

基于不确定联盟博弈的 EIP 收益预估策略研究

赵庶旭, 夏心雨, 王小龙

(兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 边缘计算环境中存在通信信道风险和边缘服务器故障等风险因素, 会导致处理任务所需的计算资源与边缘联盟分配的资源产生失配问题, 对此, 提出了一种基于不确定联盟结构博弈的边缘联盟及其成员边缘基础设施供应商 (EIP) 的收益预估方法。首先通过混合整数线性规划方法构建资源调度模型以最大化边缘联盟收益。其次引入信念结构对联盟收益进行高、中、低和未知 4 种情况的概率进行表征。最后利用不确定 Owen 值提前一个时隙对联盟中 EIP 进行区间收益预估。仿真结果表明, 所提预估方法在通信信道风险以及服务器故障 2 种风险下的准确率分别为 91.25%、82.5%, 平均准确率为 86.88%, 且在考虑周期性任务到达的情况下, 实现了对 EIP 收益区间的准确预估。

关键词: 边缘计算; 不确定联盟结构博弈; 信念结构; 不确定 Owen 值; 收益预估

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024220

Uncertain edge coalition game based EIP revenue estimation strategy

ZHAO Shuxu, XIA Xinyu, WANG Xiaolong

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: In the edge computing environment, there are risks such as communication channel risks and edge server failures, which can lead to a mismatch between the computing resources required for task processing and the resources allocated by the edge coalition. In response, a revenue forecasting method for the edge coalition and its member edge infrastructure provider (EIP) based on the game theory of uncertain coalition structures was proposed. Firstly, a resource scheduling model was constructed using a mixed integer linear programming method to maximize the revenue of the edge coalition. Secondly, a belief structure was introduced to characterize the probabilities of high, medium, low, and unknown scenarios for the coalition's revenue. Finally, the uncertain Owen value was used to estimate the interval revenue of the EIP in the coalition one time slot in advance. The simulation results show that the accuracy of this forecasting method under the two risks of channel risk and server failure is 91.25% and 82.5% respectively, with an average accuracy of 86.88%, achieving a relatively accurate forecast of the EIP' revenue.

Keywords: edge computing, uncertain coalition structure game, belief structure, uncertain Owen value, revenue estimation

0 引言

随着新一代 5G、6G 移动通信技术的迅猛发

展, 传统的云计算模型已无法满足具有实时操作要求、低时延和高服务质量 (QoS, quality of service) 需求的应用场景。边缘计算作为一种新兴的计算范

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-12-19

基金项目: 甘肃省重点研发计划基金资助项目 (No.20YF8GA123); 甘肃省高校教师创新基金资助项目 (No.2024B-059); 兰州交通大学青年科学基金资助项目 (No.1200061307)

Foundation Items: The Key Research and Development Program of Gansu Province (No. 20YF8GA123), Innovation Fund for Teachers in Colleges and Universities of Gansu Province (No.2024B-059), Lanzhou Jiaotong University Youth Science Foundation Program (No.1200061307)

式, 为满足上述需求提供了解决方法^[1-4]。但与云计算相比, 边缘节点的计算能力十分有限^[5-6], 对于计算密集型任务, 单一节点的计算资源可能无法满足其需求, 因此边缘基础设施供应商 (EIP, edge infrastructure provider) 之间寻求合作, 形成边缘联盟^[7]进行资源共享成为一种可行的解决方案。边缘联盟作为一种资源共享和协作机制, 其允许联盟中有资源需求的成员调用未被使用的空闲资源^[8]为其提供服务。但联盟的构建是一个相对复杂的过程, 在请求到达后再进行动态化的联盟生成难以满足时延敏感型任务的需求。因此, 在实际应用中, 通常基于对前期应用请求的预测分析, 提前规划并构建联盟结构。然而实际边缘计算环境中存在不确定性风险, 极大地增加了准确预测请求到达率的难度, 进而造成应用请求与计算资源的失配问题。资源失配指应用请求所需的资源量超出了实际可提供的资源量, 反之亦然。针对该问题, 本文首次融合信念结构与 Owen 值^[9], 研究不确定性边缘计算环境下联盟 EIP 的收益预估问题, 为形成满足应用服务 QoS 以及稳定的边缘联盟提供技术支撑。

近年来, 边缘计算中联盟领域的研究主要集中在联盟的构建以及收益的分配。其中边缘联盟的构建方法大致可分为启发式算法与合作博弈方法。在启发式算法研究方面, 文献[10]中将边缘资源的调度问题转化为最优联盟结构的求解问题, 通过设计基于 M 进制的离散粒子群优化算法来快速得到最优联盟结构。尽管文献[10]成功求解了最优联盟结构, 但并未考虑联盟结构生成的内在质量问题。在此基础上文献[11]针对联盟结构生成的质量问题, 提出了一种两阶段的边缘联盟结构生成方法。第一阶段, 通过讨价还价机制消除不可行的联盟结构, 进而缩小联盟结构的搜索空间; 第二阶段, 提出了一种 M 进制离散粒子群优化算法, 优化了最优解的质量。虽然文献[11]提出的算法在单一任务环境下提高了最优联盟结构的生成速率, 但并未考虑更为复杂的多任务场景, 因此文献[12]基于对边缘计算环境中多任务并发场景的考虑, 提出了一种基于离散最近过去位置更新策略的多进制离散粒子群优化算法, 在求解最优联盟结构的同时提高了联盟收益以及边缘节点完成任务的效率。在合作博弈的方法中, 文献[13]将移动边缘计算与 5G 网络结合, 提出了一种基于博弈的多服务提供商协同服务缓存

方案。其中服务提供商通过与其他成员共享边缘服务器资源和成本形成服务联盟, 使联盟具有纳什均衡性的同时更获得了高利润。以上文献均从边缘联盟构建方法的角度进行阐述, 但并未考虑构建联盟时存在的不确定性风险以及用户请求的动态实时变化对联盟收益和稳定性的影响。

边缘联盟的收益分配常使用 shapley 值的分配方法。文献[14]提出了一种基于 shapley 值的收益分享激励机制, 该机制利用 shapley 值计算收益分配, 体现其效率性与公平性, 鼓励移动边缘计算服务提供商之间合作生成边缘联盟, 但未考虑利用 shapley 值生成最优联盟。文献[15]提出了一种基于 shapley 值的计算卸载方法, 该方法通过非线性规划得到的目标值评估不同联盟的收益, 并利用这些收益计算 shapley 值来确定最优联盟。然而, 尽管文献[15]在利用 Shapley 值生成最优联盟方面做出了贡献, 其研究仍未涉及对联盟结构稳定性的深入探讨。对此, 文献[16]设计了一种分布式联盟生成算法, 该算法允许每个雾基础设施供应商决定合作对象的同时利用 shapley 值计算联盟中的利润分配, 最终生成稳定的联盟结构。

但上述文献仅研究了确定性环境下边缘联盟的构建及收益的分配, 却忽略了边缘计算环境中存在的不确定性风险, 如通信信道的不稳定性、边缘服务器的故障风险, 以及用户请求的动态随机性等。这些风险因素可能导致计算资源的供需失衡, 即资源失配现象。这种失配现象降低了 EIP 的收益, 并产生一定的资源浪费或 QoS 难以满足等问题^[17-20]。

针对上述问题, 本文旨在构建一种适应性强的不确定性边缘联盟, 该联盟通过动态调整参与处理任务的 EIP 集合, 以应对环境变化和任务需求。然而, 不确定性边缘联盟的形成过程涉及 EIP 间频繁通信和实时的资源分配调整, 这不仅增加了 EIP 的通信开销, 也可能导致任务的处理时延增加。因此, 本文提出了一种基于不确定联盟结构博弈的边缘联盟及其成员 EIP 的收益预估方法, 该方法能够在不确定性边缘联盟形成前, 对联盟及其成员 EIP 的收益进行范围性预估。这种预估机制为联盟的组成提供了有力的决策依据, 有助于实现资源的优化配置和任务的高效执行。

针对通信信道风险和边缘服务器故障 2 种不确定风险引发边缘联盟中资源失配, 以及联盟成员

EIP 间动态调整资源所导致的通信开销和处理任务时延增加的问题, 本文的解决方案如下。

1) 采用混合整数线性规划方法, 构建资源调度优化模型。通过对模型的求解, 确定最优的资源分配方案, 并在此基础上建立边缘联盟的收益求解模型, 获得边缘联盟的最大收益^[21-22]。

