

ad hoc 云环境中分布式博弈卸载策略

曹宾¹, 梁裕丞¹, 罗雷², 唐述³

(1. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学国防研究院, 重庆 400065;
3. 重庆邮电大学计算机网络与通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 提出一种 ad hoc 移动云计算方案, 即移动设备通过分享邻近设备的闲置资源, 将任务卸载至邻近设备协助处理。主要关注是否进行卸载, 如何选取合适的卸载目标设备, 以及如何分配任务的问题。以上问题使用博弈方法进行定义, 并使用分布式算法逼近最优结果。仿真结果证明了该方法的正确性与有效性。

关键词: ad hoc 移动云计算; 业务卸载; 最优化; 博弈论

中图分类号: TP393.0

文献标识码: A

Distributed game theoretic approach for offloading in ad hoc cloud

CAO Bin¹, LIANG Yu-cheng¹, LUO Lei², TANG Shu³

(1. Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. National Defense Research Institute, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
3. Chongqing Key Laboratory of Computer Network and Communications Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: An ad hoc mobile cloud had been proposed to offload workload to neighboring mobile devices for resource sharing. The issues that whether to offload or not was addressed, how to select the suitable mobile device to offload, and how to assign workload. Game theoretic approach was used to formulate this problem, and then, a distributed scheme was designed to achieve the optimal solution. The experimental results validate the rightness and effectiveness of proposed scheme.

Key words: ad hoc mobile cloud computing, offloading, optimization, game theory

1 引言

现在, 智能设备已成为我们日常生活中的重要角色。但是智能设备资源仍然十分有限, 其处理能力不能满足人们迅速增长的需求。因此, 为了提高处理效率、降低功耗, 移动云计算^[1,2]开始被广泛采用。移动云计算是云计算、移动计算和无线网络的结合^[3], 通过该技术, 用户可以将复杂的任务卸载到远程云中心或本地小型云设备^[4]进行处理, 减少本地处理任务的开销, 缓解单用户资源紧张的同

时, 提高整个系统的资源利用效率^[5]。移动云环境下的任务卸载从时间上可分为 3 个步骤: 1) 用户端到云端的任务分发; 2) 云端的任务处理; 3) 云端到用户端的结果回传。显而易见, 移动云计算必然会涉及移动设备之间的传输, 这就需要相关的传输机制支持^[6]。考虑移动云计算复杂而广泛的应用场景以及越来越多的移动设备参与其中, D2D 通信^[7]是支持移动云计算的一项重要技术手段。D2D 通信是一种在系统的控制下, 允许终端之间通过复用小区资源直接进行通信的新型技术, 它能够增加蜂窝

收稿日期: 2017-01-11; 修回日期: 2017-07-06

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (No.IRT1299); 国家自然科学基金资助项目 (No.61501074, No.61601070); 重庆市教委科学技术研究基金资助项目 (No.KJ1500406, No.KJ1400918); 重庆市前沿与应用基础研究计划基金资助项目 (No.cstc2015jcyjA0776, No.cstc2014jcyjA1350, No.cstc2015jcyjB0360)

Foundation Items: Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No.IRT1299), The National Natural Science Foundation of China (No.61501074, No.61601070), The Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission of China (No.KJ1500406, No.KJ1400918), Advanced and Applied Basic Research Projects of Chongqing (No.cstc2015jcyjA0776, No.cstc2014jcyjA1350, No.cstc2015jcyjB0360)

通信系统频谱效率,降低终端发射功率,在一定程度上解决无线通信系统频谱资源匮乏的问题。与 D2D 通信不同,移动云计算更关注任务卸载的决策制定以及设计到的通信、存储、计算等一系列的资源分配管理问题。

然而在许多无线环境中,由于没有部署功能强大的本地云设备,存在用户资源受限,远程云中心因距离过远造成传输时延高、开销大等问题,因此在资源受限的情况下,通过任务分割、卸载,共享邻居用户的空闲资源协同处理,可以以 ad hoc 形式实现移动云计算,提高移动用户处理能力。因此,有一些学者提出了 ad hoc 云这一概念,作为无基础设施无线环境下移动云计算的一种扩展,使移动用户通过互相合作来分享资源、协同处理任务^[8~11]。与此同时,业界也针对类似应用场景,提出了移动边缘计算^[12],雾计算^[13]等相关概念,受到了广泛认可。

为达到以上目标,应该先解决以下 3 个问题。

1) 如何选择合适的移动用户; 2) 如何为业务卸载合理分配资源; 3) 分配多少任务,针对以上 3 个问题,本文设计了一个分布式算法,通过合理分配资源与任务来找到合适的助手(们)用于任务卸载。主要成果有: 1) 提出一个有效的分布式方法并获得了近似集中式最优的解决方案; 2) 设计一个基于博弈论的资源分配算法进行任务的传输和处理; 3) 依照资源分配策略来卸载任务。

2 相关工作

在移动云计算中,为了高效进行任务卸载并充分利用终端闲置资源,现有研究设计了各种各样的协议和机制。为探讨服务提供者之间的合作,Niyato 等^[14]介绍了一种可以获得接入控制最优结果的优化设计方法,开发了一种共享反馈和容量扩充优化的联合博弈模型。Tram 等^[15]以随机非合作博弈方法论述了供应者之间的竞争关系,提供了一个最优的价格策略,为它们之间的合作设计了一个算法来决定均衡的合作策略。

众所周知,在无线网络中移动性对性能起着非常重要的影响,尤其是对任务卸载和资源分配的决策。然而,这个问题还没有被上述工作很好地解决。因此,考虑到移动设备和移动云之间的间断连接性,Tram 等^[16]提出了一种基于马尔可夫决策过程的动态机会卸载算法来获得最优的业务卸载策略,以此决定立即卸载业务还是等待。在文献^[17]

中,为了使移动设备在 ad hoc 移动云计算中共享资源进行业务卸载,考虑到了链接时间的随机性,Tang 等提出了一个多阶段随机规划方法。同样,考虑到间歇性连接,Zhang 等^[18]制定一个马尔可夫决策过程,以最小的代价来确定任务卸载还是在本地处理。

虽然这些研究工作充分考虑到了移动性和连接的随机性。但是为了准确估计相应的影响,会导致信息采集量和计算复杂程度的增加,由此带来的开销十分显著。另一方面,在某些情况下,如 ad hoc 无线网络中,很难找到一个合适的中央节点进行数据汇聚和分析。因此,上述方法在 ad hoc 无线网络环境下并不可行。

