

移动边缘计算卸载的节能资源分配

摘要

移动边缘计算卸载 (MECO) 将移动设备的计算任务卸载到位于蜂窝网络边缘的云端。因此, MECO 被视为延长移动设备电池寿命和增强计算能力的一种有前景的技术。本文研究基于时分多址 (TDMA) 和正交频分多址 (OFDMA) 的多用户 MECO 系统的资源分配问题。首先, 对于具有无限或有限云计算能力的 TDMA MECO 系统, 将最优资源分配问题建模为一个凸优化问题, 以在计算延迟约束下最小化加权总移动能耗。通过推导出的卸载优先级函数, 证明了最优策略具有基于阈值的结构, 根据用户的信道增益和本地计算能耗确定优先级。因此, 优先级高于和低于给定阈值的用户分别执行完全卸载和最小卸载。此外, 对于具有有限容量的云端, 提出了一种次优的资源分配算法, 以降低计算阈值的复杂度。接下来, 我们考虑 OFDMA MECO 系统, 将最优资源分配问题建模为一个混合整数问题。为了解决这个具有挑战性的问题并描述其策略结构, 提出了一种低复杂度的次优算法, 通过将 OFDMA 问题转化为其 TDMA 对应问题来求解。通过定义一个平均卸载优先级函数, 得到了相应的资源分配, 并在仿真中证明了其接近最优的性能。

关键词: 边缘云计算; 资源分配; 边缘云计算卸载; 节能计算;

1. 引言

物联网(Internet of Things, IoT)的实现将通过蜂窝网络将数百亿资源有限的移动设备(如移动设备、传感器和可穿戴计算设备)连接到互联网。移动设备有限的电池寿命和有限的计算能力给物联网设计带来了重大挑战。一个有希望的解决方案是利用移动边缘计算, 将密集的移动计算卸载到蜂窝网络边缘附近的云上, 叫做边缘云, 具有短延迟的边缘云^[1], 称为移动边缘计算卸载(MECO)。

2. 相关工作

节能的 MECO 需要 MCO 和无线通信技术的联合设计。近年来, 在单用户和多用户 MECO

系统中对该主题的研究取得了进展。对于单用户 MECO 系统，通过比较优化的本地计算(可变 CPU 周期)和卸载(可变传输速率)的能耗，得出了^[2]中最优的卸载决策策略。该框架在^[3]和^[4]中得到进一步发展，分别实现了由无线能量传输和能量收集驱动的自适应卸载。此外，在^[5]中，动态卸载与自适应 LTE/WiFi 选路相结合，以实现更高的能效。对于多用户 MECO 系统，节能控制策略更为复杂。在^[6]中，使用博弈论设计了单云上多用户 MECO 的分布式计算卸载，以最小化移动设备上的能量和延迟。文献^[7]考虑了多小区 MECO 系统，在卸载延迟约束下，联合分配无线电和计算资源以最小化移动能耗。在中心云和边缘云共存的情况下，^[8]研究了卸载到不同云的最优用户调度。在^[9]中，除了移动能耗总量之外，通过利用博弈论设计云与移动之间的映射进行卸载，计算的云能耗也被最小化。

3. 本文方法

3.1. 基于 TDMA 的多用户 MECO

资源分配问题表述如下：

$$\min_{\{l_k, t_k\}} \sum_{k=1}^K \beta_k \left[\frac{t_k}{h_k^2} f\left(\frac{l_k}{t_k}\right) + (R_k - l_k) C_k P_k \right]$$

$$\text{s.t. } \sum_{k=1}^K t_k \leq T, \sum_{k=1}^K C_k l_k \leq F,$$

$$t_k \geq 0, m_k^+ \leq l_k \leq R_k, k \in K \quad (\text{P1})$$

P2 问题少了 $\sum_{k=1}^K C_k l_k \leq F$ 这个约束，使用双重分解方法(拉格朗日方法)直接解决问题

P1 需要迭代计算，并且无法深入了解最优策略的结构。为了解决这些问题，作者采用了两阶段的解决方案，首先需要解决问题 P2，然后通过放松对云容量的限制来解决问题 P1。如果问题 P2 的解决方案违反了对云容量的约束，那么问题 P1 将在问题 P2 的解决方案的基础上逐步解决。