2) 讨论一种不确定性边缘联盟模型的构建, 对资源进行动态调整。以信念结构表征联盟的高、中、低等收益概率, 并结合不确定联盟结构博弈的方法, 对不确定性边缘联盟的收益区间进行预估。

3) 通过引入不确定 Owen 值^[9], 在联盟收益区间预估基础上进一步对 EIP 的收益进行区间预估。实验结果表明, 本文提出的预估方法能够在考虑不确定风险影响的同时, 提前一个时隙对 EIP 收益进行较为精准的预估, 此预估机制为联盟的构建提供了坚实的决策支持。

1 系统模型

1.1 服务器年化率与信道风险模型

边缘计算作为一种新兴的分布式计算架构, 其在提供接近数据源计算能力的同时, 不可避免地面临多种风险因素的挑战。特别是通信信道风险和边缘服务器故障 2 种不确定性风险, 它们对边缘计算环境中的资源调度和任务执行具有显著影响。因此, 本文构建这 2 种风险模型, 以量化评估其对边缘联盟收益及资源配置的影响。

1) 服务器年化率模型

在边缘计算环境中, 服务器的可靠性是通过其故障率来衡量的。故障率, 即服务器在一定时间内出现故障的频率。较低的故障率说明服务器可提供更加连续和可靠的服务。然而, 当服务器发生故障时, 它将直接影响 EIP 的可用资源池, 从而减少可用于处理计算任务的服务器数量。为量化服务器故障这一影响因素, 本文采用年化故障率这一指标, 在考虑时间因素的基础上, 对服务器全年故障频率进行了估计。用 sr 表示服务器年化率, sr 应满足 $0 \leq sr < 1$, EIP 理想情况下的资源数量用 nvm 表示, 当 $sr = 0$ 时表示服务器无故障发生属于理想情况, 第 i 种年化故障率表示为 $sr_i (i = 1, 2, \dots)$, sr_i 下的 EIP 资源数量如式(1)所示。

$$nvm_{sr_i} = nvm(1 - sr_i) \quad (1)$$

当 $nvm_{sr_i} \leq r_i$ 时, $n_i = nvm_{sr_i}$, 反之 n_i 不变。其

中 n_i 为处理应用请求应分配的计算机资源块数量即资源需求量。当年化故障率 sr_i 下 EIP 拥有的资源量小于需求资源量时, 用故障率下的资源量对 EIP 收益进行计算, 反之用资源需求量计算。

2) 信道风险模型

在任务传输到边缘服务器过程中, 由于通信信道不稳定可能导致任务传输时延、部分任务数据在传输过程中损坏或丢失等问题, 使得服务器接收到的待处理任务数量减少, 这种信道不稳定情况称为信道风险。信道风险用 r 表示, r 应满足 $0 \leq r < 1$, 当 $r = 0$ 时表示无信道风险属于理想情况, 第 i 种信道风险记为 $r_i (i = 1, 2, \dots)$, 实际请求量为 ac 应满足 $0 < ac \leq \lambda$, 第 i 种信道风险下服务器接收到的实际任务请求量如式(2)所示。

$$ac_{r_i} = \lambda(1 - r_i) \quad (2)$$

式(2)中的实际请求量应分配的计算机资源 n_i , 最后通过 1.3 节中边缘联盟收益模型的描述对信道风险影响下的联盟收益进行求解。

1.2 不确定性边缘联盟模型

设 $\mathcal{N} = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 表示 EIP 的集合, 每个 EIP 拥有相同数量的边缘节点, $\mathcal{M} = \{1, 2, 3, \dots, M\}$ 表示边缘节点的集合, 其中 $|\mathcal{N}| = N$ 和 $|\mathcal{M}| = M$ 分别表示 EIP 和边缘节点的数量。EIP 可能构成的联盟集合可用 P^N 表示, $P^N = \{C_1, C_2, \dots, C_{|P^N|}\}$,

$\bigcup_i^{P^N} C_i = \mathcal{N}, \forall i \neq j \text{ 且 } C_i \cap C_j = \emptyset$ 。设边缘服务提供商 (ASP, application service provider) 集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_s\}$, ASP u_i 提交的任务数量用 λ_i 表示, 当提交 λ_i 的任务量时会有匹配的联盟 C_i 及时处理提交的任务。例如在图 1 不确定性边缘联盟的示例中, 在发送任务量为 λ_1 的任务时, 应由 EIP₂、EIP₃ 和 EIP₄ 组成联盟 C_2 为其提供资源处理任务, 但由于任务传输过程中信道风险的影响使得任务量 λ_1 减少为 λ'_1 , 此时联盟 C_2 出现资源浪费情况, 则由 EIP₂ 与 EIP₃ 组成的联盟 C_3 处理任务即可。在发送任务量为 λ_4 时, 由 EIP₁ 与 EIP₅ 组成的联盟 C_1 提供资源是合理的安排, 但由于 EIP₅ 发生服务器故障, 使得原联盟 C_1 出现资源不足的情况, 因此 EIP₁ 会寻求新的合作伙伴 EIP₄ 组成联盟 C_4 为任务量 λ_4 提供计算资源。这种在不确定边缘计算环境下生成的联盟定义为不确定性边缘联盟, 此种联盟形成可有效解决边缘联盟中的资源浪费或者资源不足的问题。

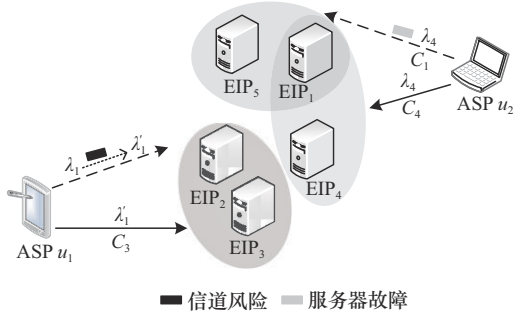


图1 不确定性边缘联盟示例

1.3 边缘联盟收益模型

每个EIP都追求其收益最大化，每个应用服务均被部署在一个独立的虚拟机（VM）实例中，其中每个VM映射到特定的计算资源中。因此，EIP的节点设施必须部署一个虚拟化层，以便为这些VM提供运行环境。设 $ND(f)$ 表示EIP f 的所有边缘节点的集合， $\gamma_q(\mu_q)$ 为边缘节点 q 的实际功耗，如式(3)所示。

$$\gamma_q(\mu_q) = \mu_q W_q^{\max} + (1 - \mu_q) W_q^{\min} \quad (3)$$

其中， W_q^{\max} 和 W_q^{\min} 分别表示CPU在充分利用状态下以及空闲状态下的功耗， $\mu_q \in [0,1]$ 为边缘节点 q 的资源利用率。 $\theta(i)$ 是一个映射函数，表示含有应用服务 $\theta(i)$ 的EIP，EIP $\theta(i)$ 的净收益表示为 $F_{\theta(i)}$ ，如式(4)所示。

$$F_{\theta(i)} = R_{\theta(i),u_i} n_i - C_{\theta(i)} \quad (4)$$

其中， $R_{\theta(i),u_i}$ 表示EIP $\theta(i)$ 运行一个VM处理来自ASP u_i 发送请求的收益， n_i 表示处理请求应分配的计算资源块数量。EIP $\theta(i)$ 的成本用 $C_{\theta(i)}$ 表示，由其未完成QoS要求所交罚金和耗电电价组成，如式(5)所示，罚金 $P_{\theta(i)}$ 和电价 $E_{\theta(i)}$ 如式(6)和式(7)所示。

$$C_{\theta(i)} = P_{\theta(i)} + E_{\theta(i)} \quad (5)$$

$$P_{\theta(i)} = p_{\theta(i),u_i} a_i(n_i < D_i) \quad (6)$$

$$E_{\theta(i)} = \sum_{q \in ND(\theta(i))} x_q \gamma_q(\mu_q) e_{\theta(i)} = \sum_{q \in ND(\theta(i))} W(x_q, \mu_q) e_{\theta(i)} \quad (7)$$

$$W(x_q, \mu_q) = x_q W_q^{\min} + (W_q^{\max} - W_q^{\min}) \mu_q \quad (8)$$

其中， D_i 表示满足应用服务 i 时延要求的最少资源块数量，当 $n_i < D_i$ 时，二元变量 $a_i = 1$ 表示给应用服务 i 分配的计算资源块不能满足QoS的要求，反之 $a_i = 0$ ，当ASP u_i 的QoS不能得到满足时，则EIP $\theta(i)$ 会支付一定罚金 $P_{\theta(i)}$ 给ASP u_i ； $e_{\theta(i)}$ 为