既然资源有限,那么如何高效分配资源就显得十分必要,因此,很多研究工作都采用了博弈理论。Teng 等^[19]提出了一个考虑预算与最后期限情况下的资源定价和分配策略,但相关理论并不完备。Jin 等^[20]设计了一个可行的激励机制来保证整体的真实性,并提出了一种拍卖机制,旨在保证卖方真实性时可获得更高的效率。为了在多用户合作网络设计一个分布式最优功率分配方案,Liu 等^[21]制定了一个买卖竞拍的优化问题,并且设计了一个分布式机制来达到全局最优化的均衡状态。

针对 ad hoc 云环境下的安全性问题,Kulkarni 等^[22]提出了移动云计算环境中相关的安全与隐私需求,并提出了通过信任管理和私有数据隔离的新型移动云数据处理架构,移动云计算安全数据查询架构等针对相关安全与隐私需求的解决方案。Devu 等^[23]分析了 ad hoc 云环境下潜在的安全和隐私威胁,提出了一种通用的自动移动云(AMCloud)管理架构,用于在静态和移动模式下自动高效地进行 ad hoc 云的服务与资源管理,并开发了一种通用的安全架构。

博弈论作为一种数学工具,已被广泛用于观察不同对象之间的行为,以及不同策略之间的相互作用,从而使个体效用最大化。为实现移动设备之间的资源共享,本文提出了一种基于博弈的分布式方案。

3 系统模型

不失一般性,假设在 ad hoc 云环境中,有 N 个移动设备(用 MU_i 表示, $i \in [1, N]$), 其中,某些 MU 有待处理的计算密集型的任务,而仅依靠设备自身的能力来完成这些任务,很可能会耗尽自身资

源或有非常大的计算延迟,不能得到很好的用户体验。而其邻居设备有富余资源,通过无线网络(如 Wi-Fi)将自身的任务卸载到邻居设备,邻居设备利用空闲的计算资源完成任务,再将结果反馈给 MU ,完成任务的计算处理工作,并且在一次任务卸载中,节点相对静止。令 $S = \{1, 2, \dots, N\}$ 为移动设备集合,每个设备都有待处理任务的请求,并且传输功率和处理速率有限。移动设备可以将它们的任务卸载到其他设备,同时也可以为其他设备处理任务。然而,由于半双工传输的约束,移动设备无法在同一信道同一时间发送接收。不失一般性,假设每个移动设备可以在不受干扰和竞争的情况下通过正交信道进行传输,即所有的任务可以在不同信道并行发送和接收。

业务卸载的总持续时间(T)可分为 3 个部分: 1) 从租用者(发出卸载请求的移动设备)传输到资源提供方(接受卸载的移动设备)的时间(t_1); 2) 处理时间(t_2); 3) 从资源提供方传回结果的时间(t_3)。

因此,从设备 i 到设备 $j(R_{ij,t})$ 和从设备 j 到设备 $i(R_{ji,t})$ 的传输速率如式(1)和式(2)所示。

$$R_{ij,t} = W \ln \left(1 + \frac{P_{ij,t} G_{ij}}{N_{ij}} \right), i \neq j, \forall i, j \quad (1)$$

$$R_{ji,t} = W \ln \left(1 + \frac{P_{ji,t} G_{ji}}{N_{ji}} \right), i \neq j, \forall i, j \quad (2)$$

其中, W 为带宽, $P_{ij,t}$ 和 $P_{ji,t}$ 分别是 i 到 j 和 j 到 i 的传输功率, G_{ij} 和 G_{ji} 分别是 i 到 j 和从 j 到 i 的信道增益, N_{ij} 和 N_{ji} 分别是 i 到 j 和从 j 到 i 的噪声功率。 $G_{ij} = d_{ij}^{-k}$, d_{ij} 是 i 到 j 之间的距离, k 是路径损耗因子。

利用卸载任务量 M_{ij} 可计算出从 i 到 j 的总持续时间为

$$T_{ij} = \begin{cases} \frac{M_{ij}}{R_{ij,t}} + \frac{M_{ij}}{R_{ji,p}} + \frac{M_{ij}}{R_{ji,t}}, & i \neq j, \forall i, j \\ \frac{M_{ii}}{R_{ii,p}}, & i = j, \forall i, j \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R_{ji,p}$ 是在 j 对于 i 任务的处理速率。当 $i \neq j$ 时, i 将任务 M_{ij} 发送到 j 。如果 $i = j$, i 在本地节点以处理速率 $R_{ii,p}$ 来处理任务 M_{ii} 。

由于不同的任务可能被切片发送给多个移动设备处理,卸载任务应该以并行方式进行传输和处

理。因此, i 处理所有任务 M_i 的总体持续时间为

$$T_i = \arg \max_{\forall i} \{T_{ij}\} \quad (4)$$

此外, MU_i 的总体任务处理能力定义为

$$C_i = \frac{M_i}{T_i}, \forall i \quad (5)$$

最后, 本文将 C 定义为整个系统的任务处理能力。

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (6)$$

当整个系统的任务处理能力越高,即 C 越高说明其获得的任务处理能力越好,因此成为 ad hoc 移动云计算中最重要的目标。为此,如何将 C 最大化定义为如下的最优化问题(P1)。

$$\max \{C\} \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^N P_{ij,t} \leq \bar{P}_{i,t}, \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{ji,t} \leq \bar{P}_{j,t}, \forall j \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N R_{ij,p} \leq \bar{R}_{i,p}, \forall i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N R_{ji,p} \leq \bar{R}_{j,p}, \forall j \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N M_{ij} = \bar{M}_i, \forall i \quad (12)$$

约束条件式(8)~式(11)表示分配传输功率之和与分配处理速率之和都不能超过每个移动设备的阈值,约束条件式(12)表明,所有的任务应该都完全卸载或在本地处理。当一个移动设备决定在本地处理任务时, $i=j$ 且 $P_{ij,t}=0$ (因为没有进行传输)。

此外,式(7)可以写为

$$\max \{C\} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N C_i \right\} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \arg \min_{\forall j} \left\{ \frac{M_i}{T_{ij}} \right\} \right\} \quad (13)$$

假设每个移动设备的任务 M_i 值固定不变,当所得 T_{ij} 最小时,本文就可以得到式(7)中的目标,因此本文令 $T_{ij} = T_{ik} (j \neq k)$ 来解决式(13)。