作者通过用拉格朗日法和 KKT 条件解决 P2 问题，得到：

A：卸载优先级函数：

$$\varphi(\beta_k, C_k, P_k, h_k) = \begin{cases} \frac{\beta_k N_0}{h_k^2} (v_k \ln v_k - v_k + 1), & v_k \geq 1 \\ 0, & v_k < 1 \end{cases}$$

$$\text{其中 } v_k = \frac{BC_k P_k h_k^2}{N_0 \ln 2}.$$

B:最优资源分配策略:

1): 如果 $v_k \leq 1$ 且所有 k 的最小卸载数据量 $m_k^+ = 0$, 则这些用户都不进行卸载,

$$\text{即: } l_k^{*(2)} = t_k^{*(2)} = 0 \quad k \in K$$

2):若存在设备 k , 且 $v_k > 1$ 或 $m_k^+ > 0$, 则对于 $k \in K$:

$$l_k^{*(2)} = \begin{cases} = m_k^+, & \varphi_k < \lambda^* \\ \in [m_k^+, R_k], & \varphi_k = \lambda^* \\ = R_k & \varphi_k > \lambda^* \end{cases}$$

$$t_k^{*(2)} = \frac{\ln 2}{B[W_0(\frac{\lambda^* h_k^2}{\beta_k - N_0}) + 1]} \times l_k^{*(2)}$$

and

$$\text{要满足约束 } \sum_{k=1}^K t_k^{*(2)} = T.$$

对于解决 P1 问题:

A: 卸载优先级函数:

$$\varphi(\beta_k, C_k, P_k, h_k, \tilde{\mu}^*) = \begin{cases} \frac{\beta_k N_0}{h_k^2} (\tilde{v}_k \ln \tilde{v}_k - \tilde{v}_k + 1), & \tilde{v}_k \geq 1 \\ 0, & \tilde{v}_k < 1 \end{cases}$$

$$\text{其中 } \tilde{v}_k = \frac{BC_k (P_k - \tilde{\mu}^*) h_k^2}{N_0 \ln 2}.$$

B:采用与 P2 同样的最优资源分配策略。

3.2. 基于 OFDMA 的多用户 MECO

问题表述如下:

$$\begin{aligned} \min_{\{\rho_{k,n}, \beta_k\}} & \sum_{k=1}^K \beta_k \left[\sum_{n=1}^N \frac{\rho_{k,n}}{h_{k,n}^2} f\left(\frac{l_{k,n}}{\rho_{k,n}}\right) + (R_k - \sum_{n=1}^N l_{k,n}) C_k P_k \right] \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} \leq 1, n \in N \\ & m_k^+ \leq \sum_{n=1}^N l_{k,n} \leq R_k, k \in K \\ & \rho_{k,n} \in \{0,1\}, n \in N \text{ and } k \in K \end{aligned}$$

A:卸载优先级函数:

$$\varphi_{k,n}(\beta_k, C_k, P_k, h_{k,n}) = \begin{cases} \frac{\beta_k \bar{N}_0}{h_{k,n}^2} (v_{k,n} \ln v_{k,n} - v_{k,n} + 1), & v_{k,n} \geq 1 \\ 0, & v_{k,n} < 1 \end{cases}$$

$$\text{其中 } v_{k,n} = \frac{BC_k P_k h_{k,n}^2}{\bar{N}_0 \ln 2}.$$

B:采用与 P2 同样的最优资源分配策略。

4. 复现细节

4.1. 与已有开源代码对比

无开源代码。

4.2. 实验环境搭建

本文用 MATLAB 2023a 对该论文进行复现。

4.3. 数据说明

提出的 TDMA 和 OFDMA 系统的资源分配算法的性能通过基于 200 个信道实现的仿真来评估。系统中有 30 个用户，公平系数相等，即对所有 k 个用户 $\beta_k = 1$ ，使得移动能耗加权和表示移动能耗总量。时隙 $T = 100$ 毫秒。TDMA 中的信道 h_k 和 OFDAM 中的子信道 $h_{k,n}$ 均建