EIP $\theta(i)$ 所耗电的单价， x_q 表示边缘节点 q 是否开启的二元变量， $x_q = 1$ 为开启状态，反之则为关闭状态。

表1 系统参数

参数	含义
\mathcal{N}, N	EIP的集合及其数量
\mathcal{M}, M	边缘节点的集合及其数量
ν	所有VM的集合
U	ASP的集合
λ	ASP发送的任务数量
$ND(\theta(i))$	EIP $\theta(i)$ 中边缘节点集合
μ_q	边缘节点 q 上的资源利用率
W_q^{\max}, W_q^{\min}	边缘节点 q 的最大功耗和最小功耗
$F_{\theta(i)}$	EIP $\theta(i)$ 的净效用
$R_{\theta(i),u_i}$	EIP $\theta(i)$ 运行一个VM所获得收益
n_i	为应用服务 i 分配的计算资源块的个数
$C_{\theta(i)}$	EIP $\theta(i)$ 的成本
$p_{\theta(i)}$	EIP $\theta(i)$ 应支付的罚金
$E_{\theta(i)}$	EIP $\theta(i)$ 支付的总电价
x_q	边缘节点开关状态的二元变量
D_i	满足应用服务时延的最小计算资源块数
$e_{\theta(i)}$	单位时间收取EIP $\theta(i)$ 的电费
C	由EIP组成的联盟
$\Psi(C)$	联盟 C 的净效用
\mathcal{M}_C	联盟 C 中边缘节点的集合
S_C	运行联盟 C 中边缘节点上应用服务的集合
ac_{r_i}	第 i 种信道风险下的实际任务请求量
nvm_{sr_i}	第 i 种服务器年化率下的EIP资源量

由于2.3节需采用信念结构对联盟净收益进行概率表征，因此首先要计算每个联盟 C 的净收益 $\Psi(C)$ 。基于此，本文构建了基于混合整数线性规划的模型来求解最优的资源调度方案，求解 $\Psi(C)$ 。该模型可以找到VM的集合 ν 在联盟 C 中边缘节点上的最佳分配 $\mathcal{M}_C = \bigcup_{i \in C} ND(\theta(i))$ 以运行应用服务 $S_C = \{i: \theta(i) \in C\}$ 。为了简化表示，定义向量 $\mathbf{R} = (R_{\theta(i),i})_{i \in S_C}$ ， $\mathbf{n} = (n_i)_{i \in S_C}$ ， $\mathbf{P} = (P_{\theta(i)})_{i \in S_C}$ ， $\mathbf{W} = (W_g(x_g, \mu_g))_{g \in \mathcal{N}_C}$ ， $\mathbf{a} = (a_i)_{i \in S_C}$ ， $\mathbf{E} = (E_{\theta(i)})_{\theta(i) \in C, g \in ND(\theta(i))}$ (g 表示边缘节点)，则边缘联盟的收益模型可表

示为

$$\Psi(C) = Rn - (aP + WE) \quad (9)$$

2 问题求解和算法设计

2.1 边缘联盟的收益求解

通过对边缘联盟收益模型的构建,本节以最大化边缘联盟收益为目标,得到如式(10)所示的优化问题。

$$\begin{aligned} \max \Psi(C) &= Rn - (aP + WE) \\ \text{s.t. C1: } &\sum_{q \in \mathcal{M}_C} y_{qj}, \forall j \in v \\ \text{C2: } &\sum_{j \in v} y_{qj} \leq |v|x_q, \forall q \in \mathcal{M}_C \\ \text{C3: } &\eta_q = \sum_{j \in v} y_{qj} \frac{1}{L_q}, \forall q \in \mathcal{M}_C \\ \text{C4: } &\eta_q \leq x_q, \forall q \in \mathcal{M}_C \\ \text{C5: } &n_{u_i} = \sum_{q \in \mathcal{M}_C} \sum_{j \in v, m(j) = u_i} y_{qj}, \forall u_i \in S_C \\ \text{C6: } &n_{u_i} \leq D_{u_i}, \forall u_i \in S_C \\ \text{C7: } &\mu_q \in \{0, 1\}, \forall q \in \mathcal{M}_C \\ \text{C8: } &y_{qj} \in \{0, 1\}, \forall q \in \mathcal{M}_C, j \in v \\ \text{C9: } &\mu_q \in \mathbb{R}^+, \forall q \in \mathcal{M}_C \\ \text{C10: } &n_{u_i} \in \mathbb{N}, \forall u_i \in S_C \end{aligned} \quad (10)$$

在该模型中,二元变量 y_{qj} 表示 VM_j 是否被分配到边缘节点 q 上,若是则 $y_{qj} = 1$,反之 $y_{qj} = 0$; L_q 表示边缘节点 q 至多托管VM的数量; $m(j)$ 表示一个从VM到应用服务的映射, $v \rightarrow S_C$,表示由 VM_j 运行的应用服务。该问题的目标函数 $\Psi(C)$ 表示由EIP组成的联盟 C 获得的净收益, $\Psi(C)$ 是EIP $\theta(i)$ 净收益 $F_{\theta(i)}$ 的扩展,约束条件C1为确保每个VM最多托管在一个边缘节点上,约束条件C2则是在确保在关闭的边缘节点上不会被分配VM。约束条件C3定义了 μ_q 为分配给边缘节点 q 上的VM总数与边缘节点 q 可托管的最大VM数量的比值。约束条件C4保证了比值 μ_q 不超过1(边缘节点 q 打开)或0(边缘节点 q 关闭)。约束条件C5是对变量 n_{u_i} 为分配给应用服务 u_i 的VM数量的定义。约束条件C6是对分配给每种应用服务的VM数量不超过实际需求的约束。最后约束条件C7~C10对变量 x_q 、 y_{qj} 、 μ_q 以及 n_{u_i} 的取值范围进行了约束。

2.2 边缘联盟收益的算法设计

根据式(10)中的收益最大化的优化问题以及约

束条件,本文提出了一种基于混合整数线性规划方法求解边缘联盟最大收益的算法。该算法通过求解最优的资源调度方案使得联盟收益达到最大化的目的。算法1针对边缘联盟收益的详细描述如下。

算法1 边缘联盟收益求解算法

输入 为应用服务 u_i 实际分配的资源量 n_{u_i} ,

EIP的集合联盟 C

输出 联盟 C 的净收益 $\Psi(C)$

- 1) 计算联盟成员数量,边缘节点总数量,分配的虚拟机总数量
- 2) 创建模型 model
- 3) 定义变量 x, y, u, flag, n
- 4) for k in C do
- 5) 计算 $n[k]$
- 6) 根据式(10)对 $n[k]$ 添加约束关系和等价条件
- 7) end for
- 8) for q in C do
- 9) 计算边缘节点 q 的收益
- 10) 根据式(10)对 q 的收益添加约束关系和等价条件
- 11) end for
- 12) for p in $\text{sum}(n_{u_i})$ do
- 13) 根据式(10)对 p 添加约束关系和等价条件
- 14) end for
- 15) 根据式(7)定义目标函数 objective
- 16) 计算收入、惩罚差值、能耗成本
- 17) $\Psi(C) \leftarrow$ 收入总和与总成本的差值
- 18) 最大化 objective
- 19) 求解 $\Psi(C)$

2.3 不确定性边缘联盟收益预估

2.3.1 信念结构

信念结构是一种基于证据理论的方法,它是个体或系统对特定命题或假设的置信水平的结构化表示,其与数学逻辑、概率论和贝叶斯网络等领域密切相关。在概率论的框架内,信念被量化为概率,即为一个命题的真值分配一个介于0和1之间的数值,用以表示对该命题真值的置信程度。它是处理不确定信息中的有效方法。设识别框架 β 为 N 个收集完备并互相排斥的命题组成的有限完备集,可以表示为 $\beta = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$, β 的所有子集用 2^β 表

示, $2^\beta = \{\emptyset, \{D_1\}, \dots, \{D_N\}, \{D_1, D_2\}, \dots, \beta\}$ 。若函数 $m: 2^\beta \rightarrow [0, 1]$ 满足: $m(\emptyset) = 0; \sum_{A \subseteq \beta} m(A) = 1$, 则 m 为信念结构。其中 \emptyset 为空集, A 为 β 中的任意子集, $m(A)$ 表示对命题 A 的置信度。