此外,根据式(1)~式(3),可以看到, T_{ij} 分别是分配任务量、传输功率和处理速率三者的函数。因

此,任务分配和资源配置在卸载中至关重要。式(13)中的问题非常类似于注水问题。即传输功率和处理速率越高(即分配的资源越多),分配的任务就应该越多。因此,本文可以将问题(P1)分为资源配置问题(P1')和任务分配问题(P1'')2个部分。其中,P1'决定了卸载任务要进行多少传输功率($P_{ij,t}$ 和 $P_{ji,t}$)和处理速率($R_{ij,t}$ 和 $R_{ji,t}$),而P1''决定了将多少任务(M_{ij})卸载给目标移动设备。

最终,问题P1可分为资源配置P1'和任务分配P1''两部分,具体描述如下所示。

P1': 考虑到传输速率和处理速率,资源配置获得的最大有效卸载速率 R 为

$$\max \{R\} = \max \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_{ij} \right\} \quad (14)$$

其中,

$$R_{ij} = \begin{cases} \frac{R_{ij,t} R_{ji,p} R_{ji,t}}{R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t}}, & i \neq j, \forall i, j \\ R_{ii,p}, & i = j, \forall i, j \end{cases} \quad (15)$$

s.t. 式(8)~式(11)

P1'': 通过任务分配来获得处理卸载任务的最小有效卸载持续时间为

$$\min \max \{T_{ij}\} = \min \max \left\{ \frac{M_{ij}}{R_{ij}} \right\}, \forall i, j \quad (16)$$

s.t. 式(12)

4 基于买卖博弈的卸载策略

在本节中,首先介绍一个买卖博弈方法来解决问题P1'。之后设计一个分布式算法实现资源的最优均衡配置策略。最终根据资源的配置,提出任务的分配方案。

根据文献[24],如果每个 R_{ij} 都是传输功率和处理速率的凸函数,那么式(14)中的目标函数也是凸函数。

定理 1 R_{ij} 是处理速率的凸函数。

首先,考虑到 $i \neq j, \forall i, \forall j$,并对 R_{ij} 求 $R_{ji,p}$ 的一阶偏导,可以得到

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial R_{ji,p}} = \frac{R_{ij,t} R_{ji,t}}{R_{ij,t} + R_{ji,p} + R_{ji,t}} - \frac{R_{ij,t} R_{ji,p} R_{ji,t}}{(R_{ij,t} + R_{ji,p} + R_{ji,t})^2} \quad (17)$$

然后,对 R_{ij} 求 $R_{ji,p}$ 的二阶偏导可以得到

$$\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial R_{ji,p}^2} = -2 \frac{R_{ij,t} R_{ji,t} (R_{ij,t} + R_{ji,t})}{(R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t})^2} \cdot \frac{R_{ij,t} R_{ji,t}}{R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t}} \quad (18)$$

因为 $R_{ij,t}, R_{ji,p}, R_{ji,t} > 0$,本文可以得到 $\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial R_{ji,p}^2} < 0$ 。

另外,当 $i = j, \forall i, \forall j$ 时,很明显 R_{ij} 是 $R_{ii,p}$ 的凸函数。因此定理1成立。

定理 2 R_{ij} 是传输功率的凸函数。

类似地,可以得到

$$\frac{\partial R_{ij}}{\partial R_{ij,t}} = \frac{R_{ji,p} R_{ji,t}}{R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t}} - \frac{R_{ij,t} R_{ji,p} R_{ji,t} (R_{ij,t} + R_{ji,t})}{(R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t})^2} \quad (19)$$

继续求二阶偏导

$$\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial R_{ij,t}^2} = -2 \frac{R_{ji,p} R_{ji,t} (R_{ij,t} + R_{ji,t})}{(R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t})^2} \cdot \frac{R_{ji,p} R_{ji,t}}{R_{ij,t} R_{ji,p} + R_{ji,p} R_{ji,t} + R_{ij,t} R_{ji,t}} \quad (20)$$

因为 $R_{ij,t}, R_{ji,p}, R_{ji,t} > 0$,可以得到 $\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial R_{ij,t}^2} < 0$ 。同

理还可以得到 $\frac{\partial^2 R_{ij}}{\partial R_{ji,t}^2} < 0$ 。

另外,基于香农公式可以得出 R_{ij} 和 R_{ji} 分别为 $R_{ij,t}$ 和 $R_{ji,t}$ 的凸函数。根据文献[25]很容易得到 R_{ij} 又是传输功率的凸函数。因此,定理2成立。

因为约束条件式(8)~式(11)是凸函数,所以优化问题P1'可利用拉格朗日乘法解决,其中拉格朗日因子 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 > 0$ 分别对应传输功率和处理速率在式(8)~式(11)中的约束条件。使用KKT条件来解决凸函数问题,可以得到式(21)~式(34)。

$$\begin{aligned} & L(P_{ij,t}, P_{ji,t}, R_{ji,p}, R_{ii,p}, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) \\ & = \sum_{\forall i} \sum_{\forall j} R_{ij} - \sum_{\forall i} \lambda_1 (\sum_{\forall j} P_{ij,t} - \bar{P}_{i,t}) - \sum_{\forall j} \lambda_2 (\sum_{\forall i} P_{ji,t} - \bar{P}_{j,t}) - \\ & \sum_{\forall j} \lambda_3 (\sum_{\forall j} R_{ji,p} - \bar{R}_{j,p}) - \sum_{\forall i} \lambda_4 (\sum_{\forall j} R_{ii,p} - \bar{R}_{i,p}) \quad (21) \end{aligned}$$

$$R'_{ij}(P_{ij,t}^*) = \lambda_1^* \quad (i \neq j, \forall i, j) \quad (22)$$

$$R'_{ij}(P_{ji,t}^*) = \lambda_2^* \quad (i \neq j, \forall i, j) \quad (23)$$

$$R'_{ij}(R_{ji,p}^*) = \lambda_3^* \quad (i \neq j, \forall i, j) \quad (24)$$

$$R'_{ij}(R_{ii,p}^*) = \lambda_4^* \quad (i \neq j, \forall i, j) \quad (25)$$

$$\lambda_1^* \left(\sum_{j=1}^N P_{ij,t}^* - \bar{P}_{i,t} \right) = 0, i \neq j, \forall i \quad (26)$$

$$\lambda_2^* \left(\sum_{i=1}^N P_{ji,t}^* - \bar{P}_{j,t} \right) = 0, i \neq j, \forall j \quad (27)$$

$$\lambda_3^* \left(\sum_{i=1}^N R_{ji,p}^* - \bar{R}_{j,p} \right) = 0, i \neq j, \forall j \quad (28)$$

$$\lambda_4^* \left(\sum_{j=1}^N R_{ii,p}^* - \bar{R}_{i,p} \right) = 0, i \neq j, \forall i \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^N P_{ij,t}^* \leq \bar{P}_{i,t}, i \neq j, \forall i \quad (30)$$

$$\sum_{j=1}^N P_{ji,t}^* \leq \bar{P}_{j,t}, i \neq j, \forall j \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^N R_{ji,p}^* \leq \bar{R}_{j,p}, i \neq j, \forall j \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^N R_{ii,p}^* \leq \bar{R}_{i,p}, i \neq j, \forall i \quad (33)$$

$$P_{ij,t}^*, P_{ji,t}^*, R_{ji,p}^*, R_{ii,p}^*, \lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_3^*, \lambda_4^* > 0 \quad (34)$$

