

基于非正交多址接入的移动边缘计算安全节能联合资源分配

郝万明^{①②③} 孙继威^{①③} 孙钢灿^{②③} 朱政宇^{*①②③} 周一青^{①④}

^①(郑州大学河南先进技术研究院 郑州 450003)

^②(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

^③(郑州大学产业技术研究院 郑州 450001)

^④(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为提高基于非正交多址接入(NOMA)的移动边缘计算(MEC)系统中计算任务部分卸载时的安全性, 该文在存在窃听者情况下研究MEC网络的物理层安全, 采用保密中断概率来衡量计算卸载的保密性能, 考虑发射功率约束、本地任务计算约束和保密中断概率约束, 同时引入能耗权重因子以平衡传输能耗和计算能耗, 最终实现系统能耗加权和最小。在满足两个用户优先级情况下, 为降低系统开销, 提出一种联合任务卸载和资源分配机制, 通过基于二分搜索的迭代优化算法寻求问题变换后的最优解, 并获得最优的任务卸载和功率分配。仿真结果表明, 所提算法可有效降低系统能耗。

关键词: 移动边缘计算; 非正交多址接入; 保密中断概率; 资源分配; 部分卸载

中图分类号: TN929.5; TN915.08

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)12-3580-08

DOI: 10.11999/JEIT200872

Secure Energy-efficient Resource Allocation in Mobile Edge Computing Based on Non-Orthogonal Multiple Access

HAO Wanming^{①②③} SUN Jiwei^{①③} SUN Gangcan^{②③}

ZHU Zhengyu^{①②③} ZHOU Yiqing^{①④}

^①(Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450003, China)

^②(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

^③(Industrial Technology Research Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

^④(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the security of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) based Mobile Edge Computation (MEC) system when computation tasks are partially offloading, the physical layer security of MEC network in the presence of eavesdroppers is considered, and the security interruption probability is used to measure the security performance of computation offloading. Considering the transmit power constraint, local task calculation constraint and secret outage probability constraint, and then, the energy consumption weight factor is introduced to balance the transmission energy consumption and the calculated energy consumption. After that, the sum of system weighted energy consumption is finally achieved. In the case of satisfying two user priorities, to reduce the system overhead, a joint task offloading and resource allocation mechanism is proposed to archive the optimal solution of the transformed problem through an iterative optimization algorithm based on bisection search, and the optimal computing task offloading and power allocation are obtained. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the energy consumption of the system.

Key words: Mobile Edge Computing (MEC); Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Secure outage probability; Resource allocation; Partial offloading

收稿日期: 2020-10-09; 改回日期: 2021-04-17; 网络出版: 2021-05-10

*通信作者: 朱政宇 zhuzhengyu6@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(62101499, 61801434), 河南省创新示范专项基金(201111212300), 郑州市重大科技创新专项基金(2019CXZX0037)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62101499, 61801434), The Innovation Demonstration Project of Henan Province (201111212300), The Science and Technology Innovation Major Project of Zhengzhou (2019CXZX0037)

1 引言

移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)通过卸载本地计算任务到远端MEC服务器中执行来增强移动设备的计算能力,因此MEC将被应用于5G以及未来6G无线通信系统中。移动设备的能耗和任务计算时延是MEC系统的两个关键指标^[1,2],一般来讲这两个指标是相互对立的。因此,为兼顾能耗和时延,通常需要联合分配系统通信和计算资源。

面对5G网络出现的新应用如智能交通、虚拟/增强现实、自动驾驶等计算密集型 and 时延敏感型应用的快速增长与大规模部署,功率和尺寸均受限的移动终端设备在使用上述新应用时将面临巨大挑战^[3],MEC和非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)被认为是解决上述挑战的关键技术^[4-7]。MEC解决了由于云计算而带来较大传输时延的问题,也解决了本地计算能力有限的问题,将会在未来无线网络中有很好的应用前景^[8]。同时,为了更好地利用MEC中的无线信道资源,采用NOMA技术可允许不同用户在同一上行信道上同时传输信息,有效提高了系统频谱效率。因此,将NOMA技术和MEC相结合,可进一步提高系统的频谱效率,降低计算数据的传输时延。NOMA在MEC中的实现可以采用传统NOMA上行数据传输技术,即基站根据用户的信道增益采用串行干扰消除(Serial Interference Cancellation, SIC)技术进行多用户解码^[9],最终获得每个终端上传的需要计算的数据信息。

