

超密集边缘计算网络中基于深度学习的计算卸载和资源调度 - UDN 应用场景（密集商业区、商务楼宇、高层住宅、密集住宅、医院、高校、交通枢纽、体育场馆等） - 问题写清楚

## Abstract

### 一、介绍

### 二、原因

UDN 是指密集部署小基站（SBS）然后访问大量用户，以提高网络覆盖率，减少传输延迟。

由于 UDN 的部署和有限的频谱资源，经典的非正交多址（OMA）技术不能再满足 MEC 中对低延迟和低能耗的要求。非正交多路接入（NOMA）作为一种新兴技术，与 OMA 相比，通过将相同的资源分配给多个用户，可以有效地提高系统的频谱效率。

在 NOMA-MEC 密集网络中，每个用户可以选择将任务卸载到 MEC 服务器。但是当多个用户同时进行任务卸载时会产生严重的干扰，从而造成传输时延的增加和发射功率的浪费，影响用户的服务体验。而子信道资源分配是一种降低干扰、提高频谱效率和能效的重要手段。

贡献点：

1) 文章构建了一个基于 NOMA 的超密集边缘计算网络，其中每个小基站都部署一个 MEC 服务器并使用 NOMA 技术服务其相关用户。本文提出了一个联合计算卸载决策、功率分配和子信道资源分配的优化问题，并且在保证每个任务 Qos 的前提下最小化系统的总成本（用户消耗的能耗和延迟的加权总和）。

2) 与云数据中心相比，MEC 服务器资源非常有限，因此，当配备 MEC 服务器的微型基站独立运行时，它不能有效地处理来自用户设备的计算任务。因此为了减少延迟，需要考虑微型基站之间的合作进行资源共享和提高资源利用率。

3) 由于所提优化问题是一个混合整数非线性规划问题，属于 NP 难问题，无法在多项式时间内获得最优解，因此本文将原混合问题解耦为多个子问题，并提出一个基于深度学习算法的解决方案，获得原问题的近似最优解。