通过解决全局优化问题 P1', 可以得到传输功率和处理速率的最优资源分配方案。然而, 收集所有必要信息非常困难, 并且在 ad hoc 移动云环境下, 构建全局视角进行计算的集中节点也是不可行的。接下来, 使用买卖博弈, 将全局优化问题 P1' 转化为分布式优化问题 P2, 并设计一个分布式算法实现 P1' 的最优解决方案。

买方 i 的效用为

$$U_{b_i} = \sum_{\forall j} R_{ij} - \sum_{\forall j} \alpha_{ij} P_{ij,t} - \sum_{\forall i} \alpha_{ji} P_{ji,t} - \sum_{\forall i} \beta_{ji} R_{ji,p} - \beta_{ii} R_{ii,p} \quad (35)$$

其中, α_{ij} 、 α_{ji} 、 β_{ij} 、 β_{ii} 分别表示从 i 到 j 、从 j 到 i 传输功率的售价和从 j 到 i 及在本地节点 i 处理速率的单位售价。

因此, 为获得最大的 U_{b_i} , 分别对 U_{b_i} 求 $P_{ij,t}$ 、 $P_{ji,t}$ 、 $R_{ji,p}$ 、 $R_{ii,p}$ 的一阶偏导。

$$\frac{\partial U_{b_i}}{\partial P_{ij,t}} = R'_{ij}(P_{ij,t}^*) - \alpha_{ij}^* = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial U_{b_i}}{\partial P_{ji,t}} = R'_{ij}(P_{ji,t}^*) - \alpha_{ji}^* = 0 \quad (37)$$

$$\frac{\partial U_{b_i}}{\partial R_{ji,p}} = R'_{ij}(R_{ji,p}^*) - \beta_{ji}^* = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial U_{b_i}}{\partial R_{ii,p}} = R'_{ij}(R_{ii,p}^*) - \beta_{ii}^* = 0 \quad (39)$$

这里, $P_{ij,t}^*$, $P_{ji,t}^*$, $R_{ji,p}^*$, $R_{ii,p}^*$ 是最优化的资源需求。

观察 P1' 的 KKT 条件可知, 若

$$R'_{ij}(P_{ij,t}^*) = \alpha_{ij}^* = \lambda_1^* = \frac{1}{\left(1 + R_{ij,t}^* \left(\frac{1}{R_{ij,p}^*} + \frac{1}{R_{ji,t}^*}\right)\right)^2} \cdot \frac{WG_{ij}}{N \ln 2} \frac{1}{1 + \frac{P_{ij,t}^* G_{ij}}{N}} \quad (40)$$

$$R'_{ij}(P_{ji,t}^*) = \alpha_{ji}^* = \lambda_2^* = \frac{1}{\left(1 + R_{ji,t}^* \left(\frac{1}{R_{ij,p}^*} + \frac{1}{R_{ji,t}^*}\right)\right)^2} \cdot \frac{WG_{ji}}{N \ln 2} \frac{1}{1 + \frac{P_{ji,t}^* G_{ji}}{N}} \quad (41)$$

$$R'_{ij}(R_{ji,p}^*) = \beta_{ji}^* = \lambda_3^* = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{ji,p}^*}{R_{ij,t}^*} + \frac{R_{ji,p}^*}{R_{ji,t}^*}\right)^2} \quad (42)$$

$$R'_{ij}(R_{ii,p}^*) = \beta_{ii}^* = \lambda_4^* = 1 \quad (43)$$

则式(22)~式(25)等价于式(36)~式(39)。即最优资源需求在买方 ($P_{ij,t}^*$ 、 $P_{ji,t}^*$ 、 $R_{ji,p}^*$ 、 $R_{ii,p}^*$) 与其在 P1' 中是等价的。

根据式(15), 可知当 $i=j$ 时 $R_{ij}=R_{ii,p}$, 因此, U_{b_i} 是 $R_{ii,p}$ 的线性函数。若 $\beta_{ii}^* \leq 1$, $R_{ii,p}^*$ 就是可提供的最大有效处理速率。否则 $R_{ii,p}^* = 0$ 。总而言之, 可以通过式(44)得到最优资源需求。

当 i 向 j 寻求帮助时, i 是买方, j 是卖方。另外, i 对于自己本身也是卖方, 这是由于 i 需要先向自己购买传输功率才能将自己的任务发送给 j 。同时, i 可能在本地节点处理一些任务, 而这也需要使用 i 自己的处理资源。因此, 每一个移动设备既是一个寻求卸载的买方, 同时又是一个提供服务的卖方。

卖方分析如下

$$\begin{cases} P_{ij,t}^* = f(\alpha_{ij}^*, \alpha_{ji}, \beta_{ji}, W, G_{ij}, N, R_{ji,t}, R_{ji,p}) \\ P_{ji,t}^* = f(\alpha_{ji}^*, \alpha_{ij}, \beta_{ji}, W, G_{ij}, N, R_{ji,t}, R_{ji,p}) \\ R_{ji,p}^* = \frac{1}{\frac{1}{R_{ji,t}} + \frac{1}{R_{ij,t}}} - 1 \\ R_{ii,p}^* = \begin{cases} \bar{R}_{i,p} - \sum_{\forall j} R_{ij,p}^*, \beta_{ii}^* \leq 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (44)$$

卖方 j 的优化方案如下

$$\max \{U_{s_j} = \sum_{\forall i} \alpha_{ji} P_{ji,t} + \sum_{\forall i} \beta_{ji} R_{ji,p}\} \quad (45)$$