假设 $m^C (\forall C \in P^N)$ 是定义在识别框架 $\beta = \{D_1, D_2, D_3, \{D_1, D_2, D_3\}\}$ 上的信念结构, 识别框架 β 包含联盟的收益等级, 即 $D_1(H)$ 、 $D_2(M)$ 、 $D_3(L)$ 和 $\{D_1, D_2, D_3\}$ 分别表示联盟的高中低以及未知下的收益概率, 将无风险情况的联盟收益定义为高等收益, 信道风险下的联盟收益定义为中等收益, 信道风险与服务器故障率双风险下的联盟收益定义为低等收益, 其他情况定义为未知情况收益, 信念结构的计算式为

$$D_i = \frac{v^C(D_i)}{\sum_{i=1}^3 v^C(D_i)} (1 - \varepsilon) \quad (11)$$

其中, $v^C(D_i)$ 表示识别框架 β 中 D_i 的收益值, ε 表示上述风险中的不确定性, 即不确定权重因子。联盟收益的信念结构如表 2 所示。

表 2 联盟收益的信念结构

$\forall C \in P^N$	$D_1(L)$	$D_2(M)$	$D_3(H)$	$\{D_1, D_2, D_3\}$
$ C = 1$	0.3	0.2	0.3	0.2
$ C = 2$	0.3	0.2	0.4	0.1
$ C = 3$	0.2	0.2	0.4	0.2
$ C = 4$	0.2	0.2	0.4	0.2

2.3.2 不确定性边缘联盟的收益区间预估

在边缘联盟结构 P^N 上定义了具有信念结构的不确定联盟结构 (UCS, uncertain coalition structure) 博弈^[9] (P^N, m) 。UCS 博弈是一种合作博弈的理论框架, 它用于探讨在充满不确定性的环境中, 多个 EIP 如何通过形成联盟来实现收益最大化的问题。在这一框架下, 由于通信信道风险和服务器年化率等不确定因素的影响, 联盟的收益不再是一个确定的数值, 而呈现一种概率分布的特性。为量化这种不确定性, 引入信念结构对联盟收益的不同等级进行概率表征。由表 2 可知, UCS 博弈没有具体的收益值, 因此定义 UCS 博弈后, 采用以下两步法对此博弈进行求解。

1) 定义识别框架中元素之间的相对收益

在 UCS 博弈中, 由信念结构表示收益。为使

信念结构具有可支配的利润以及可比性, 首先定义 β 中任意两个元素之间的相对收益值, 给定 P^N 中联盟 C , 可将 D_i 的收益值设置为 D_j 的 k 倍, 直到考虑 β 中的所有元素。为降低收益函数的复杂性, 将其用链式表示, 通过式(12)可获得 β 中任意 2 个元素之间的相对收益值。

$$v^C(D_i) = f^C(i, i-1)(v^C(D_{i-1})), 2 \leq i \leq l \quad (12)$$

2) 消除收益值的非特异性^[9]

收益值的非特异性指除去收益值的普通情况, 只取最大值与最小值^[9]。不确定的联盟收益值用 \tilde{v}^C 表示, 若不确定联盟的收益情况可用信念结构表示, 则 \tilde{v}^C 可用 $v^C(D_i)$ 求解。例如, $m^C(D_1, \dots, D_p) = a (1 \leq p \leq l)$, 则信念结构下的收益值可用概率 a 与对应的收益值 $v^C(D_k)$ 相乘得到, 如式(13)所示。为消除收益值的非特异性, $v^C(D_k)$ 只取最大值和最小值即可, 如式(14)和式(15)所示。

$$v^C(m^C(D_1, \dots, D_p)) = av^C(D_k) \quad (13)$$

$$v^C(D_k) = \max \{v^C(D_1), \dots, v^C(D_p)\} \quad (14)$$

$$v^C(D_k) = \min \{v^C(D_1), \dots, v^C(D_p)\} \quad (15)$$

两步求解法表明信念结构实际表达了边缘联盟收益的区间值。因此可根据最优以及最坏情况消除收益值的非特异性求解信念结构 m^C 的收益值, 则信念结构 m^C 下的不确定性边缘联盟收益值 \tilde{v}^C 可用式(16)~式(18)表示。

$$\tilde{v}^C(m^C) = [v_L^C, v_R^C] \quad (16)$$

$$v_L^C = \min \tilde{v}^C(m^C) = \sum_{A \in 2^\beta} m^C(\beta) \left[\min_{D \in A} v^C(D) \right] \quad (17)$$

$$v_R^C = \max \tilde{v}^C(m^C) = \sum_{A \in 2^\beta} m^C(\beta) \left[\max_{D \in A} v^C(D) \right] \quad (18)$$

式(16)中的 v_L^C 表示边缘联盟 C 的最少收益, v_R^C 表示边缘联盟 C 的最多收益, 通过上面 2 个步骤将具有信念结构的 UCS 博弈转化成了区间值 UCS 博弈^[9] (P^N, m, \tilde{v}) , 即可得到信念结构下的边缘联盟收益区间预估值, 区间值 UCS 博弈 (P^N, m, \tilde{v}) 满足超可加性, 如式(19)和式(20)所示, S 与 T 是两个不同的联盟且交集为空。式(19)表明 S 与 T 合作收益大于二者单独所得收益。式(20)表明在最好或最坏情况下都符合超可加性。

$$\tilde{v}^{S \cup T}(m^{S \cup T}) \geq \tilde{v}^S(m^S) + \tilde{v}^T(m^T), \quad \forall S, T \in P^N, S \cap T = \emptyset \quad (19)$$

$$v_L^{S \cup T} \geq v_L^S + v_L^T, v_R^{S \cup T} \geq v_R^S + v_R^T, \quad \forall S, T \in P^N, S \cap T = \emptyset \quad (20)$$

2.4 不确定性边缘联盟中 EIP 的收益区间预估

利用 2.3 节中的方法获得联盟的收益区间, 如何分配收益给联盟中的 EIP 是值得研究的问题。通过引入不确定 Owen 值^[9]进行收益分配。不确定 Owen 值是对传统 Owen 值的改进, 来对不确定联盟结构博弈中的收益进行分配。不确定 Owen 值通过 Hukuhara 差 (处理区间数之间的差值运算) 的概念, 对区间值进行操作, 从而为每个联盟成员提供一个收益分配的区间。

区间值 UCS 博弈 (P^N, m, \tilde{v}) 的不确定 Owen 值可用 $\widetilde{Ow}(P^N, m, \tilde{v})$ 表示, 其具体的表示形式如式(21)和式(22)所示。

$$\widetilde{Ow}(P^N, m, \tilde{v}) = (\widetilde{Ow}^1, \widetilde{Ow}^2, \dots, \widetilde{Ow}^n) \quad (21)$$

$$\widetilde{Ow}^i = \sum_{R \subseteq M, p \notin R, C \subseteq C_p, i \notin C} \frac{|R|!(|M| - |R| - 1)}{|M|!} \cdot \frac{|C|!(|C_p| - |C| - 1)!}{|C_p|!} [\tilde{v}^{Q \cup C \cup \{i\}} - H^{\tilde{v}^{Q \cup C}}] \quad (22)$$

其中, \widetilde{Ow}^i 表示 EIP_{*i*} 的收益区间, $i \in \mathcal{N}$; $G = \{1, 2, \dots, |P^N|\}$ 是 P^N 中元素下角标的集合, $C_p \in P^N$, $\forall p \in G$, $\forall C \subseteq C_p$, $R \subseteq M \setminus \{p\}$; C_p 是边缘联盟结构 P^N 中的先验边缘联盟, 表示组成 C_p 的 EIP 已经有过合作经验预先组成小边缘联盟; C 是 C_p 的一个子集, 且 EIP_{*i*} 不在 C 中; $Q = \bigcup_{k \in R} C_k$ 表示由带有 R 中一部分下角标元素的联盟集合; $\tilde{v}^{Q \cup C \cup \{i\}} - H^{\tilde{v}^{Q \cup C}}$ 表示 EIP_{*i*} 加入联盟 $\{Q \cup C\}$ 后带来的收益变化。根据式(19), 可以将不确定性边缘联盟的收益分配给联盟中的 EIP, 即可得到 EIP 的收益预估区间。

