

一种计及风险偏好的计算卸载激励远期合同

张碧玲* 焦正阳 刘家华 郭彩丽

(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 102206)

摘要: 边缘计算网络中,为了激励边缘计算节点(ECNs)参与计算卸载,以缓解计算服务供应商(SP)的计算压力,研究面向远期交易的激励机制。考虑到SP与ECNs之间的信息不对称,且ECN闲置计算资源的不确定性易导致合作风险,基于合同理论,提出一种计及风险偏好的计算卸载远期合同激励机制。首先,建立节点风险偏好模型;接着,定义个人理性(IR)约束和激励相容(IC)约束,将激励问题建模为最大化SP收益的远期合同设计问题;最后,化简约束并求解最优远期合同。仿真结果验证了所设计的远期合同的可行性和合理性,并证明该合同能有效激励ECNs参与计算卸载,提升了SP的收益。

关键词: 计算卸载; 合同理论; 远期合同; 风险偏好

中图分类号: TN919

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2025)03-0001-08

DOI: 10.11999/JEIT230617

A Computational Offloading Incentive Forward Contract Taking into Account Risk Appetite

ZHANG Biling JIAO Zhengyang LIU Jiahua GUO Caili

(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 102206, China)

Abstract: In edge computing networks, to stimulate the Edge Computing Nodes (ECNs) to assist in computation offloading to relieve the pressure of computing Service Provider (SP), a forward transaction oriented incentive mechanism is studied. Considering that there is information asymmetry between SP and ECNs and the uncertainty of ECNs idle resources can lead to cooperation risks, a risk-aware forward incentive mechanism based on contract theory for computation offloading is proposed. Firstly, a risk preference model for nodes is established; and then the Individual Rationality (IR) constraints and Incentive Compatibility (IC) constraints are defined, and the incentive problem is modeled as a forward contract design problem to maximize the benefits of SP; finally, the optimal forward contract is derived after constraint simplification. The simulation results verify the feasibility and rationality of the proposed forward contract, and prove that the contract can effectively incentivize ECNs to participate in computation offloading and increase the profits of SP.

Key words: Computation offloading; Contract theory; Forward contract; Risk preference

1 引言

随着物联网和新兴5G应用的快速发展,终端设备急剧增长^[1],应用服务程序不断丰富,延迟敏感型的计算需求大幅增长^[2]。为了缓解终端设备的计算压力,基于边缘计算的云原生和云计算算力调度方案应运而生,在遵循政策和隐私保护等法律规

定的前提下实现算力的调度。然而,当深度学习、物联网数据处理和自动驾驶等需要较大算力的计算任务较多,超出了边缘服务器的承载能力时,边缘计算的服务供应商(Service Provider, SP)会选择将部分任务卸载到附近有闲置计算能力的边缘计算节点(Edge Computing Nodes, ECNs)^[3-5],例如周边停车场上充电的电动车、附近居民楼里有计算能力的智能电视,或者是旁边办公楼里的个人电脑。由于SP和ECNs往往属于不同的利益体,且ECNs具有自私性,不会在没有合理报酬的情况下参与卸载^[4]。此时如何激励ECNs进行合作就变得尤为重要。

计算卸载的激励问题^[6]一直是学术界和工业界

收稿日期: 2023-06-21; 改回日期: 2024-04-29; 网络出版: 2024-05-15

*通信作者: 张碧玲 bilingzhang@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62171060)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62171060)

研究的热点。例如,为鼓励边缘服务所有者参与计算卸载,文献[7]将云服务运营商和边缘服务器所有者之间的交互行为建模为Stackelberg博弈,使两者的收益在均衡状态下达到最大。在文献[8]中,算力受限的任务发布者基于Stackelberg博弈设计激励机制,激励移动设备参与计算任务的协作,以减少物联网服务的延迟。文献[9]则设计了一种定价方案,激励ECNs接受卸载任务,增加云服务运营商的效用。然而,当前大部分计算卸载的激励机制都假设SP和ECN拥有协作所需的全部信息,当SP和ECN属于不同的利益体时,ECNs所具有的计算卸载特征,比如风险偏好、计算成本等并不为SP所知。此时上述假设不成立,基于该假设所设计的激励机制无法达到预期。

合同理论是用来解决机制设计中信息不对称问题的有效方法。基于合同理论,文献[3]将参与意愿作为卸载节点的特征,为边缘计算运营商设计包含共享计算资源量与报酬的激励合同,最大化运营商的收益。Yang等人^[4]根据车辆的停留时间设计了基于合同理论的合同,激励车队中的车辆向基站共享计算资源以增加基站的收益。在车辆雾计算的场景中,Zhao等人^[5]考虑车辆的共享计算资源属于隐藏信息,以最大化基站效用为目标设计合同,鼓励车辆帮助基站处理高峰时段过载的计算任务。然而,当前基于合同理论的激励机制绝大多数是面向现时交易^[10],所设计的合同在签订后即时执行或者认为在延迟执行时ECNs的特征信息不再改变。事实上,这些合同在进行现时交易时会出现决策延迟较大^[11]、交易价格不公平、优质节点难以寻找^[12]等多种问题。例如,ECNs收到卸载请求时,做出交易决策花费的时间不确定,会影响计算服务的时间。同时,优质节点可能被其他SP抢先签约。

为了避免现时交易中的问题,远期交易(或者期货交易)方式被广泛用于金融和商品交易市场。远期交易是指交易双方约定某种协议并在未来按照协议进行交易的方式,可以稳定价格、减小决策延迟、抵抗风险和减少实际交易前的失败^[13]。在远期交易中,ECNs的负载是动态变化的,其闲置资源存在不确定性,而合同设计时无法确定ECNs承接卸载任务的能力,这给远期交易激励机制的设计带来挑战。Zhang等人^[14]利用马尔可夫链来模拟卸载节点服务资源的动态变化,为流量卸载设计具有长期激励的远期合同。文献^[15]通过分析资源供应、需求和信道质量的变化,构建风险模型来设计激励机制。然而,在计算卸载领域,目前还没发现在信息不对称下考虑风险的远期激励机制。