约束条件为

$$\sum_{\forall i} P_{ji,t} \leq \bar{P}_{j,t} \quad (46)$$

$$\sum_{\forall i} R_{ji,p} \leq \bar{R}_{j,p} \quad (47)$$

利用拉格朗日乘数法, 可以得到

$$\begin{aligned} L_{s_j}(P_{ji,t}, R_{ji,p}, \mu_1, \mu_2) &= \sum_{\forall i} \alpha_{ji} P_{ji,t} + \sum_{\forall i} \beta_{ji} R_{ji,p} - \\ &\mu_1 (\sum_{\forall i} P_{ji,t} - \bar{P}_{j,t}) - \mu_2 (\sum_{\forall i} R_{ji,p} - \bar{R}_{j,p}) \end{aligned} \quad (48)$$

根据 KKT 条件在卖方 j 优化问题中的使用, 可以得到

$$\alpha_{ji} = \mu_1 \quad (49)$$

$$\beta_{ji} = \mu_2 \quad (50)$$

$$\mu_1^* (\sum_{\forall i} P_{ji,t}^* - \bar{P}_{j,t}) = 0 \quad (51)$$

$$\mu_2^* (\sum_{\forall i} R_{ji,p}^* - \bar{R}_{j,p}) = 0 \quad (52)$$

$$\sum_{\forall i} P_{ji,t}^* \leq \bar{P}_{j,t} \quad (53)$$

$$\sum_{\forall i} R_{ji,p}^* \leq \bar{R}_{j,p} \quad (54)$$

$$P_{ji,t}^*, R_{ji,p}^*, \mu_1^*, \mu_2^* > 0 \quad (55)$$

以同样的方式, 可以改变卖方 j 到 i 的指标, 来获得 α_{ij} 、 $P_{ji,t}^*$ 、 β_{ij} 、 $R_{ij,p}^*$ 如下所示。

$$\alpha_{ij} = \mu_3 \quad (56)$$

$$\beta_{ij} = \mu_4 \quad (57)$$

$$\mu_3^* (\sum_{\forall j} P_{ij,t}^* - \bar{P}_{i,t}) = 0 \quad (58)$$

$$\mu_4^* (\sum_{\forall j} R_{ij,t}^* - \bar{R}_{i,t}) = 0 \quad (59)$$

$$\sum_{\forall j} P_{ij,t}^* \leq \bar{P}_{i,t} \quad (60)$$

$$\sum_{\forall j} R_{ij,p}^* \leq \bar{R}_{i,p} \quad (61)$$

$$P_{ij,t}^*, R_{ij,p}^*, \mu_3^*, \mu_4^* > 0 \quad (62)$$

根据式(22)~式(25)可知, 若 $\alpha_{ij} = \lambda_1$, $\alpha_{ji} = \lambda_2$, $\beta_{ji} = \lambda_3$, $\beta_{ii} = \lambda_4$ (当式(57)中的 $i=j$ 时), 恰好就是 P1' 中的卖方最优问题。在这种情况下, 买卖博弈就相当于资源配置的最优化问题(P1')。因此, 可以计算出卖方的最优售价和买方的资源需求, 进而获得 P1' 的全局最优解决方案如下。

$$\begin{cases} \alpha_{ij}^* = g\{P_{ij,t}^*, W, G_{ij}, N_{ij}, \beta_{ij}, P_{ji,t}, R_{ji,p}\} \\ \alpha_{ji}^* = g\{P_{ji,t}^*, W, G_{ij}, N_{ij}, \beta_{ij}, P_{ij,t}, R_{ij,p}\} \\ \beta_{ji}^* = \frac{1}{4 \left(R_{ji,p}^* \left(\frac{1}{R_{ij,t}} + \frac{1}{R_{ji,t}} \right) \right)^2} \\ \beta_{ii}^* = 1 \end{cases} \quad (63)$$

为此, 如果卖方提出其最优卖方价格, 出售其资源, 相应地, 买家也会发出最优资源需求的请求。因此, 全局资源配置的最优化(P1')可以根据在买卖博弈(P2)的结果得到近似结果。接下来, 本文设计了一个分布式算法用以实现买卖博弈算法, 通过更新销售价格和资源需求, 实现 P1' 中资源分配的最优化解决方案。此外, 价格更新的收敛方式可以参照文献[25]。算法 1 (资源配置算法) 决定了传输和处理的资源配置。第 1) 行是所有节点的循环, 第 2) 行和第 3) 行是初始化, 第 4)、15)、26) 行是资源配置的标准。如果判定依据大于零, 售价就进行更新, 直到其收敛, 得到传输和处理资源的分配方案。反之, 如果判定依据一开始小于零, 这意味着此移动设备不适合被用于任务卸载。第 5)~14) 行、第 16)~25) 行和第 27)~36) 行对应售价的更新以及传输和处理的资源配置。

算法 1 资源分配算法

输入 W (带宽), d_{ij} (设备 i 与 j 之间的距离);

G_{ij}, G_{ji} (分别为从 i 到 j 与从 j 到 i 的信道增益);

N_{ij}, N_{ji} (分别为从 i 到 j 与从 j 到 i 的噪声功率);

\bar{P}_i, \bar{P}_j (设备 i 与 j 传输功率的阈值)

输出 α_{ij}, α_{ji} (分别为从 i 到 j 和从 j 到 i 传输功率的售价);

β_{ji}, β_{ii} (分别为从 j 到 i 和在本地节点处理速率的

售价);

$P_{ij,t}, P_{ji,t}$ (分别为 i 从 j 到和从 j 到 i 的传输功率);

$R_{ij,p}, R_{ii,p}$ (从 i 到 j 和在本地节点的处理速率)

1) for $i=1:N, j=1:N$ do

2) 初始化 $t_1 = t_2 = t_3 = 0, \alpha_{ij} = \alpha_{ji} = \beta_{ji} = 0^+, \beta_{ii} = 1$

3) 依据式(44)计算 $P_{ij,t}^*, P_{ji,t}^*, R_{ij,p}^*, R_{ii,p}^*$

4) if $\frac{\partial U_{s_i}}{\partial \alpha_{ij}} > 0$ // U_{s_i} 为买家 s_i 的效用

5) 更新传输功率售价

$$\alpha_{ij} = \frac{-P_{ij,t}^*}{\frac{\partial P_{ij}^*}{\partial \alpha_{ij}}} + e_j \left(\sum_{\forall j} P_{ij,t}^* - \bar{P}_{i,t} \right)$$

