

## 1. 问题概述

为了应对终端设备处理能力不足、资源有限等问题，业界在移动边缘计算 (Mobile Edge Computing, MEC) 中引入了计算卸载概念。边缘计算卸载即移动设备 (Smart Mobile Device, SMD) 将计算任务卸载到 MEC 网络 (具体指 FEMTO-CLOUD) 中，主要解决移动设备在资源存储、计算性能以及能效等方面的不足。

当移动设备需要处理计算密集型应用程序时，它会向边缘云发送资源请求。边缘云明智地决定是否卸载应用程序，以及需要将哪些部分卸载到云中。一旦边缘云决定卸载，就需要依次执行三个阶段，如图 1 所示。

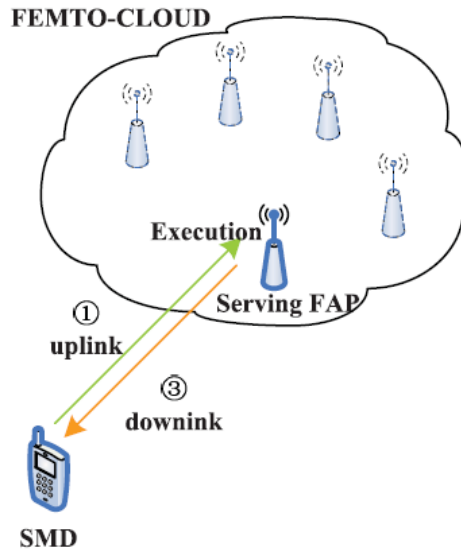


图 1 移动设备执行计算卸载过程

具体三个阶段的执行过程如下：

- 1) 移动设备通过上行通道将数据发送到云端；
- 2) 云端执行卸载数据；
- 3) 通过下行通道将结果发送回移动设备。

为了达到节约移动设备能耗的目的，卸载的决策取决于移动设备的计算速度、移动设备的发射功率、信道条件等多方面。

## 2. 计算卸载能耗最优化问题模型构建

公式(1)表示移动端的总耗能，其中包含移动端计算耗能、上传数据耗能和下载数据耗能三部分。具体如下所示：

$$E(f_l, P_t, \lambda) = \alpha I K \lambda f_l^2 + (P_0 + k_t P_t) \frac{\beta_1 (1 - \lambda) I}{R_u} + P_r \frac{\beta_2 (1 - \lambda) I}{R_d} \quad (1)$$

公式(2)和(3)分别表示上传和下载速率，具体如下所示：

$$R_U = W_U \log_2 \left( 1 + \frac{P_t d^{-\nu} |h_1|^2}{N_0} \right) \quad (2)$$

$$R_D = W_D \log_2 \left( 1 + \frac{P_r d^{-\nu} |h_2|^2}{N_0} \right) \quad (3)$$

**优化问题 P1:**

$$\arg \min_{f_l, P_t, \lambda} E(f_l, P_t, \lambda)$$

约束条件：

$$L(f_l, P_t, \lambda) = \max(t_l, t_c) \leq L_{\max} \quad (4)$$

$$t_l = \frac{\alpha \lambda I}{f_l} \quad (5)$$

$$t_c = t_U + \tau_c + t_D \quad (6)$$

$$t_U = \frac{\beta_1(1-\lambda)I}{R_U}, \quad t_D = \frac{\beta_2(1-\lambda)I}{R_D}, \quad \tau_c = \frac{\alpha(1-\lambda)I}{f_c} \quad (7)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad (8)$$

$$0 \leq P_t \leq P_{t\max} \quad (9)$$

$$0 \leq f_l \leq f_{l\max} \quad (10)$$

$$I(1-\lambda)\alpha \leq \hat{F} \quad (11)$$

公式(4)为延迟约束，表示本地部分数据执行时间 $t_l$ (即公式 5)和云端部分数据执行时间 $t_c$ (即公式 6 和 7)的最大值不能超过 $L_{\max}$ 。公式(8)、(9)和(10)分别表示卸载比、传输比率和计算速度约束。公式(11)表示边缘云的计算能力约束，卸载到云中执行数据所需要的 CPU 周期不能超过 $\hat{F}$ 。