### 三、相关工作

### 四、系统模型

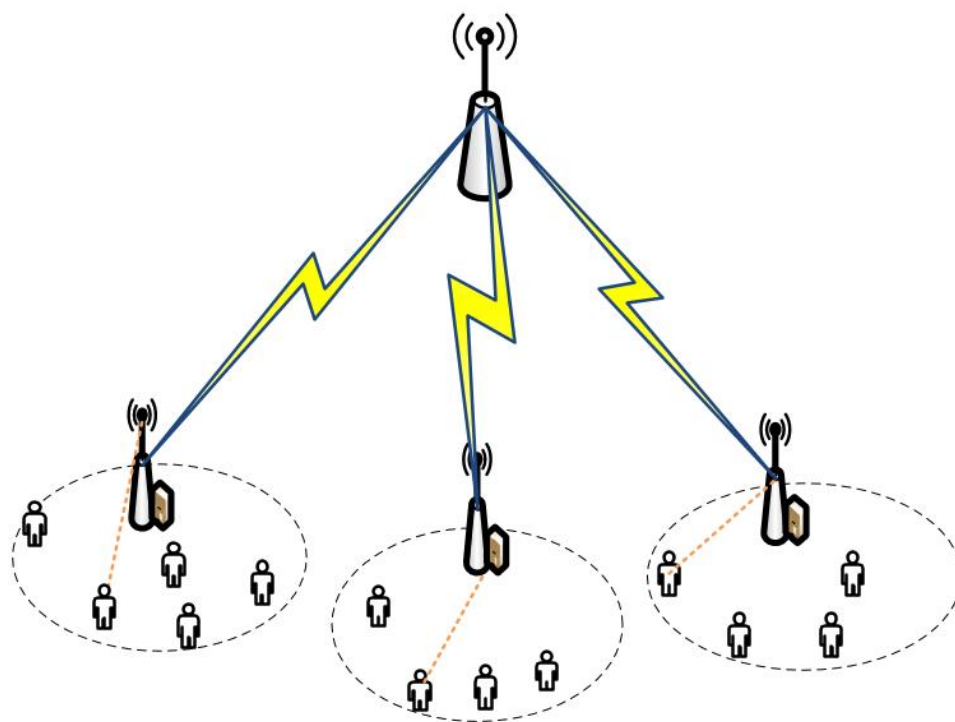


图 1.系统模型

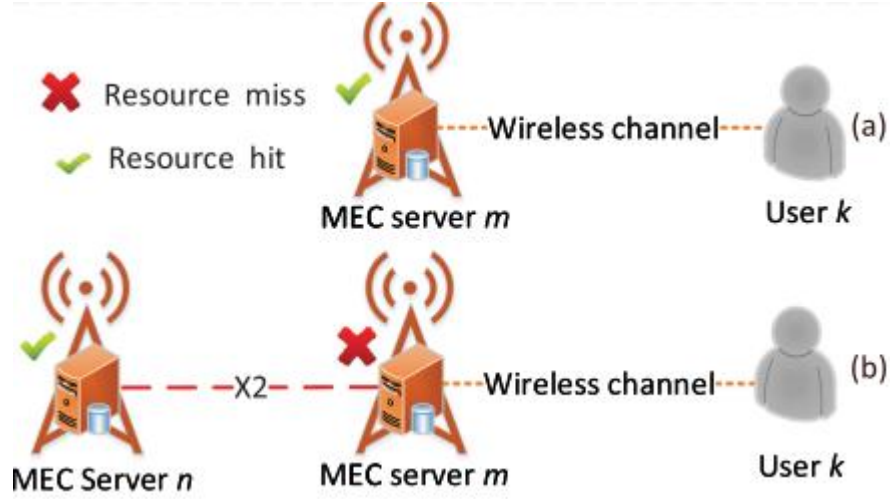
如图 1 所示，我们考虑了一个密集移动边缘计算网络，该网络环境由一个宏基站和一组带有边缘服务器的微型基站以及一组移动用户  $N$  组成。假设每个微型基站都有一定的覆盖区域，并且处于微型基站中的用户应该只与一个区域相关联。移动终端设备可以通过 NOMA 技术将其计算任务卸载到与其关联的移动边缘计算服务器。在文章中，我们假设宏基站作为中央控制器，负责收集移动用户的任务信息、微型基站的计算资源信息以及网络状态信息。其中小型基站集合由  $S = \{1, 2, \dots, S\}$  来表示，

假设系统中有  $K$  个子信道用集合  $K = \{1, 2, \dots, K\}$  来表示。每个小型基站覆盖的用户集合用  $N_s = \{1, 2, \dots, N\}$  来表示。并且假设每个基站都配备了边缘服务器。将时间离散为一组等间隔的时间间隔，记为  $T = \{1, 2, \dots, T\}$

我们假设每个移动用户一次生成一个计算请求为  $\psi_{n,s}$  由四元组  $\langle D_{n,s}, T_{n,s}, C_{n,s} \rangle$  表示，其中  $D_{n,s}$  表示任务数据大小， $T_{n,s}$  表示任务的最大容忍延迟， $C_{n,s}$  表示计算任务所需要的 CPU 周期。假设每个用户的任务不能进一步划分为子任务，用户将根据卸载决策决定哪部分任务在本地执行，哪些在与其相关的小型基站执行。

用户的卸载方式：

- 1) 用户的任务在本地执行，任务在本地执行需要消耗用户一定量的能量，但是此时时延较低，用户需要权衡能量消耗和任务完成的时间。
- 2) 用户的任务在小型基站计算，用户需要将任务上传到时间  $t$  与其相关联的基站，基站负责提供移动设备所需要的服务进行计算。
- 3) 假设此时与其相关联的基站没有足够的计算资源满足用户的需求，则需要将用户的任务传输到相邻的基站。



假设每个移动设备的卸载决策结果为  $x_{n,s}^k$ ， $x_{n,s}^k = 1$  表示用户卸载到基站，反之用户则在本地进行处理。

$$x_{n,s}^k = \begin{cases} 1, & \text{if } \psi_n \text{ is offloaded from user } n \text{ to BS } s, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

## A 通信模型

### (1) 用户和 MEC 服务器之间

假设小小区内采用 NOMA 技术支持不同用户占用同一信道，不同微型基站可以复用同一信道。定义小基站占用子信道的变量为  $c_s^k$ ，当  $c_s^k = 1$  时，表示小基站  $s$  占用子信道  $k$ ；否则  $c_s^k = 0$ 。而且连接到一个子信道的小小区的最大数目为  $M_{\max}$ 。