6) $t_1 = t_1 + 1$

7) 跳转到15)

8) else

9) if $t_1 > 1$

10) $\alpha_{ij}^* = \alpha_{sji}$

11) else

12) $\alpha_{ij}^* = 0, P_{ij,t}^* = 0$

13) end if

14) end if

15) if $\frac{\partial U_{s_i}}{\partial \alpha_{ji}} > 0$

16) 更新传输功率售价

$$\alpha_{ji} = \frac{-P_{ji,t}^*}{\frac{\partial P_{ji}^*}{\partial \alpha_{ji}}} + e_j \left(\sum_{\forall i} P_{ji,t}^* - \bar{P}_{j,t} \right)$$

17) $t_2 = t_2 + 1$

18) 跳转到25)

19) else

20) if $t_2 > 1$

21) $\alpha_{ji}^* = \alpha_{sji}$

22) else if

23) $\alpha_{ji}^* = 0, P_{ji,t}^* = 0$

24) end if

25) end if

26) if $\frac{\partial U_{s_i}}{\partial \beta_{ji}} > 0$ then

27) 更新传输功率售价

28) $\beta_{ji} = \frac{-R_{ji,p}^*}{\frac{\partial R_{ji}^*}{\partial \beta_{ji}}} + e_j \left(\sum_{\forall i} P_{ji,p}^* - \bar{P}_{j,p} \right)$, then

29) $t_3 = t_3 + 1$

30) 跳转到5)

31) else

32) if $t_3 > 1$

33) $\beta_{ji}^* = \beta_{ji}$

34) else

35) $\beta_{ji}^* = 0, R_{ji,p}^* = 0$

36) end if

37) end if

38) end for

基于资源配置的结果, 本文在算法 2 (任务分配算法) 中设计一个任务的分配算法, 以此来决定针对问题 P1"应为本地与助手节点分别分配多少任务。

算法 2 任务分配算法

输入 M_i (设备 i 需要卸载的任务), 算法 1 中的资源配置结果

输出 M_{ij} (设备 i 卸载到 j 的任务)

1) for $i=1:N; j=1:N$ do

2) 计算 R_i // 设备 i 处的总速率

3) 计算 R_{ij} // 从设备 i 到 j 的总速率

4) $M_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_i} M_i$;

5) end for

5 仿真结果与性能分析

在本节中, 本文将通过展示价格迭代和资源需求来验证所提出的博弈方法的有效性。本文使用 Matlab 来仿真对应 3 个移动设备的场景, 分别为买家 1 和卖家 2、卖家 3。1 和 2 之间的传输距离是

20 m, 1 和 3 之间的传输距离是 60 m。分别令 $W=1$ Hz, $k=3$, $\bar{P}_{1,t}=23$ dBm, 加性高斯白噪声功率为 10^{-8} W, $\bar{P}_{2,t} = \bar{P}_{3,t} = 26$ dBm, $\bar{R}_{1,p}=20$ Mbit/s, $\bar{R}_{2,p} = \bar{R}_{3,p} = 80$ Mbit/s, $M_1=10$ MB, 更新步长 $e_j = 10^{-4}$ 。

算法 1 的博弈结果如图 1 所示。从买家 1 到卖家 2(买家 1 到卖家 3)的传输功率的售价与迭代数的关系和所需传输功率与迭代次数的关系, 分别如图 1(a)和图 1(b)所示。从图 1 可以看到, $P_{12,t}(P_{13,t})$ 随着迭代次数的增加而减少, 原因是售价较高时, 买方会降低需求以便降低开销提高自身效用。图 1(c)和图 1(d)分别显示了传输功率从 2 和 3 到 1 的销售价格 α_{21} 和 α_{31} , 以及对应的传输功率需求 $P_{21,t}$ 和 $P_{31,t}$, 图 1(e)和图 1(f)分别给出了 β_{21} 、 β_{31} 、 $R_{21,p}$ 、 $P_{31,p}$, 图 1(g)和图 1(h)所示分别为 β_{11} 和 $R_{11,p}$ 。图 1(g)指出决定是否卸载的阈值 $\beta_{11}=1$ 。这是因为当且仅当 $\beta_{11}<1$ 时, 基于式(35)中买方效用的卸载才是有效的。另一方面, 较大的 β_{11} 可以促使移动设备寻求其他卸载节点。此外, 可以看到买家 1 趋向于从 2 那里获得更多的资源, 而不是 3 那里, 原因在于 2 距离 1 更近, 路径损耗比从 3 到 1 小。

图 2 为采取分布式博弈策略 (game scheme, 前面描述分布式优化问题 P2 与任务分配问题 P1")、集中式策略 (centralized optimal solution, 前面描述的问题 P1)、贪婪策略 (greedy scheme, 将所有任务全部迁移) 和本地处理策略 (non-offloading scheme, 不进行任务迁移) 下的时延、能耗、系统容量以及算法时间复杂度对比。从图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)中可以看出, 由于集中式策略在近乎“完美”的集中式环境下进行决策, 该决策为最优决策, 综合发送功率与终端处理能力的影响, 因此, 卸载时延、系统能耗和系统容量都为最优。然而, 集中式策略需要获取所有节点和任务信息才能做出最优决策, 因此, 复杂度非常高 (如图 2(d)所示), 可行性受到极大限制, 特别是在无中心节点、资源受限的 ad hoc 云环境下。因此, 通过图 2(a)、图 2(b)和图 2(c)可以看出, 本文提出的分布式博弈策略, 尽管性能为次优, 但能在很大程度上 (最大 85%) 逼近集中式策略。与此同时, 如图 2(d)所示, 分布式博弈策略算法复杂度相比集中式策略得到了极大降低 (为集中式的 47%)。综合图 2 可以看

出, 贪婪策略由于过度追求分配更多资源用于任务卸载, 将全部任务进行迁移, 减少本地节点的任务量的同时, 没有合理利用节点自身的处理资源, 导致各项性能较低。而本地处理策略与贪婪策略恰好相反, 不进行任何的任务迁移, 将所有任务都在本地进行处理。然而, 由于本地节点本身资源有限, 因此本地处理策略性能最低。与此同时, 本地处理策略与贪婪策略算法简单, 因此复杂度较低。