因此,本文考虑SP在交易中处于信息不对称的弱势地位,基于合同理论设计远期交易激励机制,为ECNs提供合适的激励。具体工作如下:(1)基于ECNs的闲置资源的不确定性建立风险偏好模型,表征ECNs的风险态度;(2)基于合同理论设计了一种考虑风险的远期激励机制,并在此过程中创新性地给出了考虑风险的个人理性(Individual Rationality, IR)与激励相容(Incentive Compatibility, IC)约束表达式;(3)通过仿真结果验证远期合同的可行性与合理性,并且表明该激励机制能给SP带来更多收益。

2 系统模型

如图1所示,系统模型包含SP, ECNs和计算服务订阅用户。为应对计算服务订阅用户计算需求高峰,SP提前与ECNs签订远期合同,采取基于云计算IAAS的方案将部分任务卸载到ECN,并向ECN支付相应的报酬作为补偿,但如果ECN未能在规定时间内完成任务,则需向SP进行赔偿。

2.1 计算卸载模型

假设需要卸载的任务为 $T(x, t_{\max})$,其中 x 表示卸载的计算量, t_{\max} 为任务所允许的最大时延。为了简化,本文仅考虑计算时延,忽略传输时延的影响。假设ECNs用于处理来自SP卸载任务的空闲资源为 f (cycle/s), g 表示处理1 Byte数据平均需要的CPU运转cycle数,则完成该任务需要时间 $t(x) = gx/f$ 。同时,为了保证计算结果的实时性,ECNs的计算时延应满足 $t \leq t_{\max}$,对应能耗为 $e(x) = \kappa gx f^2$,其中 κ 是由芯片结构决定的开关电容效率,其取值大小由ECNs的CPU硬件决定。

由于SP卸载的任务会占用计算设备,所以ECNs的成本还应包括时间成本。因此,ECNs完成 $T(x, t_{\max})$ 的成本为 $c(x) = \mu^t t(x) + \mu^e e(x)$ 。其中,

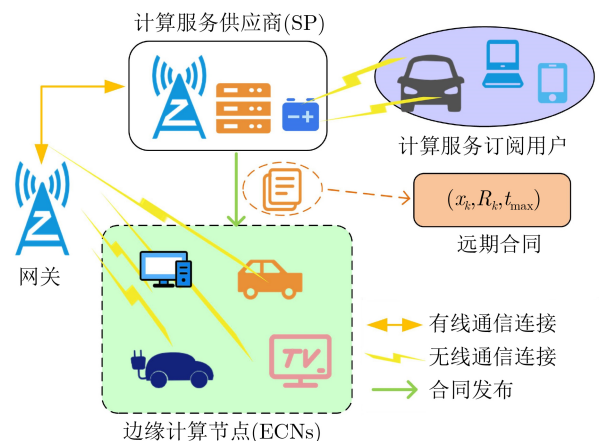


图1 计算卸载的远期交易场景

μ^t 是占用计算设备的时间成本因子， μ^e 是能耗的成本因子。

2.2 风险偏好和ECN的类型

出于自身业务重要性的考虑，ECNs会优先保证按时完成自身的计算任务，再考虑执行SP卸载的任务。假设ECNs的CPU固有计算频率为 f_0 ，计算资源闲置比率为 ς ，则ECNs可用于计算卸载任务的空闲计算能力为 $f = \varsigma f_0$ 。

现实中，由于ECNs自身计算业务的动态变化，其空闲计算能力也随之变化，因此 ς 是服从某种分布的随机变量。假设ECNs不能在 t_{\max} 内完成 x_k 计算量时，即 $gx_k/t_{\max} > f$ ，需要对SP进行赔偿并且名誉受损。本文将此事发生的概率定义为风险，即 $\Pr\{gx_k/t_{\max} > f\}$ 。不同的ECNs由于自身情况的差异，对风险的偏好不同。这里用ECNs对风险的忍受程度表征其风险偏好。如果某个ECN的风险偏好为 r_k ，意味着它能忍受的发生卸载任务不能按时完成的事件最大概率为 r_k ，即 $\Pr\{gx_k/t_{\max} > f\} \leq r_k$ 。

$$u_k(x_k) = \begin{cases} R_k - c(x_k), & x_k < \frac{ft_{\max}}{g} \\ R_k - c\left(\frac{ft_{\max}}{g}\right) - a \cdot \left(x_k - \frac{ft_{\max}}{g}\right), & x_k \geq \frac{ft_{\max}}{g} \end{cases} \quad (1)$$

其中， a 是由于ECNs未能及时完成计算任务产生的单位计算量(Byte)惩罚因子。

然而，在合同还没执行之前，ECNs和SP只能考虑期望收益而非实际收益。虽然双方都难以估计合同执行时ECNs的空闲计算资源，但是通过长期的观察和统计可以得到ECNs的计算资源空置率 $\varsigma \in [\varsigma_{\min}, \varsigma_{\max}]$ 的概率分布 \mathcal{F} ，并可算出空闲计算资源 $f \in [f_{\min}, f_{\max}]$ 的分布 $G(f)$ ，其中 $f_{\min} = \varsigma_{\min} f_0$ ， $f_{\max} = \varsigma_{\max} f_0$ ， f_0 (cycle/s)是ECN本地所有的计算资源。因此，ECNs接受合同 (x_k, R_k, t_{\max}) 的期望收益为

$$\bar{u}_k(x_k) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} u_k(x_k) G(f) df \quad (2)$$

面对SP提供的多种合同 $\{(x_k, R_k, t_{\max}) \mid k \in \mathcal{K}\}$ ，ECNs会选择签订期望收益最大的合同。