NOMA技术与MEC在5G场景下结合能够满足新应用低时延、低能耗需求,因此有必要对它们进行结合。另外,NOMA技术的应用也面临一些实际问题,例如如何减少多用户共信道干扰,如何有效利用SIC技术,如何合理规划发射功率和资源分配权重因子等,这也是本文研究的重点之一。

近年来,NOMA技术在MEC中的应用受到了业界的广泛关注^[10-15]。文献^[10]研究了基于NOMA的MEC网络,考虑部分卸载和“0”“1”卸载两种决策的计算时延,研究了在多用户和单MEC服务器情况下最小化时延和能耗的加权和问题。文献^[11]研究了多天线NOMA系统下能耗最小化问题,通过优化发射功率、每个用户的卸载任务以及传输时间,实现系统能耗最小。文献^[12]研究了基于NOMA的MEC计算分流的能耗最小化问题,利用几何规划(Geometric Programming, GP)获得最优时间和传输功率。在考虑时延约束条件下,文献^[13]研究了基于NOMA的MEC网络增强时延受限的计算能

力,针对上行链路中给定的时延预算来最大化卸载任务的计算成功概率。文献^[14]研究了上行链路的能耗问题,提出一种基于边缘计算感知的NOMA技术,通过优化用户簇、发射功率以及通信和计算资源分配最小化MEC用户的能耗。在考虑物理层安全和用户保密中断概率基础上,文献^[15]研究了用户能耗加权和最小化问题。但是上述工作均未考虑远端基站的能耗问题,而且均未考虑如何平衡移动终端的传输能耗和计算能耗(移动终端和基站的计算总能耗),同时对于MEC网络中的安全性研究较少。

因此,针对以上问题,本文引入能耗权重因子,考虑存在窃听者的基于NOMA的MEC系统中,采用部分卸载方式在满足最大保密中断概率约束情况下,联合优化本地计算任务量、传输功率以及保密传输速率和能耗权重因子平衡基站与移动终端的能耗,实现系统能耗加权和最小。本文提出一种基于二分搜索的迭代优化算法解决加权能耗和最小化问题,并获得最优的任务卸载和传输功率。仿真结果表明,所提方案在实现安全节能方面接近没有窃听者存在的基准方案,且有效降低系统能耗。

2 系统模型

如图1所示,考虑由单个基站(集成MEC服务器)和 $K > 1$ 个用户组成的基于NOMA的MEC通信系统,其中 K 个用户在窃听者存在的情况下将计算任务安全部分卸载到MEC服务器中。

假设所有用户和基站均配备单根天线,用 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 表示第 k 个用户,无线信道采用准静态衰落信道模型^[16],保证信道在时延预算 T 内保持不变。每个用户 k 执行计算任务为 $L_k > 0$,根据NOMA技术原理,所有用户可同时向基站卸载各自的计算任务,每个用户的计算任务都可看作独立的子任务。定义 l_k 和 $L_k - l_k$ 分别为用户 k 的本地计算任务量和安全卸载到远端MEC服务器内执行的

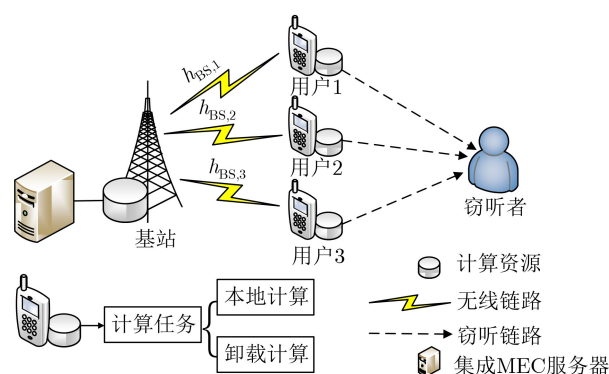


图1 系统模型

计算任务量,从用户 k 到基站和窃听者的信道系数分别用 $h_{BS,k}$ 和 $h_{e,k}$ 表示,同时考虑路径损耗和衰落效应,定义 $h_{BS,k} = d_{BS,k}^{-\alpha/2} g_{BS,k}$ 和 $h_{e,k} = d_{e,k}^{-\alpha/2} g_{e,k}$,其中 α 为路径损耗指数, $d_{BS,k}$ 和 $d_{e,k}$ 分别为用户 k 到基站和窃听者之间的距离, $g_{BS,k}, g_{e,k} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 分别表示瑞利衰落信道状态^[16],信道增益按大小排序为 $0 < |h_{BS,1}|^2 < |h_{BS,2}|^2 \dots < |h_{BS,K}|^2$ 。假设基站可获得每个用户的瞬时信道信息,而窃听者只能获得平均信道增益 $\mathbb{E}\{ |h_{e,k}|^2 \} = d_k^{-\alpha}$ ^[16,17]。