通过仿真数据并结合上述分析可以看到, 分布式博弈策略充分利用各节点的任务处理能力, 在逼近最优性能的同时, 有效降低了算法复杂度, 证明该算法的有效性和实用性。

6 结束语

本文关注在 ad hoc 移动云环境下的任务卸载方案, 以及如何有效地分配传输功率资源和处理能力资源。将助手的选择、资源的配置和任务的分配作为首要解决的目标, 定义了一个全局最优化问题。同时, 为了获得快速收敛的资源优化和任务分配方案, 采取博弈论设计了一个分布式算法。利用该算法, 当收益和成本合适时, 每个移动设备都可以选择合适的助手进行卸载, 从而获取收益。仿真结果也验证了所提出的博弈论模型和算法设计的正确性与有效性。安全问题一直是网络研究的一项重点热点, 本文讨论 ad hoc 云环境下资源的联合分配问题, 并没有考虑恶意节点的欺骗和攻击等行为, 有可能导致资源分配受恶意节点的影响, 从而大大影响公平性和卸载几率, 甚至使参与节点的信息暴露等。因此, 相关的安全与隐私威胁问题将作为我们下一步研究工作重点。

参考文献:

- [1] DINH H T, LEE C, NIYATO D, et al. A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing (WCM)*, 2013, 13(18): 1587-1611.
- [2] NELSON L S D F, RAOUF B. *Mobile cloud computing*[M]. Hoboken, NJ, USA, Wiley-IEEE Press, 2015.
- [3] KHAN A U R, OTHMAN M, MADANI S A, et al. A survey of mobile cloud computing application models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 16(1): 393-413.
- [4] LIU Y, LEE M J, ZHENG Y. Adaptive multi-resource allocation for cloudlet-based mobile cloud computing system[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(10): 2398-2410.