对于SP，与ECNs签订合同 (x_k, R_k, t_{\max}) 的实际收益为

$$U(x_k) = \begin{cases} hx_k - R_k, & x_k < \frac{ft_{\max}}{g} \\ \frac{hft_{\max}}{g} - R_k + a \left(x_k - \frac{ft_{\max}}{g}\right), & x_k \geq \frac{ft_{\max}}{g} \end{cases} \quad (3)$$

其中， h 是SP单位计算量对应的收益。类似地，其

为了区别不同的ECNs，将 r_k 定义为ECNs的类型。假设存在 K 种类型的ECNs，且构成集合 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ ，同时不妨令 $r_1 < r_2 < \dots < r_K$ 。风险偏好是ECNs的个人信息，为了在交易中可能获得更多利益，ECNs会隐藏自己真实的类型 $r_k, k \in \mathcal{K}$ 。所以，交易中SP并不知道某个ECN的具体类型，但是利用长期的观察和调查，SP可获得 \mathcal{K} 的取值分布。令ECNs类型为 r_k 的概率为 π_k ，有 $\sum_{k=1}^K \pi_k = 1$ 。

2.3 远期合同建模

考虑SP与ECNs交易中的信息不对称，基于合用理论，将SP作为委托人，ECNs作为代理人设计合同。合同的形式为 $\{(x_k, R_k, t_{\max}) \mid k \in \mathcal{K}\}$ ，其中， (x_k, R_k, t_{\max}) 是面向类型为 r_k 的ECNs设计的远期合同， x_k 表示卸载的计算量， R_k 是支付给ECNs的对应报酬， t_{\max} 为任务所允许的最大时延，时延要求对所有ECN都一样。

接受合同 (x_k, R_k, t_{\max}) 后，对于空闲计算能力为 f 的ECN，其实际收益为

期望收益为

$$\bar{U}(x_k) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} U(x_k) G(f) df \quad (4)$$

显然， f 的分布 $G(f)$ 对双方的收益均有较大影响。不妨假设 ς 服从均匀分布，则 $f = \varsigma f_0$ 也服从均匀分布，有 $G(f) = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}}$ 。进一步可以计算出此时ECNs的期望收益为

$$\bar{u}(x_k) = Ax_k^2 + Bx_k + C + R_k \quad (5)$$

其中， $A = -\frac{ag}{2t_{\max}(f_{\max} - f_{\min})}$ ， $B = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} \left(\mu^t g \ln\left(\frac{f_{\min}}{f_{\max}}\right) + \mu^e \kappa g f_0^2 (f_{\min} - f_{\max}) + af_{\min} \right)$ ， $C = -\frac{at_{\max}f_{\min}}{2g(f_{\max} - f_{\min})}$ 。同样，SP的期望收益为

$$\bar{U}(x_k) = A'x_k^2 + B'x_k + C' - R_k \quad (6)$$

其中， $A' = \frac{(a-h)g}{2t_{\max}(f_{\max} - f_{\min})}$ ， $B' = \frac{hf_{\max} - af_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}}$ ， $C' = \frac{(a-h)f_{\min}^2 t_{\max}}{2g(f_{\max} - f_{\min})}$ 。当存在 N_c 个ECNs时，SP与所有ECNs进行交易所获得的总期望收益为

$$\bar{U} = \sum_{k=1}^K N_c \pi_k \bar{U}(x_k) \quad (7)$$

其中, π_k 表示ECNs属于 r_k 类型的概率。

根据合同理论, SP设计的远期合同要具有可行性, 就需要满足个人理性(IR)约束和激励相容(IC)约束。

IR约束: SP制定的远期合同, 应保证ECNs可获得不低于预留效用 \bar{u} 的期望收益, 即

$$\bar{u}_k(x_k) \geq \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (8)$$

IC约束: SP制定的远期合同, 应使得ECNs只有在选择与之类型对应的合同时收益最大。

然而, 不同于传统的合同设计, 基于风险的远期合同由于将风险作为代理人的类型特征, 当试图使用传统的形式定义IC约束表达式时, 会出现约束无意义的问题。因为使用传统的形式^[16], IC约束应为

$$Ax_k^2 + Bx_k + C + R_k \geq Ax_j^2 + Bx_j + C + R_j, \quad \forall j, k \in \mathcal{K}, j \neq k \quad (9)$$

不难发现, 式(9)是无意义的约束, 因为式(9)中并没有出现类型信息 r_k , 因而并不是面向类型为 r_k 的ECNs, 而是适用于任意类型的ECNs。所以, 需要利用 r_k 进行分析得到IC约束的表达式。

由于 $\Pr\{gx_k/t_{\max} > f\} \leq r_k$ 不易使用, 考虑对其进行转化处理。根据 $G(f)$, 可以找到满足

$$\Pr\{f \leq f_{k,\max}\} = r_k \quad (10)$$

的 $f_{k,\max}$ 。令 $x_{k,\max} = \frac{f_{k,\max} t_{\max}}{g}$ 以证明 $x_k \leq x_{k,\max}$ 是 $\Pr\{gx_k/t_{\max} > f\} \leq r_k$ 的充分必要条件。显然, $x_{k,\max}$ 的取值大小由 r_k 决定, 根据 r_k 的大小关系不难得到 $x_{1,\max} < x_{2,\max} < \dots < x_{K,\max}$ 。当 $f = sf_0$ 服从均匀分布时, 那么 $G(f) = \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}}$ 。根据式(10),

有 $\Pr\{f \leq f_{k,\max}\} = \int_{f_{\min}}^{f_{k,\max}} \frac{1}{f_{\max} - f_{\min}} df = r_k$, 可得 $\frac{f_{k,\max} - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} = r_k$ 。进一步, 可以化简出

$$f_{k,\max} = r_k(f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min} \quad (11)$$

$$x_{k,\max} = \frac{t_{\max}(r_k(f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min})}{g} \quad (12)$$