模为独立的瑞利衰落，平均功率损耗设为 10^{-3} 。复高斯白信道噪声方差 $N_0 = 10^{-9} W$ 。以手机 k 为例，CPU 计算能力 F_k 从 $\{0.1, 0.2, \dots, 1.0\}$ GHz 集合中均匀选择，每周期局部计算能量 P_k 在 $(0, 20 \times 10^{-11})$ J/cycle 范围内均匀分布，对于计算任务，每比特的数据量和所需 CPU 周期数服从均匀分布， $R_k \in [100, 500]$ KB 和 $C_k \in [500, 1500]$ cycles/bit。所有随机变量对于不同的移动设备都是独立的，模拟了异构移动计算能力。最后，将有限容量云建模为具有上界卸载计算的云，设为 $F = 6 \times 10^9$ cycles per slot。

5. 实现结果分析

5.1. 基于 TDMA 的多用户 MECO

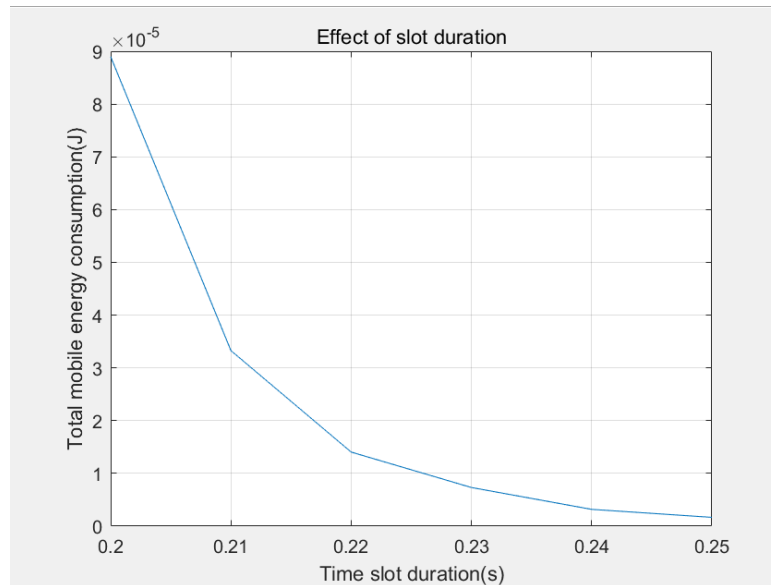


图 1 时隙的影响

可以观察到移动总能耗随着时隙持续时间的增加而减小。

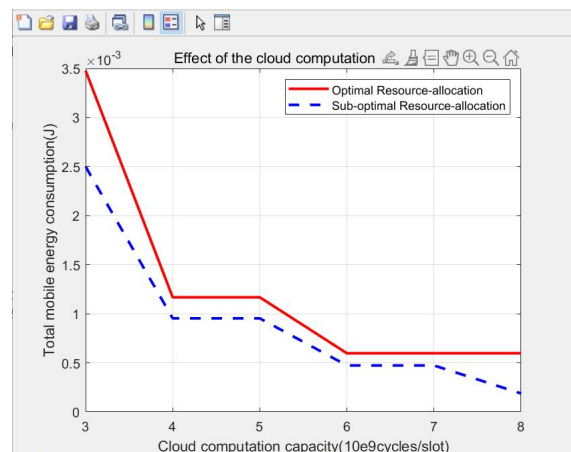


图 2 云容量的影响

可以看出，随着云容量增大，耗能减少。这说明随着云容量的增大，移动设备倾向于把计算卸载到云上，用来减少能量消耗。

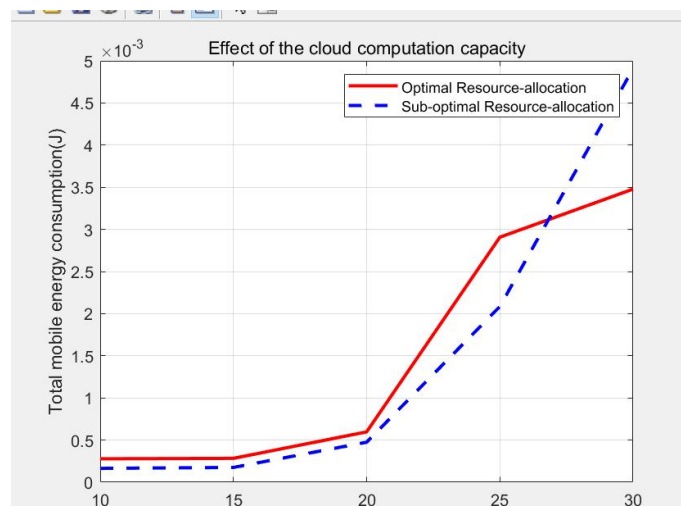


图 3 用户数量的影响

可以看出，用户数量增大，能量消耗增大。

5.2. 基于 OFDMA 的多用户 MECO

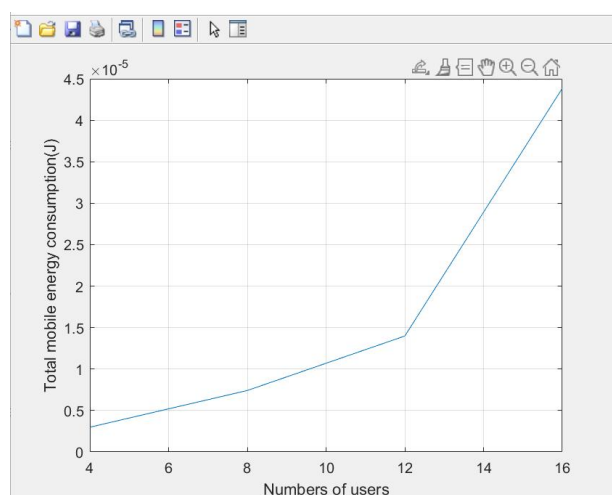


图 4 用户数量的影响

可以观察到，用户数量增多，耗能增加。

6. 总结与展望

该研究了基于 TDMA/OFDMA 的多用户 MECO 系统在无限和有限云计算能力情况下的资

源分配问题。对于 TDMA MECO 系统，为了使加权和移动能耗最小，最优资源分配策略应具有基于阈值的结构。具体来说，作者推导了一个依赖于本地计算能量和信道增益的卸载优先级函数。基于此，BS 为每个移动设备做出二进制卸载决策，优先级高于或低于给定阈值的用户将执行完整和最小的卸载。然后，作者将这种基于阈值的策略结构扩展到 OFDMA 系统中，并设计了一种低复杂度的算法来解决公式化的混合整数优化问题，该算法在仿真中具有接近最优的性能。

参考文献

- [1]“Mobile-edge computing introductory technical white paper,”Dept. Mobile-Edge Comput. Ind. Initiative, ETSI, Sophia Antipolis, France, WhitePaper, Sep.2014.[Online].Available:https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge_computing_-_introductory_technical_white_paper_v1%2018-09-14.pdf