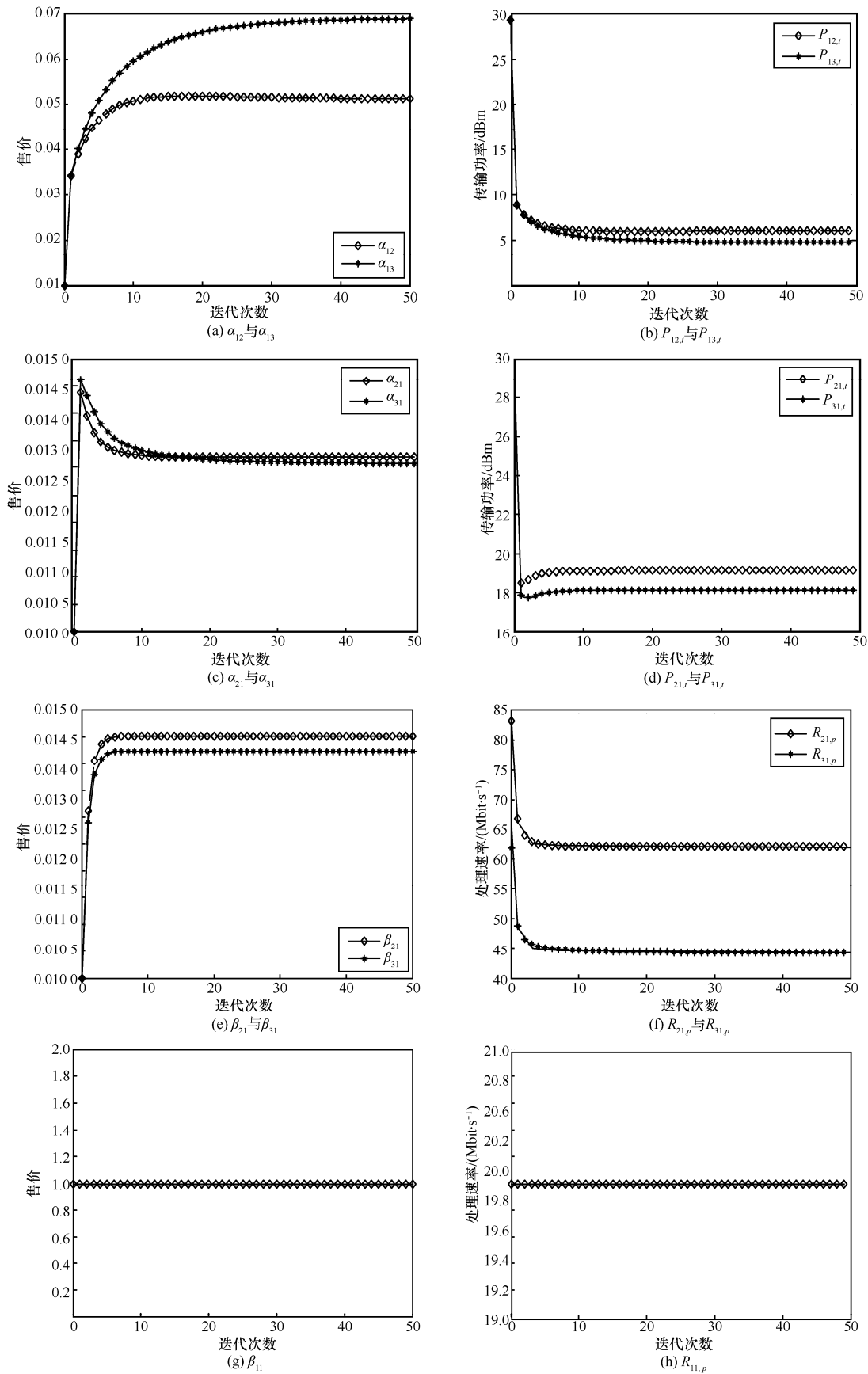


图 1 售价与资源需求汇总

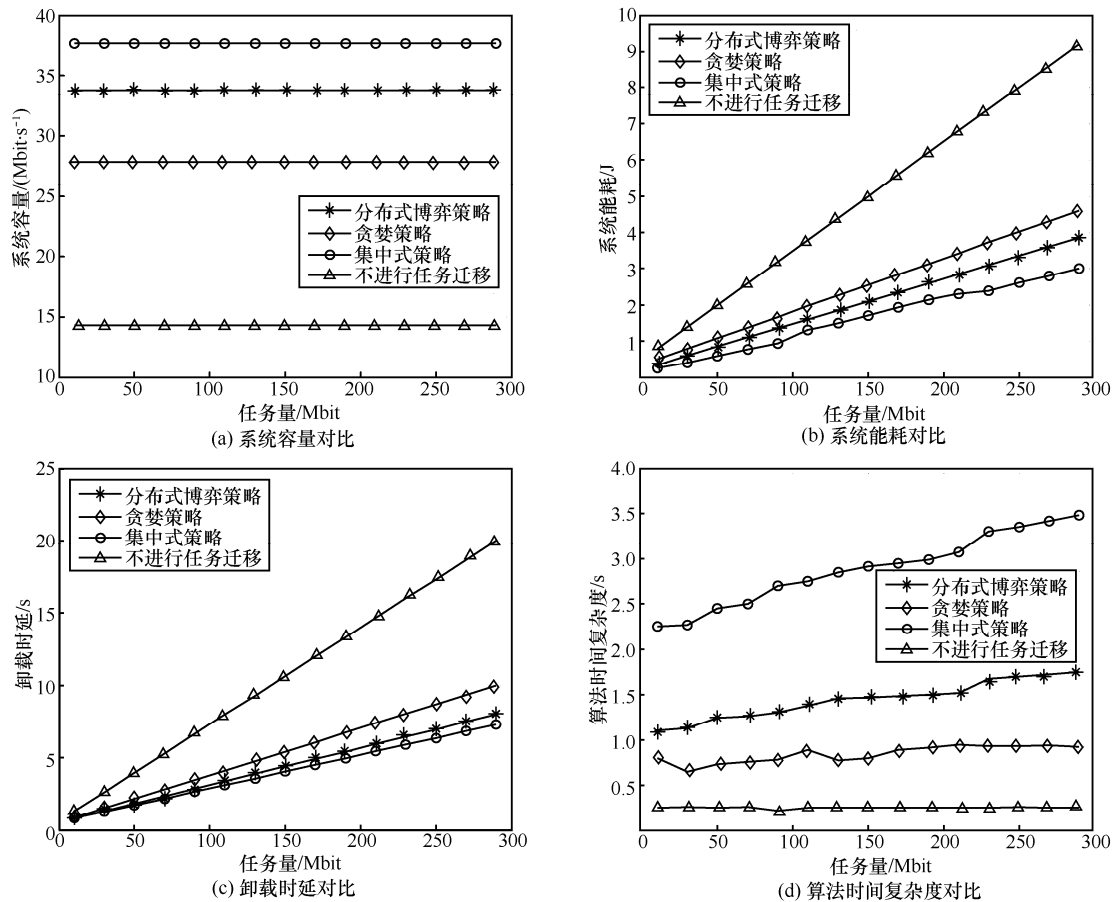


图 2 系统性能对比

[5] DUAN Q. Cloud service performance evaluation: status, challenges, and opportunities- a survey from the system modeling perspective[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 101-111.

[6] ANDREA B, MARCO C, ANDERA Z, et al. The challenges of M2M massive access in wireless cellular networks[J]. Digital Communications and Networks, 2015, 1(1): 1-19.

[7] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.

[8] LUO C, YANG L T, LI P, et al. A holistic energy optimization framework for cloud-assisted mobile computing[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(3): 118-123.

[9] CHEN X, JIAO L, LI W, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2795-2808.

[10] RAFIULLAH K, SARMAH U K. Design and implementation of ad hoc collaborative proxying scheme for reducing network energy waste[J]. Digital Communications and Networks, 2017, 3(2): 118-128.

[11] 曹侯, 郎文强, 陈卓, 等. 无线网络虚拟化中资源共享的功率分配算法[J]. 通信学报, 2016, 37(2): 63-71.

CAO B, LANG W, CHEN Z, et al. Power allocation in wireless network virtualization based on resource sharing[J]. Journal of Communications, 2016, 37(2): 63-71.

[12] LIU H, FAHIMA E, HANEN A, et al. Mobile edge cloud system: architectures, challenges, and approaches[J]. IEEE Systems Journal, 2017, PP(99): 1-14.

[13] SINGH S, CHIU Y, TSAI Y, et al. mobile edge fog computing in 5G era: architecture and implementation[C]//2016 International Computer Symposium (ICS). 2016: 731-735.

[14] NIYATO D, WANG P, HOSSAIN E, et al. Game theoretic modeling of cooperation among service providers in mobile cloud computing environment[C]//Wireless Communication and Networking Conference (WCNC) 2012. 2012: 3128-3133.

[15] TRAM T, THAM C. A novel model for competition and cooperation among cloud providers[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2014, 2(3): 251-265.

[16] TRAM T, THAM C, NIYATO D. To offload or to wait: an opportunistic offloading algorithm for parallel tasks in a mobile cloud[C]//IEEE CloudCom 2014. 2014: 182-189.

[17] TRAM T, THAM C, NIYATO D. A stochastic workload distribution approach for an ad hoc mobile cloud[C]//IEEE CloudCom 2014. 2014: 174-181.

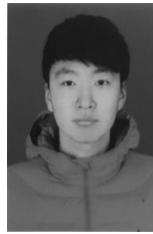
[18] ZHANG Y, NIYATO D, WANG P. Offloading in mobile cloudlet systems with intermittent connectivity[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(12): 2516-2529.

[19] TENG F, MAGOULES F. Resource pricing and equilibrium allocation policy in cloud computing[C]//IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology (CIT). 2010: 195-202.

[20] JIN A, SONG W, WANG P, et al. Auction mechanisms toward efficient resource sharing for cloudlets in mobile cloud computing[J].

IEEE' Transactions on Services, 2015, 9(6): 895 - 909.

- [21] LIU Y, TAO M, HUANG J. An auction approach to distributed power allocation for multiuser cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(1): 237-247.
- [22] KULKARNI P, KHANAI R, BINDAGI G. Security frameworks for mobile cloud computing: a survey[C]//International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). 2016: 2507-2511.
- [23] DEVU M S, SHEN W, CHENG Y, et al. AMCloud: toward a secure autonomic mobile ad-hoc cloud computing system[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 74-81.
- [24] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge University Press. 2004.
- [25] WANG B, HAN Z, LIU K J R. Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using buyer/seller game[C]//IEEE International Conference on Computer Communications. 2007: 544-552.

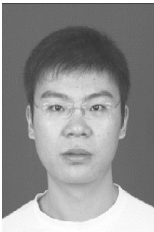


梁裕丞 (1993-), 男, 河南洛阳人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动通信理论与技术。

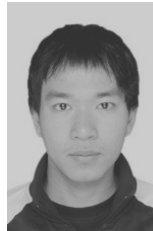


罗雷 (1986-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为多媒体网络、嵌入式计算。

作者简介:



曹宾 (1983-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络虚拟化、软件定义网络、资源管理和网络协议设计及性能分析。



唐述 (1981-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为信息获取与处理、图像处理。