根据上面的分析, 要满足ECNs的风险约束要求, 就必须满足 $x_k \leq x_{k,\max}$ 。换言之, 类型为 r_k 的ECN不会选择合同 (x_j, R_j) , $x_j > x_{k,\max}$, 而只会选择那些 $(x_l, R_l) \in \{(x_l, R_l), x_l \leq x_{k,\max}\}, \forall l \in \mathcal{K}$ 合同。下面, 根据风险约束引出引理1。

引理1 假设存在两引理1: 假设存在两个ECN, 如果ECN $_k$ 的风险忍受程度高于ECN $_j$, 即 $r_k > r_j$, 那么ECN $_k$ 能够接受的最大卸载计算量

$x_{k,\max}$ 与ECN $_j$ 的最大卸载计算量 $x_{j,\max}$ 存在 $x_{k,\max} \geq x_{j,\max}$ 关系。

证明 由于 $f_{\max} - f_{\min} > 0$ 和 $t_{\max} > 0$, 根据式(12)和 $r_k > r_j$, 可得 $x_{k,\max} = \frac{t_{\max}(r_k(f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min})}{g} \geq \frac{t_{\max}(r_j(f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min})}{g} = x_{j,\max}$, 即 $x_{k,\max} \geq x_{j,\max}$ 。

由文献[3,17]可知, 代理人的效用存在单调性, 即优质类型的代理人会获得比较差类型的代理人更多的收益。这在现实中很容易理解, 因为优质类型的代理人具有有利于委托人的特征, 应当成为委托人首先考虑的交易对象, 在设计合同中应当将更多的任务安排给较优类型的代理人, 同时给予报酬时也应使得较优类型的代理人收益不会低于较差类型的代理人收益, 这样才能保证合同的公平合理。

因此, 在所考虑的场景中, r_k 越大的ECNs得到期望收益越多, 即

$$\bar{u}_h(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l), \forall h, l \in \mathcal{K}, h > l \quad (13)$$

基于式(13), 从较优类型代理人不会选择较差类型的合同以及较差类型ECNs不会选择较优类型的合同两个方面来确定IC约束, 结果如定理1。

定理1 IC约束的等价条件为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_h(x_h) &\geq \bar{u}_l(x_l), \forall h, l \in \mathcal{K}, h > l \\ x_{k+1} &> x_{k,\max}, \forall k \in \mathcal{K}, k < K \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

证明 见附录A。

基于定理1, 使SP的总期望效用最大的远期合同的设计问题可建模为

$$\begin{aligned} \text{p1: } & \max_{\{(x_k, R_k), \forall k \in \mathcal{K}\}} \bar{U} \\ \text{s.t. } & \left. \begin{aligned} \text{C1: } & \bar{u}_k(x_k) \geq \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K}, \\ \text{C2: } & \bar{u}_h(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l), \forall h, l \in \mathcal{K}, h > l, \\ \text{C3: } & x_{k-1,\max} < x_k \leq x_{k,\max}, \forall k \in \mathcal{K}, k > 1 \end{aligned} \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

3 最优远期合同的求解

3.1 约束条件化简

根据2.3节的建模, 将求解问题p1以得到最优的合同集 $\{(x_k, R_k), \forall k \in \mathcal{K}\}$ 。注意到, 问题p1存在 K 个IR约束和 $K(K-1)/2$ 个IC约束, 所以首先化简这些约束, 得到定理2。

定理2 问题 r_k 中, 可行合同的IR(即C1)和IC约束(即C2和C3)的充分必要条件为:

- (1) $\bar{u}_1(x_1) \geq \bar{u}$
- (2) $\bar{u}_{k-1}(x_{k-1}) \geq \bar{u}_k(x_k), \forall k \in \mathcal{K}, k > 1$
- (3) $x_{k-1,\max} < x_k \leq x_{k,\max}, \forall k \in \mathcal{K}, k > 1$

证明 首先证明必要性。根据 $\bar{u}_h(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l), \forall h, l \in \mathcal{K}, h > l$ ，不难得到 $\bar{u}_k(x_k) \geq \bar{u}_{k-1}(x_{k-1}), k = 2, 3, \dots, K$ 。进一步地，可以推导出 $\bar{u}_1(x_1) < \bar{u}_2(x_2) < \dots < \bar{u}_K(x_K)$ ，即条件(2)。由于 $\bar{u}_k(x_k) > \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K}$ ，所以 $\bar{u}_1(x_1) > \bar{u}$ ，即条件(1)。接着证明充分性。当 $l < k$ 时，必然存在 $l < l+1 < \dots < k-1 < k$ 。那么，根据 $\bar{u}_{k-1}(x_{k-1}) \geq \bar{u}_k(x_k), \forall k \in \mathcal{K}$ ，可以得到 $\bar{u}_l(x_l) < \bar{u}_{l+1}(x_{l+1}) < \dots < \bar{u}_K(x_K)$ ，所以， $\bar{u}_l(x_l) < \bar{u}_k(x_k)$ 。由于 $\bar{u}_{k-1}(x_{k-1}) \geq \bar{u}_k(x_k), \forall k \in \mathcal{K}$ 和 $\bar{u}_1(x_1) \geq \bar{u}$ ，那么 $\bar{u}_k(x_k) \geq \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K}$ 。

定理2中，条件(1)是IR的充分必要条件，条件(2)和条件(3)是IC约束的充分必要条件。

根据定理1和定理2，可以将问题p1化简为

$$\begin{aligned} \text{p2: } & \max_{\{(x_k, R_k), \forall k \in \mathcal{K}\}} \bar{U} \\ \text{s.t. } & \left. \begin{aligned} \text{C1: } & \bar{u}_1(x_1) \geq \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K} \\ \text{C2: } & \bar{u}_{k-1}(x_{k-1}) \geq \bar{u}_k(x_k), \forall k \in \mathcal{K}, k > 1 \\ \text{C3: } & x_{k-1, \max} < x_k \leq x_{k, \max}, \forall k \in \mathcal{K}, k > 1 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

