

Joint Offloading and Computing Optimization in Wireless Powered Mobile-Edge Computing Systems

Feng Wang, Jie Xu, Xin Wang

1.问题：一些新兴的延迟敏感应用程序非常依赖于大规模无线设备的实时通信和计算。但是现有的大量工作都集中在改善它们的通信性能上，如何为这些设备提供增强的计算能力是一项关键而又具有挑战性的任务，尤其是在它们体积小、功率低的情况下。如何为大型计算重设备提供可持续、经济的能源供应是物联网面临的另一个挑战。

2.解决方案：基于RF信号的无线功率传输通过部署专用的能量发射器以无线方式广播能量。通过在能量传输器上部署多个天线来提高能量传输器对一个或多个能量接收器的WPT效率。

3.系统模型：由 multi-antenna AP和多个single-antenna 用户组成的无线多用户MEC系统

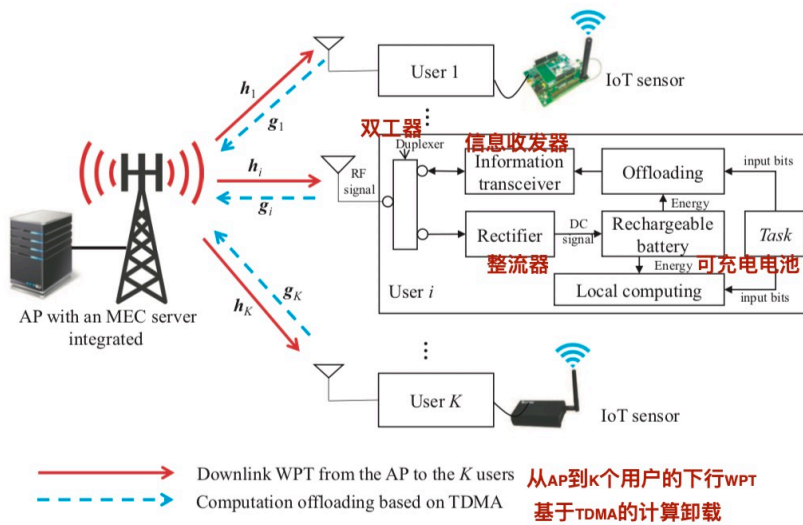


Fig. 1. A wireless powered multiuser MEC system with WPT in the downlink and computation offloading in the uplink.

系统概述：

由 N-antenna AP（与MEC服务器集成）和一组single-antenna 用户K $\{1, \dots, K\}$ 组成。在该系统中，AP采用基于射频信号的能量发射波束形成技术对K、用户进行充电。每个用户将计算任务任意划分为两个独立的部分，通过本地计算和卸载，利用所获得的能量执行其计算任务。

下行链路采用WPT，上行链路采用计算卸载，假设下行链路WPT和上行链路无线通信在正交频带上同时运行。采用TDMA协议来协调计算卸载，不同的用户将各自的任务卸载到AP。

框架：一个具有联合能量波束形成、卸载和计算优化功能的统一MEC-WPT设计框架。

A. Energy Transmit Beamforming from AP to Users（收集能量）

s 表示AP的能量承载发射信号， $s \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ，

Q 表示能量传递协方差矩阵 $Q \triangleq \mathbb{E}[ss^H] \geq 0$

$\mathbb{E}[\|s\|^2] = \text{tr}(Q)$ 表示ap处的传输功率。

$r = \text{rank}(Q) \leq N$ ，则可通过 Q 的特征值分解得到 r 束能量。

为获得这种能量，每个用户*i*首先通过整流器将接收到的射频信号转换成直流信号，然后将直流信号的能量存储在其可充电电池中。

非线性射频-直流转换很大程度上取决于输入功率级和发射波形。为了简单起见，我们假设输入射频功率在整流器的线性范围内。因此，用户*i*在这个时间段内获得的能量为

$$E_i = T\zeta\mathbb{E}\left[|h_i^H s|^2\right] = T\zeta\text{tr}(\mathbf{Q}\mathbf{H}_i),$$

