloading with Partially-Observable Deep Reinforcement Learning for Multi-Access Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(6):3870-38851.



PEI Cui, born in 1996, postgraduate. Her main research interests include edge computing, task unloading method and smart contract.



FAN Guisheng, born in 1980, Ph.D, associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include formal methods for complex software system, service oriented computing, and techniques for analysis of software architecture.

(责任编辑:喻黎)