3.2 基于风险的远期合同设计问题求解

首先，分析约束条件，推导出远期合同的最优报酬。将 $\bar{u}_{k-1}(x_{k-1}) \geq \bar{u}_k(x_k), \forall k \in \mathcal{K}, k > 1$ 展开可以得到

$$Ax_{k-1}^2 + Bx_{k-1} + R_{k-1} < Ax_k^2 + Bx_k + R_k \quad (17)$$

整理式(17)可得

$$R_k > A(x_{k-1}^2 - x_k^2) + B(x_{k-1} - x_k) + R_{k-1} \quad (18)$$

进一步，可以推导出最优的报酬如定理3。

定理3 (1) 对 $k = 1$ ，远期合同最优的报酬为

$$R_1 = -Ax_1^2 - Bx_1 - C + \bar{u} \quad (19)$$

(2) 对于 $\forall k \in \mathcal{K}, k > 1$ ，当给出 x_k, x_{k-1} 和 R_{k-1} 时，远期合同的最优报酬应为

$$R_k = A(x_{k-1}^2 - x_k^2) + B(x_{k-1} - x_k) + R_{k-1} + \varepsilon \quad (20)$$

其中， $\varepsilon > 0$ 是无穷小，用于保持式(18)的不等关系。

证明 下面先通过反证法来证明(2)，再证明(1)。

当 $\forall k \in \mathcal{K}, k > 1$ 时，假设存在 $\hat{R}_j \neq R_j, j \in \mathcal{K}, j > 1$ ，使得优化目标函数增大，即 $\sum_{k=1}^{j-1} N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - R_k) + \sum_{k=j}^K N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - \hat{R}_j) > \sum_{k=1}^K N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - R_k)$ 。同样， \hat{R}_j 需要满足式(18)，所以

$$\hat{R}_j > A(x_{j-1}^2 - x_j^2) + B(x_{j-1} - x_j) + R_{j-1} \quad (21)$$

由于 \hat{R}_j 是满足式(18)的最小值，所以 $\hat{R}_j \geq R_j + \varepsilon$ 。对于 \hat{R}_{j+1} ，存在

$$\begin{aligned} \hat{R}_j & > A(x_j^2 - x_{j+1}^2) + B(x_j - x_{j+1}) + \hat{R}_j \\ & \geq A(x_j^2 - x_{j+1}^2) + B(x_j - x_{j+1}) + R_j + \varepsilon = R_{j+1} \end{aligned} \quad (22)$$

即 $\hat{R}_{j+1} > R_{j+1}$ 。以此类推， $\hat{R}_n > R_n, \forall n \in \mathcal{K}, n \geq j$ 。那么， $-\sum_{k=j}^K N_c \pi_k \hat{R}_k < -\sum_{k=j}^K N_c \pi_k R_k$ ，进一步得到 $\sum_{k=1}^{j-1} N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - R_k) + \sum_{k=j}^K N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - \hat{R}_j) < \sum_{k=1}^K N_c \pi_k (A'x_k^2 + B'x_k + C' - R_k)$ ，与最初假设 \hat{R}_j 存在相违背。所以，式(20)是 $j \in \mathcal{K}, j > 1$ 时最优的报酬。

当 $k = 1$ 时， R_1 应满足 $\bar{u}_1(x_1) \geq \bar{u}$ ，即 $Ax_1^2 + Bx_1 + C + R_1 \geq \bar{u}$ 。进一步可得 $R_1 \geq -Ax_1^2 - Bx_1 - C$ 。由于条件(2)保证了与 R_1 相关的IC约束， R_1 只需满足IR约束即可。假设存在 $\hat{R}_1 \neq R_1$ 且 $Ax_1^2 + Bx_1 + C + \hat{R}_1 \geq \bar{u}$ ，与条件(2)证明过程类似，不难证明式(19)是面向 r_1 类型ECN的最优报酬。

根据定理3，将 R_{k-1} 表达式代入 R_k ，经过层层迭代，可总结得到

$$R_k = -Ax_k^2 - Bx_k - C + (k-1)\varepsilon + \bar{u}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (23)$$

为了简便，令 $\bar{u} = 0$ ，可得 $R_k = -Ax_k^2 - Bx_k - C + (k-1)\varepsilon, \forall k \in \mathcal{K}$ ，代入问题p2的目标函数，整理后可以得到

$$\bar{U}(x_k) = (A' + A)x_k^2 + (B' + B)x_k + C' + C - (k-1)\varepsilon \quad (24)$$

因此，问题p2可进一步转化为

$$\begin{aligned} \text{p3: } & \max_{\{x_k, \forall k \in \mathcal{K}\}} (A' + A)x_k^2 + (B' + B)x_k \\ & + C' + C - (k-1)\varepsilon, \\ \text{s.t. } & \text{C1: } x_{k-1, \max} < x_k \leq x_{k, \max}, \forall k \in \mathcal{K}, k > 1 \end{aligned} \quad (25)$$

观察到 x_k 与 $x_j, k \neq j$ ，关系独立，问题p3可以分解为 K 个优化问题，对 $\forall k \in \mathcal{K}$ 独立求解 x_k^* 。所以有

$$\begin{aligned} p(k+3) : & \max_{x_k} v_k(x_k), \\ \text{s.t. } & \text{C1: } x_{k-1, \max} < x_k \leq x_{k, \max} \end{aligned} \quad (26)$$

其中， $v_k(x_k) = (A' + A)x_k^2 + (B' + B)x_k, k \in \mathcal{K}$ 。

对问题 $p(k+3)$ ，在 $[x_{k-1, \max}, x_{k, \max}]$ 上求解使 $v_k(x_k)$ 最大的 x_k ，而 $v_k(x_k)$ 在 $[x_{k-1, \max}, x_{k, \max}]$ 上连续，使用传统的方法不难求解 $x_k^* = \operatorname{argmax}_{x_k \in [x_{k-1, \max}, x_{k, \max}]} v_k(x_k)$ 。将最优的计算量 $\{x_k^*, \forall k \in \mathcal{K}\}$ 代入式(23)