3 实验与分析

为验证本文提出方法的有效性和准确性, 将预估出的不确定性边缘联盟中 EIP 收益与确定性边缘联盟中 EIP 分配的收益进行了对比。其中不确定性边缘联盟中 EIP 的收益预估是通过本文提出的方法得到的, 确定性边缘联盟的收益分配则采用 shapley 值的方法。

3.1 仿真参数设置

为方便计算分析, 实验设置 4 个 EIP, 其位置信息如表 3 所示。每个 EIP 中部署 4 个同构边缘节点, 即 $|\mathcal{N}| = 4$, $|\mathcal{M}| = 16$, 每个边缘节点上部署 5 台服

务器, 每台服务器设置 2 个虚拟机, 每个 EIP 拥有的最大资源量为 40 个资源 (一个虚拟机为一个资源), 其中最大功耗 W_q^{\max} 和最小功耗 W_q^{\min} 分别为 200 W 和 100 W。每个 EIP 的电价 $e_{\theta(i)}$ 为 0.5 CNY/KW·h。惩罚项 $P_{\theta(i)} = \rho R_{\theta(i), u_i}$, ρ 是惩罚因子, 为使 EIP 倾向于为其上的应用服务分配计算资源, 此处设 $\rho = 10$ 。

表 3 EIP 位置信息

序号	经度	纬度
1	103.766 148	36.094 906
2	103.734 671	36.096 411
3	103.699 030	36.049 601
4	103.750 487	36.114 235

3.2 确定性边缘联盟收益的仿真结果

本节主要关注边缘服务器年化率和信道风险 2 种风险因素对联盟及 EIP 收益的影响。其中服务器年化率直接影响 EIP 所能够提供的资源数量, 这一数量将低于其可提供资源的最大阈值, 即 40 个资源, 而信道风险则影响应用请求的到达数量, 导致在考虑信道风险的情况下所需的资源量低于理想状态下的资源需求量。这 2 种风险因素都对联盟以及 EIP 收益产生了显著的负面影响, 因此, 将以上两种风险因素纳入考量, 使得联盟及其成员的收益的预估更加符合实际的边缘计算场景。

1) 服务器年化率对 EIP 资源配置的影响

实验通过设定 4 种不同的应用请求实际到达率分析服务器年化率对 EIP 资源配置的影响, 实验结果如图 2 所示。首先随机生成 4 组应用请求量, 并据此计算出处理这些应用请求所需的资源量。在服务器年化率为 0 即服务器良好无故障发生情况下, 根据式(1)所得 EIP 的资源拥有量为 40 个; 当服务器年化率为 10% 时, 资源拥有量减少到 36 个, 表明服务器年化率的增长与 EIP 资源阈值的降低呈正相关。当实际到达率为 3 时, EIP₂ 所需资源量大约为 10 个, 在服务器年化率为 40% 的情况下, EIP₂ 的资源阈值为 24 个, 此时 EIP₂ 的资源配置存在过剩现象。类似地, EIP₃ 在实际到达率为 2 和 4 下、EIP₄ 在实际到达率为 3 下均出现资源浪费情况。值得注意的是, EIP₃ 在实际到达率为 1 下, 所需资源量约为 24 个, 对于服务器年化率为 40% 风险下的资源利用率为 100%, 而在其他风险水平下则表现

为资源浪费。此外，对于图2中所示的4种到达率情况，资源需求量超过阈值线的情况均指示出资源不足的问题。通过对图2的分析可以观察到，资源不足与资源浪费的比例分别约占56%和25%。由此可知，服务器年化率在联盟的资源配置中十分重要。

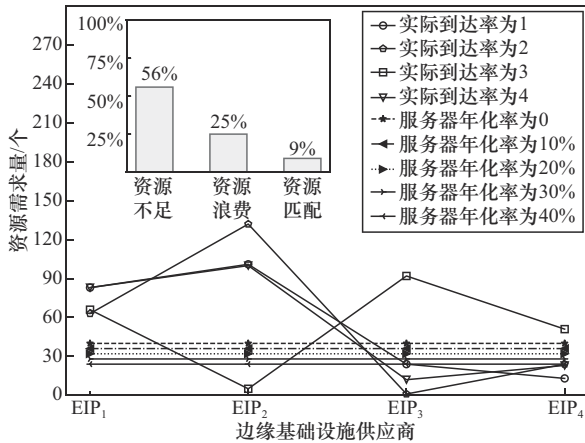


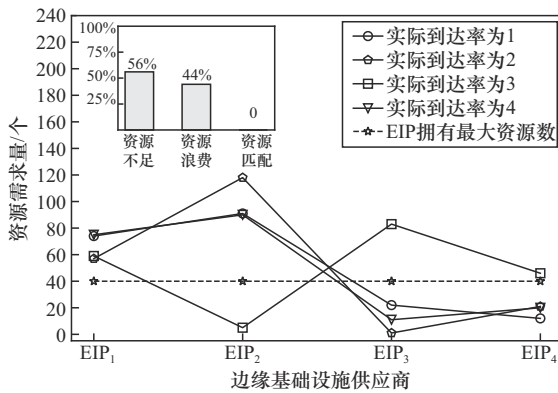
图2 服务器年化率对EIP资源配置的影响

2) 信道风险对EIP资源配置的影响

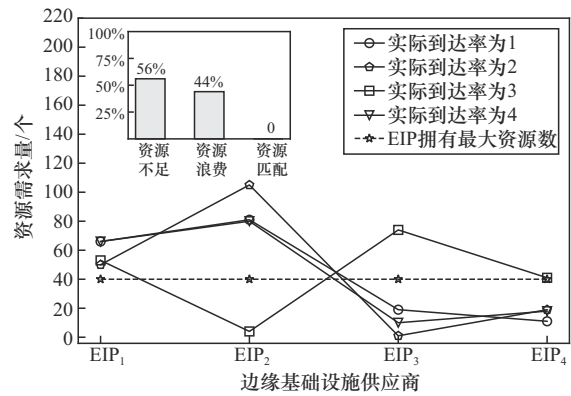
与图2类似，设定4种不同的应用请求到达量，

通过改变信道风险来分析资源配置情况。以图3中实际到达率为4下EIP₁所需资源量为例，随着信道风险增大，EIP₁所需资源量从图3(a)中的78个资源减少到图3(d)中的50个资源，这一趋势在其他信道风险水平下也得到了体现。这是因为信道风险通过影响应用请求的到达量而对EIP所需资源量产生影响。然而信道风险并不改变EIP拥有的最大资源阈值，这在所有图中表现为恒定的40个资源。进一步分析图3(a)~图3(c)可知，在资源配置中，资源不足与资源浪费分别占比约56%和44%；图3(d)中资源不足与资源浪费的情况达到了37.5%和50%，而资源匹配只占到了12.5%。由此可知，信道风险影响下，联盟中资源配置存在显著失配现象。综上，由年化率与信道风险影响下，对EIP所需资源量与EIP所含最大资源阈值的分析可知，资源不足与资源浪费是确定性联盟中普遍存在的问题。

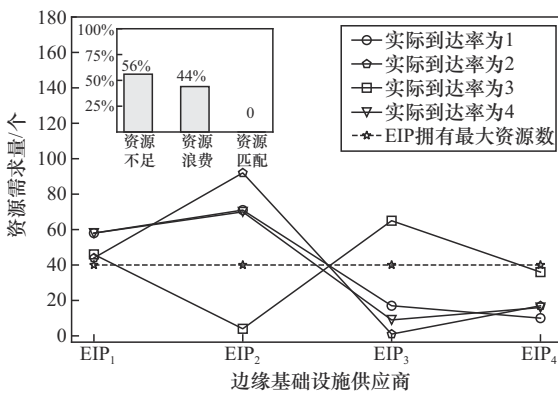
通过图2的分析可观察到，服务器年化率对EIP的最大资源阈值（40个资源）具有显著影响，进而对联盟整体收益产生间接影响。服务器