其中 $0 < \zeta \leq 1$ 表示每个用户的恒定EH效率。收集的能量 E_i 由用户*i*用于计算卸载和本地计算。

B. Energy Consumption at Users for Computation （消耗能量）

对于用户*i*

R_i ：计算输入位。计算任务分为两部分： $l_i \geq 0$ 和 $q_i \geq 0$ 位

l_i ：卸载到AP的MEC服务器的计算输入位

q_i ：本地计算的计算输入位。

假设这样的划分不会产生额外的计算输入位，即 $R_i = l_i + q_i$

1) Computation Offloading from Users to the AP

为保证K个用户的卸载不受干扰，采用TDMA协议。

将块划分为 $2K$ 个时隙，每个时隙的长度为 t_i ，在前 k 个时隙中， k 个用户将自己的计算位逐个卸载到AP。

在MEC服务器代表这些用户执行计算任务后，在后 k 个时隙中AP将计算结果发送给 k 个用户。

忽略MEC服务器所消耗的计算时间，下载计算结果时间，传输和接收计算结果所消耗的能量。

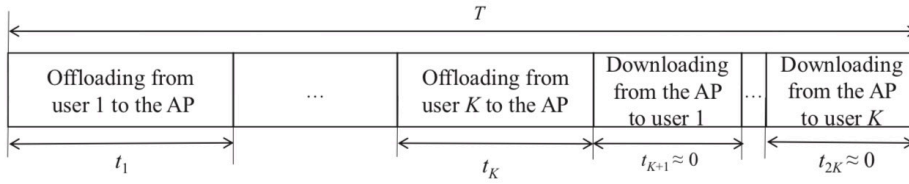


Fig. 2. The TDMA protocol for multiuser computation offloading.

对于时隙*i*中的计算卸载

g_i 表示从用户*i*到ap的上行链路信道矢量，

p_i 表示卸载的发射功率。

B 表示频谱带宽

\tilde{g}_i 表示从用户*i*到AP的有效信道功率增益

σ^2 是AP接收端的噪声功率

Γ 是由于实际的编码和调制方案导致的与信道容量之间的间隙的常数

假设AP使用MRC接收器来解码信息。用户*i*的可实现卸载速率（bit/秒）为：

$$r_i = B \log_2 \left(1 + \frac{p_i \tilde{g}_i}{\Gamma \sigma^2} \right), \quad \forall i \in \mathcal{K},$$

用户*i*向ap卸载的位数 l_i 表示为：

$$\ell_i = r_i t_i, \quad \forall i \in \mathcal{K}.$$

计算卸载会导致K用户和AP的能耗。每用户*i* $i \in \mathcal{K}$ ，除传输功率 p_i 外，还消耗一个恒流电路功率 $p_{c,i}$ （由数模转换器、滤波器等）。用户*i*的卸载能耗为 $E_{\text{off},i} = (p_i + p_{c,i})t_i$ 。

由 r_i 和 l_i 的式子转化得到 p_i ：

$$p_i = \frac{1}{\tilde{g}_i} \beta \left(\frac{\ell_i}{t_i} \right).$$

所以 $E_{\text{off},i}$ 为：

$$E_{\text{off},i} = \frac{t_i}{\tilde{g}_i} \beta \left(\frac{\ell_i}{t_i} \right) + p_{c,i} t_i.$$

AP的能力消耗和总共卸载的位数成正比所以 $E_{\text{MEC}} = \alpha \sum_{i=1}^K \ell_i$,

2) Local Computing at Users: —— 每个用户*i*执行 q_i 输入位的本地计算

c_i 表示在用户*i*计算一个输入位所需的CPU周期数。那么 q_i 位所需的CPU周期总数为 $c_i q_i$ 。

通过应用DVFS 技术，用户*i*可以通过调整每个周期 n 的CPU频率 $f_{i,n}$ 来控制本地任务执行的能耗，其中

$$f_{i,n} \in (0, f_i^{\max}], n \in \{1, \dots, C_i q_i\}$$

用户*i*的本地执行时间为: $\sum_{n=1}^{C_i q_i} \frac{1}{f_{i,n}}$

每个用户需要在一个块内完成任务的执行，所以: $\sum_{n=1}^{C_i q_i} \frac{1}{f_{i,n}} \leq T, \forall i \in \mathcal{K}$.

用户*i*本地计算所消耗的能量为: $E_{\text{loc},i} = \sum_{n=1}^{C_i q_i} \kappa_i f_{i,n}^2$,

其中， κ_i 是取决于用户*i*的芯片结构的有效电容系数。

用户的能量收集限制:

$$E_{\text{loc},i} + E_{\text{off},i} \leq E_i.$$

4.问题抽象化:

4.1优化目标: 通过考虑延迟限制计算，AP可以根据用户的个人计算能力限制最小化总能耗。

4.2优化问题:

$$\begin{aligned}
 (\mathcal{P}1): \quad & \min_{Q \geq 0, t, \ell, f} T \text{tr}(\mathbf{Q}) + \sum_{i=1}^K \alpha \ell_i \quad (9a) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{n=1}^{C_i(R_i - \ell_i)} \frac{1}{f_{i,n}} \leq T, \quad \forall i \in \mathcal{K} \quad (9b) \\
 & \sum_{n=1}^{C_i(R_i - \ell_i)} \kappa_i f_{i,n}^2 + \frac{t_i}{\tilde{g}_i} \beta \left(\frac{\ell_i}{t_i} \right) + p_{c,i} t_i - T \zeta \text{tr}(\mathbf{Q} \mathbf{H}_i) \leq 0, \quad \forall i \in \mathcal{K} \quad (9c) \\
 & \sum_{i=1}^K t_i \leq T, \quad t_i \geq 0, \quad 0 \leq \ell_i \leq R_i, \quad \forall i \in \mathcal{K} \quad (9d) \\
 & 0 \leq f_{i,n} \leq f_i^{\max}, \quad \forall n, \forall i \in \mathcal{K}. \quad (9e)
 \end{aligned}$$