可以得到 $\{R_k^*, \forall k \in \mathcal{K}\}$, 最终获得最优的远期合同集合 $\{(x_k^*, R_k^*), \forall k \in \mathcal{K}\}$. $\pi_k = 1/K, \forall k \in \mathcal{K}$

4 仿真实验

4.1 实验环境与参数设置

仿真实验基于MATLAB平台。ECNs类型服从均匀分布, 即 $\pi_k = 1/K, \forall k \in \mathcal{K}$. 其他参数见表1。

4.2 合同特性分析

首先验证远期合同的可行性。图2选取了 r_3 , r_8 和 r_{12} 3种类型的ECNs, 并设置 $f_0 = 2.6$ MHz, 计算它们选择不同远期合同获得的期望效用 \bar{u}_k 。从图2可见, ECNs只有在选择与自身风险偏好类型相符的合同时, 期望收益最大, 且不低于保留效用

表1 基本仿真参数设置^[18]

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
ECNs的个数 N_c	60	ECNs类型个数 K	12
设备占用权重因子 μ^t	0.05	单位数据的计算量 g (cycle/Byte)	5
能耗权重因子 μ^e	0.0003	开关电容效率因子 κ	1.2×10^{-11}
惩罚因子 a	0.01	SP任务收益 h (/Byte)	0.7
风险偏好 r_k $r_k = 0.4 + \frac{0.9 + 0.4 \times k}{12}$		收益因子 ε	10

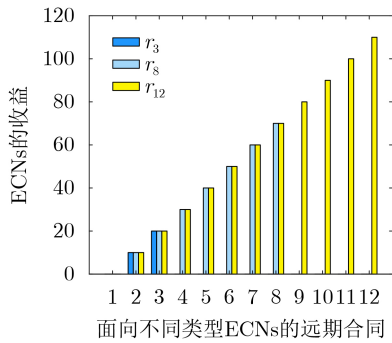


图2 远期合同的可行性

\bar{u} , 从而证明了合同符合激励相容约束和个人理性约束, 所设计的合同是可行的。

其次, 验证合同的单调性。如图3(a)所示, 在不同的CPU频率下, SP都会将更多的计算任务安排给更愿意承担风险的ECNs。相应地, 对于接受更多计算任务的ECNs, SP会给予更多的报酬, 体现了付出与收益的公平性, 如图3(b)所示。而SP与风险忍受程度高的优质ECNs合作, 也可以获得更多的收益, 如图3(c)所示。这样的分配不仅符合ECNs个体的意愿, 也有利于SP寻找到接受更多计算任务的优质卸载节点。上述结果验证了定理1中的结论, 体现了所设计远期合同的合理性。

4.3 激励方案性能分析

为了验证所提激励方案的性能, 将本文所提基于风险的远期合同(Risk-aware Forward Incentive Mechanism, RFIM)与2个风险单一的远期激励机制及1个信息对称下的远期激励机制对比。其中, 低风险远期激励机制(Low Risk Forward Incentive Mechanism, LRFIM)不考虑ECNs风险偏好的差异, 所有ECNs的风险忍受程度均为 r_1 ; 高风险远期激励机制(High Risk Forward Incentive Mechanism, HRFIM)认为ECNs风险偏好均为 r_{12} ; 马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)认为SP了解ECNs的风险偏好。

从结果图4(a)可知, 随着最大时延约束的增大, 每种激励机制下SP的期望收益都会增加。这是因为时间限制越宽松, ECNs就会考虑接受更多的卸载任务, SP也会因此增加收益。同理, 图4(b)中ECNs的CPU频率增加意味着计算资源的增多, 也会使SP的收益增加。然而, 无论是最大容忍时延变化还是CPU频率变化, 相比其他激励机制, MDP给SP带来的期望收益最多, 其次为RFIM。这是因为HRFIM由于设计的合同风险很高, 导致风险忍受程度低的ECNs不敢签约, 所以收益很