可以通过智能优化算法在约束条件下不断更新三个决策变量 $f_l, P_t, \lambda$ 的值得到能耗最优解。算法中通过改变移动端到云端距离 $d$ ，可以验证随着 $d$ 的增大，移动端卸载到云端的数据会减少，能耗随之增加。

3. 具体参数说明

决策变量	含义	变量取值范围	其它
$f_l$	移动端计算速度	$[0, f_{l\max}]$	
$P_t$	移动端发射功率	$[0, P_{t\max}]$	
$\lambda$	本地执行的位数与总输入数据位数之比(比率)	$[0, 1]$	

Parameter	Description	Value	Other
$W_U/W_D$	上行/下行信道带宽	10MHZ	
$d$	从 SMD 到其服务 FAP 的距离	10、20、30、40、50、60、70、80、90、100	
$h_1/h_2$	上行/下行信道衰落系数	0.99	
$N_0$	白高斯噪声功率	$174\times 10^{-13}$	
$P_0$	SMD 静态能量消耗	0.4W	
$k_t$	SMD 功率放大器的效率因数	18	
$P_r$	SMD 接收能量消耗	0.4W	
$P_F$	服务 FAP 的发射功率	0.1W	
$P_{t\max}$	SMD 最大发射功率	0.1W	
$f_c$	Cloud 的计算速度	$8\times 10^8\text{ cycles}/s$	
$f_{l\max}$	SMD 最大计算速度	$4\times 10^8\text{ cycles}/s$	
$k$	取决于芯片架构系数(用于对计算能耗进行建模)	$10^{-26}$	
$\alpha$	计算 1bit 数据需要的周期数由移动端的应用复杂度决定	40	
$I$	计算输入数据的位数	5Mbyte	
$\nu$	路径损耗指数	4	

$L_{\max}$	与应用有关的延迟要求	[1.5, 4.5]	
$\beta_1$	占上行传输开销的系数	1	
$\beta_2$	共同考虑下行链路传输开销和卸载到云的输出与输入比特之比的系数	0.2	
$\hat{F}$	边缘云计算能力上界	$6 \times 10^9 \text{cycles/slot}$	
$R_U/R_D$	上行/下行速率	$R_U = W_U \log_2 \left( 1 + \frac{P_t d^{-\alpha}  h_1 ^2}{N_0} \right)$ $R_D = W_D \log_2 \left( 1 + \frac{P_r d^{-\alpha}  h_2 ^2}{N_0} \right)$	
$t_U/t_D$	上行/下行传输延迟	$t_U = \frac{\beta_1(1-\lambda)I}{R_U}$ $t_D = \frac{\beta_2(1-\lambda)I}{R_D}$	
$\tau_c$	Cloud 端执行时间	$\tau_c = \frac{\alpha(1-\lambda)I}{f_c}$	
$t_l/E_l$	本地执行部分的时间/能源消耗	$E_l = \alpha \lambda I k f_l^2$	
$t_c/E_c$	卸载零件的时间/能耗	$t_c = t_U + \tau_c + t_D$ $E_c = (P_0 + k_t P_t) t_U + P_r t_D$	
$L/E$	SMD 的总时间/能源消耗	$L(f_l, P_t, \lambda) = \max \{t_l, t_c\}$ $E(f_l, P_t, \lambda) = E_l + E_c$	

#### 4. 问题扩展（供参考）

可考虑扩展到多用户的计算能耗最优化问题：

1) 针对每个用户，有不同的上行传输速率，卸载比等；

2) 针对每个用户，除了上述提到的数据量  $I$ ，最大延迟  $L_{\max}$ ，添加计算需要的资源  $q$ ，并在约束中限制边缘云中资源上界为  $Q$ 。