在子信道  $k$  上，对于小基站  $s$  服务的用户集  $N_s$ ，假设其信道增益遵循  $g_{1s}^k \geq g_{2s}^k \geq \dots \geq g_{n_s}^k$  的顺序。因此，小小区  $s$  中第  $n$  个用户在子信道  $k$  上的信干噪比 (SINR) 表示为：

$$\gamma_{n,s}^k = \frac{p_{n,s}^k g_{n,s}^k}{I_{n,s}^k + I_{s,s'}^k + \sigma^2}$$

其中,  $p_{n,s}^k$  表示小小区 s 中第 n 个用户在子信道 k 上的发射功率,  $I_{n,s}^k = \sum_{i=n+1}^N x_i^s p_{n,s}^k g_{n,s}^k$  表示小小区 s 用户间的干扰。

$I_{m,m'}^k = \sum_{r \in S} \left( c_r^k \sum_{n \in U_r} x_n^r p_{n,r}^k g_{n,s}^k \right)$  表示小区间的干扰。  $\sigma^2$  表示高斯白噪声的功率。

根据香农公式计算得到用户 n 在子信道 k 上的传输的数据率为：

$$R_{n,s}^k = B \log_2 (1 + \gamma_{n,s}^k)$$

(2) 微型基站和微型基站之间

边缘服务器间的上行传输速率为：

$$R_{s,s'} = B \log_2 \left\{ 1 + \frac{p_{s,s'} g_{s,s'}}{\sigma^2 + \sum_{i \neq s, j \neq s'} p_{i,j} g_{i,j}} \right\}$$

## B 计算模型

### 1) 本地计算

$f_{n,s}^l$  表示小区  $s$  中用户  $n$  的 CPU 频率，它表示用户每秒钟可以执行的 CPU 循环数。在本地执行任务  $\psi_{n,s}$  的时间为：

$$T_{n,s}^{loc} = \frac{C_{n,s}}{f_{n,s}^l}$$

能量消耗：任务在用户进行本地处理，需要消耗一定的能量，可以计算为：

$$\begin{aligned} E_{n,s}^{loc} &= \kappa \cdot \left( f_{n,s}^l \right)^2 \cdot t_{n,s}^{loc} \\ &= \kappa \cdot f_{n,s}^l \cdot C_{n,s} \end{aligned}$$

$\kappa$  是根据用户器件[1]的芯片结构决定的有效切换电容。

### 2) 边缘计算

### (1)、微型基站边缘服务器上的资源充足时

小区  $m$  中用户  $n$  在子信道  $k$  上的传输时间表示为：

$$t_{n,s}^{\text{tran}} = \frac{D_{n,s}}{R_{n,s}^k}$$

$f_m^{\text{mec}}$  表示小基站  $s$  分配给用户  $n$  的计算资源，则微型基站  $s$  中用户任务  $\psi_{n,s}$  的计算延迟为：

$$t_{n,s}^{\text{comp}} = \frac{C_{n,s}}{f_{n,s}^{\text{mec}}}$$

因此，用户  $n$  在 MEC 服务器  $s$  上卸载的任务  $\psi_{n,s}$  的总执行时间为：

$$T_{n,s}^{\text{mec}} = t_{n,s}^{\text{tran}} + t_{n,s}^{\text{comp}}$$

将用户任务  $\psi_{n,s}$  的输入数据发送到基站  $s$  的能耗为：



$$E_{n,s}^{tran} = p_{n,s}^k t_{n,s}^{tran} = p_{n,s}^k \frac{D_{n,s}}{R_{n,s}^k}$$

B、与用户  $n$  相关联的微型基站的资源不够用时，需要转移到其他微型基站进行计算

$$y_{n,s}^{s \rightarrow s'} = \begin{cases} 1, & \text{if } \psi_n \text{ of user } n \text{ is offloaded from BS } s \\ & \text{to a neighbor BS } s', \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

转移到其他微型基站进行计算的延迟包括：1) 微型基站  $s$  中的用户将其任务上传到与其相关联的基站  $s$  中 2) 微型基站  $s$  将其计算任务转移到微型基站  $s'$  3) 在微型基站上进行计算