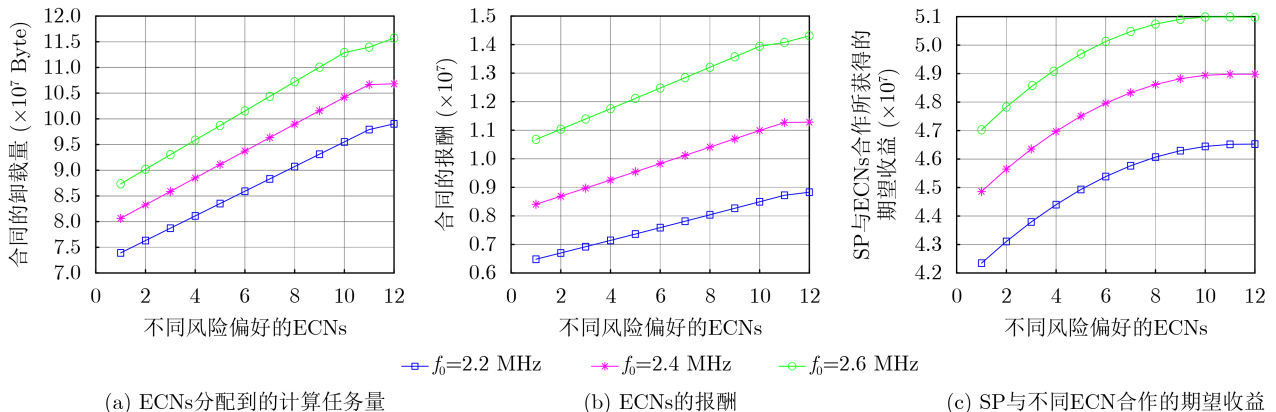


图3 远期合同的单调性

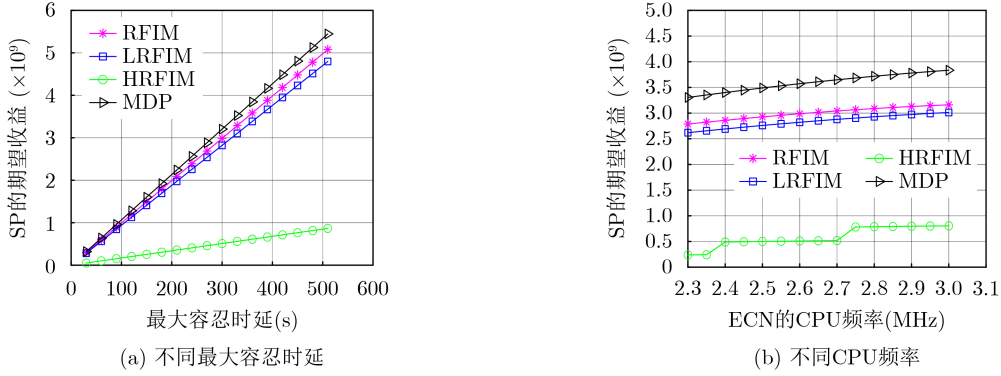


图4 不同激励机制下SP的期望收益

低。相反，LRFIM设计的合同过于保守，虽然所有ECNs都参与协作，但忽略ECNs风险偏好的差异使得任务分配较单一，不少ECNs的闲置资源没被充分利用。MDP模型中，SP了解ECNs的风险偏好和计算成本，故而会将价格降低到与ECN的成本相同，使得ECN收益为0而自身收益达到最大。因此，MDP方案的收益可看作信息不对称情况下收益的上限。而本文所提的RFIM方案在信息不对称的前提下充分考虑了ECNs的风险偏好信息，分配的计算任务量与风险承受程度相匹配，能够充分利用节点闲置资源增加SP的收益。因此，虽然RFIM中SP的收益不及MDP方案，但差距很小，这也进一步验证了RFIM在信息不对称下的优越性能。

5 结论

本文提出一种计及风险偏好的计算卸载远期合同激励机制。首先，考虑ECNs空闲资源的不确定性，对ECNs在计算卸载过程中的成本和远期合同风险进行建模。接着，基于ECNs的风险偏好，定义ECNs的类型以及IR和IC约束，在合同理论的框架内将SP与ECNs的交互构建为合同博弈，以克服计算卸载交易中信息不对称的影响。进一步，以最大化SP的期望收益为目标，给出最优远期合同的表达式。最后，通过数值仿真验证了该远期合同的可行性与合理性。实验结果证明，相对于其他激励机制，远期合同更能激励ECNs充分利用其闲置的计算资源，因而给SP带来更多的期望收益。

附录A:

证明过程分为两部分，即“较优类型代理人不会选择较差类型的合同”对应式(14)中的 $\bar{u}_h(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l)$ 和“较差类型ECNs不会选择较优类型的合同”对应式(14)中的 $x_{k+1} > x_{k,\max}$ 。

(1)根据引理1，类型较高的ECN可能会选择面向类型较低的ECN的远期合同，即 r_h 类型的ECN选择 (x_l, R_l, t_{\max}) , $l < h$ 。而根据代理人效用单调性，将 $\bar{u}_h(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l)$ 展开，可得

$$\begin{aligned} Ax_h^2 + Bx_h + C + R_h &\geq Ax_l^2 + Bx_l + C + R_l, \\ \forall h, l \in K, h > l \end{aligned} \quad (A1)$$

注意到，式(A1)左边也是 r_h 类型的ECN选择面向自身类型远期合同所得的收益 $\bar{u}_h(x_h)$ ，右边是 r_h 类型的ECN选择面向 r_l 类型ECN合同所得的收益。所以，根据式(A1)， r_h 类型的ECN为了获得最大的收益，必然选择 (x_h, R_h, t_{\max}) 而不会选择 (x_l, R_l, t_{\max}) 。因此，式(14)中保证了较优类型代理人不会选择较差类型的合同。

(2)为了证明类型为 r_l 的ECN不会选择面向更高类型的ECNs设计的合同 (x_h, R_h) , $h > k$ ，下面给出引理2。

引理2 类型为 r_l 的ECN不会选择面向更优类型ECN的合同 (x_h, R_h) , $h > l$ 的充分必要条件为 $x_{k+1} > x_{k,\max}$, $\forall k \in \mathcal{K}, k < K$ 。

证明 令类型为 r_l 的ECN选择的合同中的卸载量为 x'_l 。证明过程分两步，首先证明充分性。当存在 $x_{k+1} > x_{k,\max}$ 时，根据引理1，可得 $x_{k+1,\max} \geq x_{k+1} > x_{k,\max} \geq x_k$ 。那么，必然有 $x_{l,\max} < x_{l+n} = x_h$ ，其中 $h = (l+n) \in \mathcal{K}$ 。类型为 r_l 的ECN的卸载量为 x'_l ，那么 $x'_l \leq x_{l,\max} < x_h$ ，即 $x'_l \neq x_h$ ， r_l 类型的ECN不会选择高类型合同 (x_h, R_h) 。充分性得证。