Diagram annotations: Red circles highlight constraints (9b) and (9c). A red line points from the text "延迟约束" (Delay constraint) to constraint (9b). Another red line points from the text "能耗约束" (Energy constraint) to constraint (9c). In constraint (9c), the terms $\sum_{n=1}^{C_i(R_i - \ell_i)} \kappa_i f_{i,n}^2$ and $\frac{t_i}{\tilde{g}_i} \beta \left(\frac{\ell_i}{t_i} \right)$ are labeled $E_{\text{loc},i}$ and $E_{\text{off},i}$ respectively. The term $T \zeta \text{tr}(\mathbf{Q} \mathbf{H}_i)$ is labeled E_i .

定理1: 给定卸载比特数 ℓ ，问题 (p1) 的局部CPU频率 $f_{i,n}$ 的最优解应满足

$$f_{i,1} = \dots = f_{i,C_i(R_i - \ell_i)} = C_i(R_i - \ell_i)/T, \quad \forall i \in \mathcal{K}.$$

优化问题变为:

$$(\mathcal{P}1.1): \quad \min_{Q \geq 0, t, \ell} T \text{tr}(\mathbf{Q}) + \sum_{i=1}^K \alpha \ell_i \quad (11a)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K t_i \leq T \quad (11b)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\kappa_i C_i^3 (R_i - \ell_i)^3}{T^2} + \frac{t_i}{\tilde{g}_i} \beta \left(\frac{\ell_i}{t_i} \right) + p_{c,i} t_i - T \zeta \text{tr}(\mathbf{Q} \mathbf{H}_i) \leq 0 \\
 & \forall i \in \mathcal{K} \quad (11c)
 \end{aligned}$$

$$0 \leq \ell_i \leq R_i, \quad t_i \geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{K}. \quad (11d)$$

(11a) 中的目标函数是仿射的，而其他约束都是凸的，因此问题 (p1.1) 是凸的，因此可以通过标准的凸优化技术来优化求解。

4.3问题求解：拉格朗日对偶方法，得到了半封闭形式的最优解。（这里不会 待学习）

4.4算法：

Algorithm 1 for Solving the Energy Minimization Problem ($\mathcal{P}1$)

- 1: **Initialization:** Given an ellipsoid $\mathcal{E}((\lambda, \mu), \mathbf{A})$ containing $(\lambda^{\text{opt}}, \mu^{\text{opt}})$, where (λ, μ) is the center of \mathcal{E} and $\mathbf{A} > \mathbf{0}$ characterizes the volume of \mathcal{E} .
 - 2: **Repeat:**
 - For each user $i \in \mathcal{K}$, obtain (t_i^*, ℓ_i^*) by Lemma 3.2 under given λ_i and μ ;
 - Compute the subgradients of the objective function and the constraints of (D1.1) as in Section III-B.2;
 - Update λ and μ using the ellipsoid method [38];
 - 3: **Until** λ and μ converge within a prescribed accuracy.
 - 4: **Set** $(\lambda^{\text{opt}}, \mu^{\text{opt}}) \leftarrow (\lambda, \mu)$.
 - 5: **Output:** Obtain $(t^{\text{opt}}, \ell^{\text{opt}})$, $\{f_{i,n}^{\text{opt}}\}$, and compute Q^{opt} by (24).
-

5.实验：

几种情况对比：

- 1) Local computing only
- 2) Computation offloading only
- 3) Joint design with isotropic WPT
- 4) Separate MEC-WPT design

维度：

Heterogeneous Users

Homogeneous Users

指标：

Time block length, T (sec)

User number, K

Number of computation bits per user, R (kbits)

Spectrum bandwidth for offloading per user, B (MHz)

Distance between the AP and the far user, d_2 (meters)

缩写：

RF: Radio-frequency

EH: energy harvesting 能量收集

WPT: wireless power transfer 无线功率传输

CSI: the channel state information 信道状态信息

MRC: the maximum ratio combining

DVFS: dynamic voltage and frequency scaling

反思：好多公式都忘了，需要好好复习补充，基础知识需要巩固加强