- [2] W. Zhang, Y. Wen, K. Guan, D. Kilper, H. Luo, and D. O. Wu, “Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4569–4581, Sep. 2013.
- [3] W. Zhang, Y. Wen, K. Guan, D. Kilper, H. Luo, and D. O. Wu, “Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4569–4581, Sep. 2013.
- [4] W. Zhang, Y. Wen, K. Guan, D. Kilper, H. Luo, and D. O. Wu, “Energy-optimal mobile cloud computing under stochastic wireless channel,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4569–4581, Sep. 2013.
- [5] X. Xiang, C. Lin, and X. Chen, “Energy-efficient link selection and transmission scheduling in mobile cloud computing,” IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 3, no. 2, pp. 153–156, Apr. 2014.
- [6] X. Chen, L. Jiao, W. Li, and X. Fu, “Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing,” IEEE Trans. Netw., vol. 24, no. 5, pp. 2795–2808, Oct. 2016.
- [7] S. Sardellitti, G. Scutari, and S. Barbarossa, “Joint optimization of radio and computational resources for multicell mobile-edge computing,” IEEE Trans. Signal Inf. Process. Netw., vol. 1, no. 2, pp. 89–103, Jun. 2015.
- [8] T. Zhao, S. Zhou, X. Guo, Y. Zhao, and Z. Niu, “A cooperative scheduling scheme of local cloud and Internet cloud for delay-aware mobile cloud computing,” in Proc. IEEE Globecom, Dec. 2015, pp. 1–6.
- [9] Y. Ge, Y. Zhang, Q. Qiu, and Y.-H. Lu, “A game theoretic resource allocation for overall energy minimization in mobile cloud computing system,” in Proc. IEEE ISLPED, Jul. 2012, pp. 279–284.