下面通过反证法证明其必要性，即证明从 r_l 类型的ECN不会选择高类型合同 (x_h, R_h) 可以得到 $x_{k+1} > x_{k,\max}$, $\forall k \in \mathcal{K}$ 。不妨先假设 $x_{k+1} \leq x_{k,\max}$ ，令 $h = l+1$ ，可得 $x_h \leq x_{l,\max}$ 。所以， $x'_l = x_h \leq x_{l,\max}$ 并不超出ECN的最大承受风险，类型较低的ECN可能会选择面向类型较高的ECN的远期合同。当 r_l 类型的ECN选择合同 (x_h, R_h) 所得收益为 $\bar{u}_l(x_h) = Ax_h^2 + Bx_h + C + R_h$ ，而选择 (x_l, R_l) 的收益为 $\bar{u}_l(x_l) = Ax_l^2 + Bx_l + C + R_l$ 。显然， $\bar{u}_l(x_h) \geq \bar{u}_l(x_l)$ ， r_l 类型的ECN为了收益最大化会选择合同 (x_h, R_h) 。所以，假设 $x_{k+1} \leq x_{k,\max}$ 不合理。必要性得证。

综合(1)(2)可知， r_k 类型的ECN既不会选择高

类型合同 (x_h, R_h, t_{\max}) , $\forall h \in \mathcal{K}, h > k$, 也不会选择低类型合同 (x_l, R_l, t_{\max}) , $\forall l \in \mathcal{K}, l < k$, 所以必然会选择面向自身类型的合同 (x_k, R_k, t_{\max}) 。定理1得证。

参 考 文 献

- [1] CHEN Jie, ZHANG Lin, LIANG Yingchang, *et al.* Resource allocation for wireless-powered IoT networks with short packet communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(2): 1447–1461. doi: [10.1109/TWC.2019.2893335](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2893335).
- [2] ZHOU Zhenyu, GAO Caixia, XU Chen, *et al.* Social big-data-based content dissemination in internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(2): 768–777. doi: [10.1109/TII.2017.2733001](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2733001).
- [3] SU Chunxia, Ye Fang, LIU Tingting, *et al.* Computation offloading in hierarchical multi-access edge computing based on contract theory and Bayesian matching game[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(11): 13686–13701. doi: [10.1109/TVT.2020.3022766](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3022766).
- [4] YANG Chao, LOU Wei, LIU Yi, *et al.* Resource allocation for edge computing-based vehicle platoon on freeway: a contract-optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 15988–16000. doi: [10.1109/TVT.2020.3039851](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3039851).
- [5] ZHAO Junhui, KONG Ming, LI Qiuping, *et al.* Contract-based computing resource management via deep reinforcement learning in vehicular fog computing[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 3319–3329. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2963051](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963051).
- [6] HUANG Xumin, YU Rong, YE Dongdong, *et al.* Efficient workload allocation and user-centric utility maximization for task scheduling in collaborative vehicular edge computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(4): 3773–3787. doi: [10.1109/TVT.2021.3064426](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3064426).
- [7] DRESSLER F, HANDLE P, and SOMMER C. Towards a vehicular cloud-using parked vehicles as a temporary network and storage infrastructure[C]. Proceedings of the 2014 ACM International Workshop on Wireless and Mobile Technologies for Smart Cities, Philadelphia, USA, 2014: 11–18. doi: [10.1145/2633661.2633671](https://doi.org/10.1145/2633661.2633671).
- [8] KIM N, KIM D, LEE J, *et al.* Incentive-based coded distributed computing management for latency reduction in IoT services—a game theoretic approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 8259–8278. doi: [10.1109/JIOT.2020.3045277](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3045277).
- [9] LIU Yang, XU Changqiao, ZHAN Yufeng, *et al.* Incentive mechanism for computation offloading using edge computing: a stackelberg game approach[J]. *Computer Networks*, 2017, 129: 399–409. doi: [10.1016/j.comnet.2017.03.015](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.03.015).
- [10] ALGARVIO H. Risk-sharing contracts and risk management of bilateral contracting in electricity markets[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 144: 108579. doi: [10.1016/j.ijepes.2022.108579](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108579).
- [11] AN Xuming, FAN Rongfei, HU Han, *et al.* Joint task offloading and resource allocation for IoT edge computing with sequential task dependency[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(17): 16546–16561. doi: [10.1109/JIOT.2022.3150976](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3150976).
- [12] LI Yuwei, YANG Bo, WU Hao, *et al.* Joint offloading decision and resource allocation for vehicular fog-edge computing networks: A contract-stackelberg approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(17): 15969–15982. doi: [10.1109/JIOT.2022.3150955](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3150955).
- [13] EDERINGTON L H. The hedging performance of the new futures markets[J]. *The Journal of Finance*, 1979, 34(1): 157–170. doi: [10.2307/2327150](https://doi.org/10.2307/2327150).
- [14] ZHANG Biling, LIU Jiahua, WANG Min, *et al.* Long-term contracts with dynamic asymmetric information for traffic offloading in heterogeneous 5G and beyond networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(4): 3440–3452. doi: [10.1109/JIOT.2022.3225237](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3225237).
- [15] LIWANG Minghui, GAO Zhibin, and WANG Xianbin. Let's trade in the future! A futures-enabled fast resource trading mechanism in edge computing-assisted UAV networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(11): 3252–3270. doi: [10.1109/JSAC.2021.3088657](https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088657).
- [16] BOLTON P and DEWATRIPONT M. Contract Theory[M]. Cambridge: The MIT Press, 2004: 77–81.
- [17] JEMBER A G, XU Wenhe, PAN Chao, *et al.* Game and contract theory-based energy transaction management for internet of electric vehicle[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 203478–203487. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3036415](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3036415).
- [18] LI Zhenjiang, CHEN Cheng, and WANG Kai. Cloud computing for agent-based urban transportation systems[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2011, 26(1): 73–79. doi: [10.1109/MIS.2011.10](https://doi.org/10.1109/MIS.2011.10).
- 张碧玲：女，教授，博士生导师。研究方向为无线通信网络，物联网，能源互联网，合同理论及其应用。
- 焦正阳：男，硕士生，研究方向为能源互联网、合同理论、信息系统及其应用。
- 刘家华：男，硕士生，研究方向为能源互联网、合同理论、信息系统及其应用。
- 郭彩丽：女，教授，博士生导师。研究方向为无线移动通信技术等。