从微型基站  $s$  到微型基站  $s'$  的传输时间：

$$t_{s,s'}^{tran} = \frac{D_{n,s}}{R_{s,s'}}$$

任务执行时间：

$$t_{n,s'}^{comp} = \frac{C_{n,s}}{f_{n,s'}^{mec}}$$

当 MEC 服务器 S 没有足够的计算资源来满足用户的计算要求时，MEC 服务器需要将用户的计算任务卸载到任何有足够资源的 MEC 服务器。因此，用户 n 卸载到 MEC 服务器  $s'$  的总执行时间为：

$$T_{s,s'}^{mec} = t_{n,s}^{tran} + t_{s,s'}^{tran} + t_{n,s'}^{comp}$$

将用户任务  $\psi_{n,s}$  的输入数据从基站 s 转发送到相邻基站  $s'$  的能耗为：

$$E_{s,s'}^{mec} = p_{s,s}^k t_{s,s'}^{tran} = p_{s,s'}^k \frac{D_{n,s}}{R_{s,s'}^k}$$

综上所述，任何执行模型下的用户任务  $\psi_{n,s}$  的完成延迟可以表示为：

$$T_{n,s}^{off} = (1 - x_{n,s}^k) T_{n,s}^{loc} + x_{n,s}^k [(1 - y_{n,s}^{s \rightarrow s'}) T_{n,s}^{mec} + y_{n,s}^{s \rightarrow s'} T_{s,s'}^{mec}]$$

任何执行模型下的用户任务  $\psi_{n,s}$  的所需要的能耗可以表示为：

$$E_{n,s}^{off} = (1 - x_{n,s}) E_{n,s}^{loc} + x_{n,s} [(1 - y_{n,s}^{s \rightarrow s'}) E_{n,s}^{tran} + y_{n,s}^{s \rightarrow s'} E_{s,s'}^{mec}]$$

## 四、问题公式化

本文采用 NOMA 协议作为通信方案，使不同的小小区可以复用同一信道同时传输数据。但是在这种情况下，移动用户可能会使用较大的传输功率来减少传输延迟，但是这样的话可能导致更多的干扰和能源消耗。因此我们需要联合能量消耗、传输时延、用户的子信道分配等，在完成任务的最后期限的同时，最小化能源消耗和成本的总和。

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{s \in S} \sum_{n \in U_s} \left( \lambda^e E_{n,s}^{off} + \lambda^t T_{n,s}^{off} \right) \\
 s.t. \quad & C_1 : T_{n,s}^{off} \leq T_{n,s}, \forall s \in S, n \in U_s \\
 & C_2 : E_{n,s}^{off} \leq E_{\max} \forall s \in S, n \in U_s \\
 & C_3 : 0 \leq x_{n,s}^k p_{n,s}^k \leq P_{n,s}^k \\
 & C_4 : \sum_{u \in U_s} x_{n,s}^k f_{n,s}^{mec} y_{n,s}^{s \rightarrow s'} \leq F_s, \forall s, s' \in S \\
 & C_5 : f_{n,s}^{mec} \geq 0, \forall s \in S, n \in U_s \\
 & C_6 : \sum_{k \in K} c_s^k \leq 1, \forall s \in S \\
 & C_7 : \sum_{s \in S} c_s^k \leq M, \forall k \in K \\
 & C_8 : x_{n,s}^k, y_{n,s}^{s \rightarrow s'}, c_s^k \in \{0, 1\}, \forall s, s' \in S, n \in U_s, k \in K \\
 & C_9 : x_{n,s}^k + y_{n,s}^{s \rightarrow s'} = 1, \forall s, s' \in S, n \in U_s, k \in K
 \end{aligned}$$

其中  $\lambda^e$  和  $\lambda'$  分别是能源消耗和计算时延的权重

C1 C2: 用户任务的计算时延和能量消耗不能超过其最大时延

C4 C5: 分配给用户的计算资源不能超过每个 MEC 服务器的总资源

C6 C7: 每个微型基站最多可以复用一個子信道, 而每个子信道最多可以被 M 个用户所复用

C8 :用户卸载任务的二进制变量、子信道分配是二进制变量

C9: 用户任务只能在本地处理或者卸载到微型基站

Notion	Definition
--------	------------

## 五、问题公式化

## 六、问题解决

## 七、性能评估

## 八、结论

## 参考文献

- [1] T. D. Burd and R. W. Brodersen, "Processor design for portable systems," *J. VLSI Signal Process. Syst. Signal Image Video Technol.*, vol. 13, nos. 2–3, pp. 203–221, 1996.
- [2] PAN Y J, CHEN M, YANG Z H, et al Energy-efficient NOMA-based mobile edge computing offloading[J]. *IEEE Communications Letter*, 2019, 23(2): 310-313