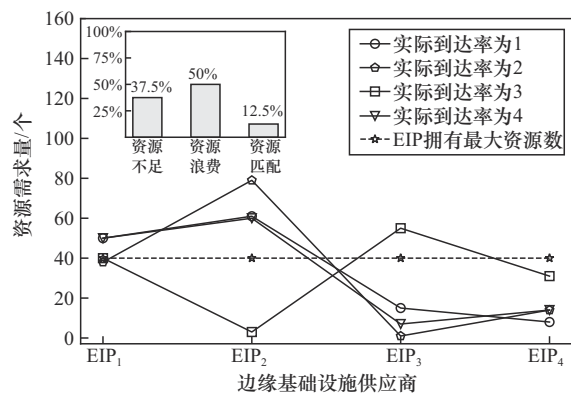
(a) 信道风险为10%下EIP资源需求量



(b) 信道风险为20%下EIP资源需求量



(c) 信道风险为30%下EIP资源需求量



(d) 信道风险为40%下EIP资源需求量

图3 信道风险对EIP资源配置的影响

年化率对联盟收益的影响如图 4 所示, 随着服务器年化率增加联盟收益呈现下降趋势。特别在理想情况下联盟效用减少得最为显著。原因在于, 理想情况下所需的资源量可能高达 100 个甚至更多, 最终降到 40 个, 此时联盟收益, 相较于其他服务器年化率出现了大幅度下降。图 5 中的情况与之类似, 信道风险为 0 到信道风险为 10% 之间联盟收益的减少幅度最为明显。

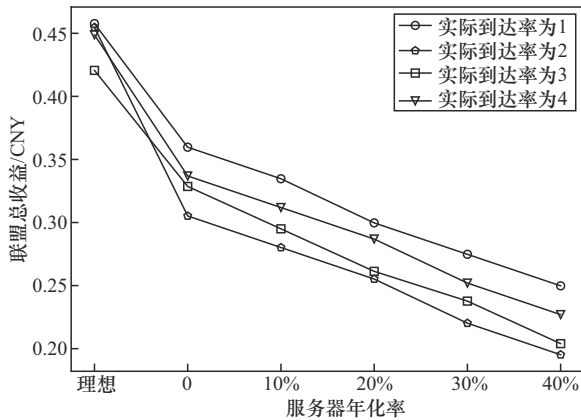


图 4 服务器年化率对联盟收益的影响

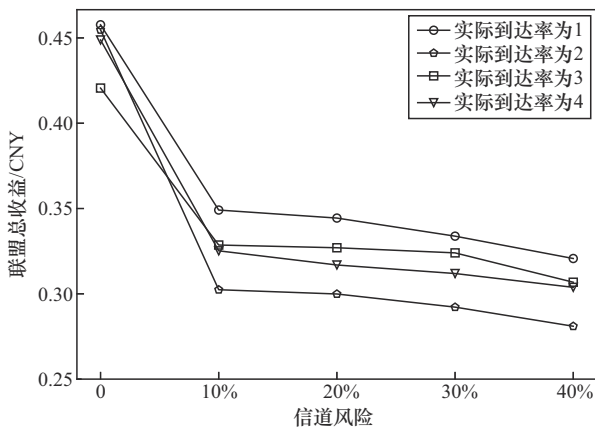


图 5 信道风险对联盟收益的影响

此外, 实验还分别比较了实际情况与理想情况下联盟与非联盟的收益差异, 如图 6 所示。综合考量了 2 种风险情况, 并将其统称为实际情况, 很明显看到, 实际情况下的联盟收益略大于实际情况下非联盟收益, 但实际到达率为 3 下二者收益相同, 这表明联盟与非联盟是相同的成员结构, 理想情况下联盟收益是最高的, 因为理想情况是无资源浪费与资源不足发生的, 所需资源与分配资源相匹配。因此资源配置不匹配情况会使联盟收益减少。

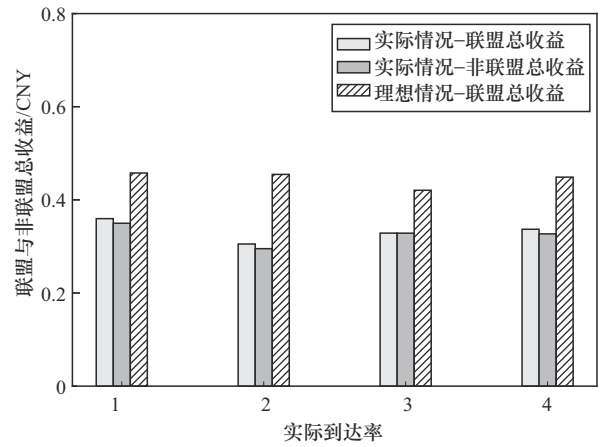


图 6 理想情况与实际情况下联盟与非联盟收益比较

3.3 不确定性边缘联盟中 EIP 收益预估验证

为验证本文提出的预估方法的准确性和有效性, 与实际中联盟收益的分配值进行对比分析。首先通过 Shapley 值的分配方法计算 EIP 在联盟中分配的收益值, 随后利用本文提出的预估方法, 确定 EIP 在不确定联盟中收益分配的可能范围。通过仿真实验, 分别考察了服务器年化率以及信道风险下的收益预估结果。本文通过设定 4 种不同类别的应用请求实际到达率^[22], 系统地分析了服务器年化率及通信信道风险对 EIP 资源配置的影响, 所涉及的应用请求类型如表 4 所示。

表 4 应用请求类型

应用请求序号	应用请求类型	时延约束/ms	VM 处理速率/(个·s ⁻¹)
1	医疗保健	5	500
2	视频加速	10	400
3	虚拟现实	20	300
4	在线游戏	30	200

1) 服务器年化率影响下 EIP 收益预估验证

实验对服务器年化率影响下 EIP 的收益预估进行了仿真分析, 并通过图 7 展示了 4 种不同到达率下的 EIP 收益预估区间结果。如图 7 所示, 空心点代表基于 Shapley 值计算的 EIP 收益, 而一系列横线则表示本文提出的预估方法所得出的收益区间。若空心点位于横线范围内, 则表示预估结果与实际收益相符。通过对比图 7(a)~图 7(d) 中的实验结果发现, 本文提出的预估方法在服务器年化率影响下的 EIP 收益预估的准确率为 82.5%。然而, 也存在一

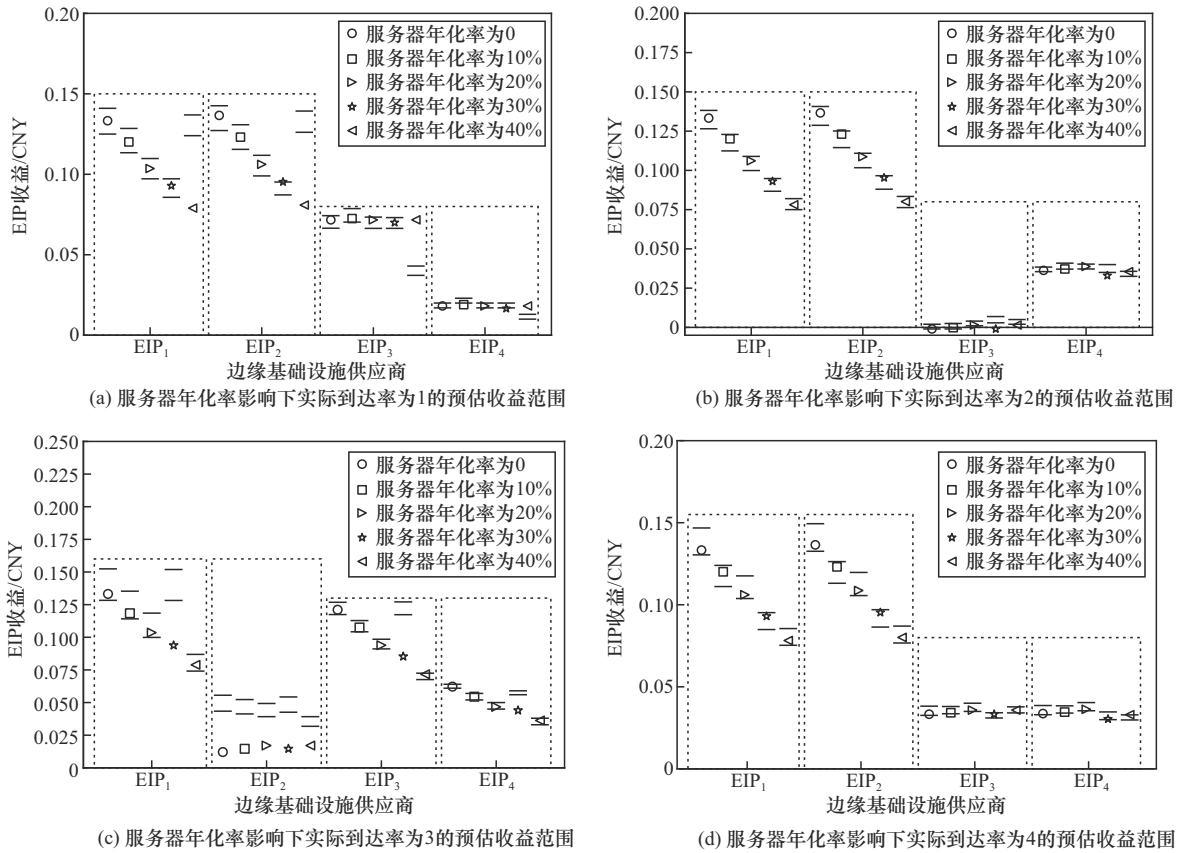


图7 服务器年化率影响下的预估收益验证

些预估偏差。在图7(c)中，EIP₂的收益分配值极少在0.025 CNY以下，导致预估区间未能准确覆盖实际收益。类似地，在图7(b)中，EIP₃分配的收益值接近于0，影响了预估的准确性。虽然图7(b)中EIP₃和EIP₄在服务器年化率为30%时的收益未被准确预估，偏差量极小分别约为0.003 CNY和0.002 CNY，但预估范围与目标值的接近程度也表明了一定准确性。值得注意的是，在图7(a)中，EIP₁、EIP₂和EIP₃在服务器年化率为30%时尽管图中显示的偏差较大，但实际的收益偏差仅为0.025 CNY，其他情况下预估偏差甚至更小，最小偏差约为0.008 CNY。因此，本文提出的预估方法在考虑服务器年化率对EIP收益的预估影响时，显示出了较高的预估准确率。

2) 信道风险影响下EIP收益预估验证

除服务器年化率的影响外，还对信道风险下的EIP收益进行了仿真分析。图8展示了在信道风险影响下，4种不同到达率条件下的EIP收益预估结果。与图7的表示方法不同，图8中基于Shapley值计算的EIP收益以实心点表示，若该实心点

位于预估区间的横线范围内，则表明本文的预估方法成功地捕捉了EIP收益的实际分布。在对信道风险进行分析时，发现本文提出的预估方法准确率为91.25%，略高于服务器年化率影响下的预估准确率，表明本文提出的预估方法在不同风险因素影响下具有稳健性。此外，与服务器年化率分析相似，也发现一些预估偏差的情况。这些预估偏差较大主要出现在实际到达率为3对EIP₂的收益预估，这与图7中观察到的现象一致。偏差大的主要原因是：EIP₂对联盟的贡献相对较小，当EIP₂与其他贡献较大的EIP形成联盟时，联盟的整体收益显著增加。以具体数据为例，EIP₂独自的收益为0.003 2 CNY，而与EIP₁组成联盟后的收益为0.136 5 CNY。由于对EIP₂的收益预估是基于联盟收益范围进行的，因此，这种联盟收益的显著增加导致了对EIP₂收益预估的偏差增大。

3) 周期性任务到达率影响下EIP总收益预估验证

在现实应用场景中，任务的到达模式往往表现出周期性特征，而非随机任意性。因此，本文

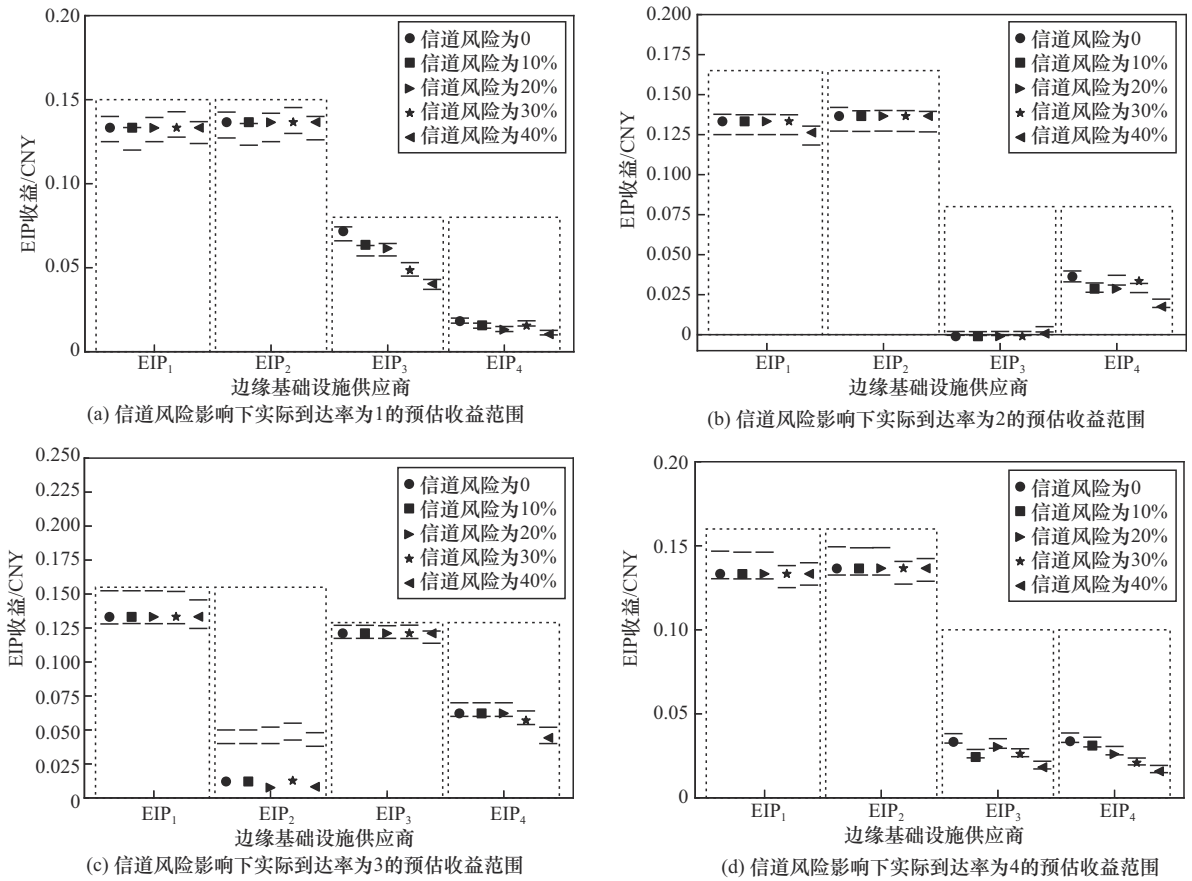


图8 信道风险影响下的预估收益验证

选取了加拿大卡尔加里大学提供的 ClarkNet-HTTP 请求日志数据集, 该数据集涵盖了连续 7 天的请求日志信息。通过对数据集的分析, 发现每天的任务到达率均呈现相似的变化趋势。为具体说明这一现象, 本文选取了其中一天的任务到达率变化情况, 并以图表形式进行展示, 如图 9 所示。选取了图 9 中标注的 4 个具有代表性的任务到达率, 对 EIP 总收益 (EIP₁、EIP₂、EIP₃和 EIP₄收益和) 进行了预估实验, 相关结果分别如图 10 和图 11 所示。

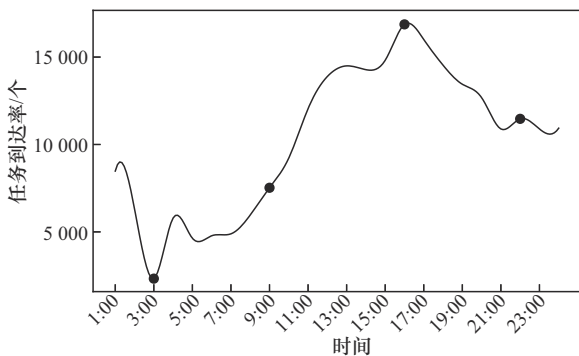


图9 一天的任务达到率变化情况

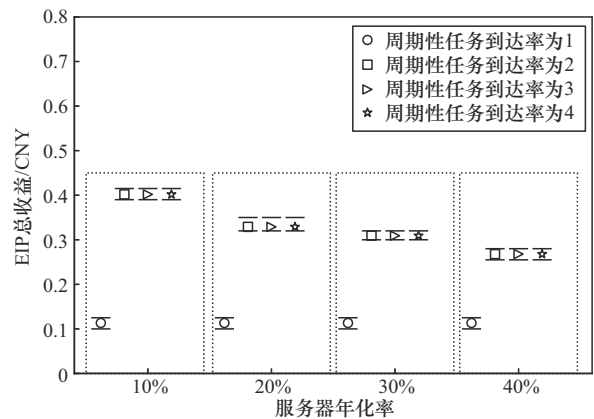


图10 服务器年化率影响下周期性任务到达率收益预估

图 10 中, 空心点代表基于 Shapley 值计算得到的 EIP 总收益, 而横线则表示本文提出的预估方法得到的收益区间。若空心点落在横线范围内, 则预估成功。实验结果表明, 本文提出的预估方法在考虑服务器年化率影响时, 能够准确预估 EIP 总收益的范围区间。在服务器年化率恒定时, 周期性任务到达率与预估的 EIP 总收益之间存在正相关性; 反之, 在周期性任务到达率恒定时, 服务器年化率与

EIP 总收益显示出负相关性。特别地在相同服务器年化率下, 周期性任务到达率为 2、3 和 4 对应的预估 EIP 总收益相等, 这一现象归因于服务器提供的资源已达上限 (服务器年化率为 10% 时资源上限为 36; 服务器年化率为 20% 时资源上限为 32; 服务器年化率为 30% 时资源上限为 28; 服务器年化率为 40% 时资源上限为 24), 无法进一步增加资源供应, 导致预估值保持不变。

图 11 展示了在信道风险影响下, 基于 Shapley 值计算的 EIP 总收益, 以实心点表示, 而本文提出的预估方法在信道风险不变的情况下, 同样能够准确预估 EIP 总收益的范围区间, 并且显示出周期性任务到达率与预估的 EIP 总收益之间的正相关性。此外, 在周期性任务到达率恒定时, 信道风险与 EIP 总收益呈现负相关性。上述实验证实了本文提出的预估方法在实际应用中的有效性和价值。通过综合分析服务器年化率、信道风险和任务到达模式, 本文为深入理解这些因素对 EIP 收益预估的影响提供了全面视角。

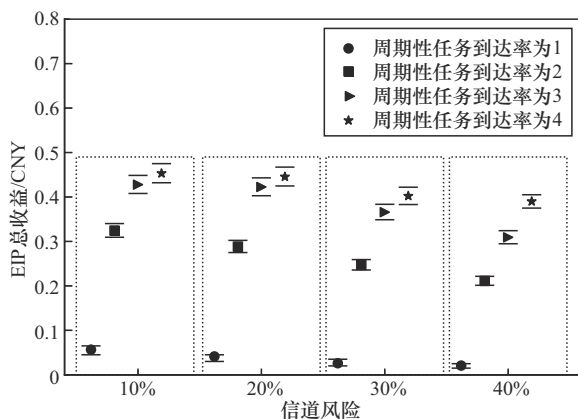


图 11 信道风险影响下周期性任务到达率收益预估

4 结束语

本文对边缘计算环境中不确定性边缘联盟的收益预估问题进行了研究。通过构建不确定性边缘联盟模型和资源调度优化方法, 以应对确定性边缘联盟在资源分配中的局限性, 并利用不确定 Owen 值对不确定性边缘联盟中 EIP 收益进行了预估。仿真结果表明, 本文提出的预估方法在通信信道风险以及服务器故障 2 种风险下的准确率分别为 91.25%、82.5%, 且平均准确率达到 86.88%, 实现了对 EIP 收益较为准确的预估。此外, 当考虑周期性任

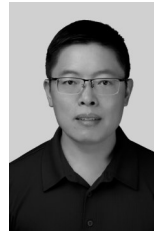
务到达率的情况下, 能够准确预估 EIP 总收益的范围区间, 进一步验证了本文提出的预估方法的有效性和鲁棒性。未来研究将着眼于任务到达量的预测机制, 首先收集边缘服务器日志中的任务量数据集, 这些数据集将作为训练预测模型的关键输入, 拟采用扩散模型, 一种能够捕捉任务到达动态性的时间序列分析方法, 以预测未来的任务量。然而在后续的工作中, 已预见在收集真实环境数据时将面临数据隐私保护、数据获取成本高和数据获取质量差等挑战。这种预测机制旨在构建更为完善的不确定性边缘联盟收益预估体系, 并进一步探索收益预估后稳定联盟结构的预测方法。

参考文献:

- [1] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—a key technology towards 5G[M]. Sophia Antipolis: ETSI, 2015.
- [2] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: the communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(4): 2322-2358.
- [3] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, et al. Mobile edge computing: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(1): 450-465.
- [4] 许斌, 赵云凯, 朱剑鸣, 等. 移动边缘计算不确定性任务持续卸载及资源分配方法[J]. 软件学报, 2024, 35(3): 1466-1484.
- [5] XU B, ZHAO Y K, ZHU J M, et al. Continuous offloading and resource allocation method of uncertain tasks in mobile edge computing[J]. Journal of Software, 2024, 35(3): 1466-1484.
- [6] STANTCHEV V, BARNAWI A, GHULAM S, et al. Smart items, fog and cloud computing as enablers of servitization in healthcare[J]. Sensors and Transducers, 2015, 185(2): 121-128.
- [7] LI Y J, ANH N T, NOOH A S, et al. Dynamic mobile cloudlet clustering for fog computing[C]//Proceedings of the 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4. [LinkOut]
- [8] ZHAO H V, LIN W S, RAY LIU K J. Cooperation and coalition in multimedia fingerprinting colluder social networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2012, 14(3): 717-733.
- [9] HAMMOUD A, SAMI H, MOURAD A, et al. AI, blockchain, and vehicular edge computing for smart and secure IoV: challenges and directions[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2020, 3(2): 68-73.
- [10] YU X H, HE M K, SUN H X, et al. Uncertain coalition structure game with payoff of belief structure[J]. Applied Mathematics and Computation, 2020, 372: 125000.
- [11] HU Y N, LI C S, ZHANG K J. A method of searching for optimal coalition structure for solving resource scheduling problem of overall load balancing in edge computing environments[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1550(3): 032080.
- [12] ZHANG K J, HU Y N, TIAN F, et al. A coalition-structure's generation method for solving cooperative computing problems in edge computing environments[J]. Information Sciences, 2020, 536: 372-390.

- [12] 赵庶旭, 韦萍, 王小龙. 多任务并发边缘计算环境中最优联盟结构生成策略[J]. 通信学报, 2023, 44(2): 172-184.
ZHAO S X, WEI P, WANG X L. Optimal coalition structure generation strategy in multi-task concurrent edge computing environment[J]. Journal on Communications, 2023, 44(2): 172-184.
- [13] LIN C C, YAO C A, WEI H Y. Collaborative edge caching with multiple virtual reality service providers using coalition games[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [14] CAO Z, ZHANG H G, LIU B Y, et al. A game-theoretic framework for revenue sharing in edge-cloud computing system[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 37th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [15] WANG Y Z, ZHAO D, GUO Z X, et al. CEL: cost-aware edge-assisted livecast via optimization with shapley value[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 7805-7816.
- [16] ANGLANO C, CANONICO M, CASTAGNO P, et al. Profit-aware coalition formation in fog computing providers: a game-theoretic approach[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2020, 32(21): 1-19.
- [17] HE X Q, WANG X, WANG S, et al. A shapley value-based incentive mechanism in collaborative edge computing[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [18] SARAH A, NENCIONI G, KHAN M M I. Resource allocation in multi-access edge computing for 5G-and-beyond networks[J]. Computer Networks, 2023, 227: 109720.
- [19] ZHANG Q, GUI L, HOU F, et al. Dynamic task offloading and resource allocation for mobile-edge computing in dense cloud RAN[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(6): 4132-4150.
- [20] FU K J, WANG C Y, WEI H Y. Straggler mitigation in edge-based split learning with coalition formation game[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-7.
- [21] LIU B Y, GUO J J, LI C L, et al. Workload forecasting based elastic resource management in edge cloud[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 106136.
- [22] 王小龙. 面向水平维度的边缘联盟结构生成研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
WANG X Research on edge coalition structure generation oriented to horizontal dimensions[D] Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.

[作者简介]



赵庶旭 (1976-), 男, 山东青岛人, 博士, 兰州交通大学教授, 主要研究方向为智能交通、边缘计算等。



夏心雨 (1997-), 女, 黑龙江大庆人, 兰州交通大学硕士生, 主要研究方向为边缘计算、边缘联盟等。



王小龙 (1989-), 男, 甘肃定西人, 博士, 兰州交通大学讲师, 主要研究方向为边缘计算、边缘联盟等。