2.1 计算任务卸载时的传输能耗

尽管NOMA技术可以使基站能够同时服务多个用户^[18],但随着用户的增多,系统设计的复杂度也将增加,从而带来较大时延,降低了用户体验。另外,在LTE-A中关于NOMA技术标准中也把两用户作为典型应用场景^[19]。而且,文献^[3,12]等均考虑了两用户场景。因此,本文考虑了两用户的NOMA系统。根据上行NOMA机制,在基站和窃听者处接收的信号分别为^[3]

$$y_{BS} = \sum_{k=\{1,2\}} h_{BS,k} \sqrt{p_k} s_k + n_k \quad (1)$$

$$y_e = \sum_{k=\{1,2\}} h_{e,k} \sqrt{p_k} s_k + n_e \quad (2)$$

其中, p_k 表示用户 k 的发射功率, s_k 表示用户 k 在 $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$ 卸载的任务承载信号, n_k 和 n_e 分别是方差为 σ_{BS}^2 的基站处和方差为 σ_e^2 的窃听者处的零均值加性高斯白噪声,两个用户的信道状态信息满足 $|h_{BS,1}| < |h_{BS,2}|$,则基站处用户1和用户2信息的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)分别为

$$\text{SINR}_{BS,1} = \gamma_{BS,1} p_1 \quad (3)$$

$$\text{SINR}_{BS,2} = \frac{\gamma_{BS,2} p_2}{1 + \gamma_{BS,1} p_1} \quad (4)$$

其中, $\gamma_{BS,1} = \frac{|h_{BS,1}|^2}{\sigma_{BS}^2}$ 和 $\gamma_{BS,2} = \frac{|h_{BS,2}|^2}{\sigma_{BS}^2}$ 。

窃听者在 s_k 处接收到的SINR为

$$\text{SINR}_{e,k} = \gamma_{e,k} p_k, k \in \{1,2\} \quad (5)$$

其中, $\gamma_{e,k} = \frac{|h_{e,k}|^2}{\sigma_e^2}$ 。由于基站并不可能获取窃听者的各项性能和瞬时信道状态,所以为了保证所考虑系统的通信安全,本文假设在最坏情况下满足最大保密中断概率进行计算任务部分卸载^[15,21]。另外,引入冗余信息来提供存在窃听者时任务卸载的安全性,针对用户 k 在进行部分卸载计算任务时的两个速率参数^[22],即信息传输速率 $R_{t,k}$ 和保密传输

速率 $R_{s,k}$,其冗余信息速率 $R_{e,k} = R_{t,k} - R_{s,k}$ 。在用户进行计算任务部分卸载时,传输能耗可表示为

$$E_k^{\text{off}} = p_k T, k \in \{1,2\} \quad (6)$$

2.2 计算任务执行时的能耗

计算任务执行时的能耗包括两部分:移动终端执行的本地计算能耗和基站中MEC服务器中的边缘计算能耗。

(1)对于本地计算,定义 C_k^{loc} 为移动终端CPU处理每单位比特数据任务所需的循环周期, f_k^{loc} 为CPU循环频率,由于本地计算必须在时延预算 T 内完成,则本地计算任务时延限制为

$$\frac{C_k^{\text{loc}} l_k}{f_k^{\text{loc}}} \leq T \quad (7)$$

本文通过调整 l_k 保证本地任务计算的时间不超过时延预算。

根据文献^[18],本地计算能耗为

$$E_k^{\text{loc}} = \delta^{\text{loc}} \frac{C_k^{\text{loc}} l_k}{f_k^{\text{loc}}} \quad (8)$$

其中, δ^{loc} 为移动终端CPU能耗。

(2)对于卸载计算,剩余的计算任务卸载到远端MEC服务器进行计算,则计算时间为

$$T_k^{\text{off}} = \frac{C_k^{\text{ser}} (L_k - l_k)}{f_k^{\text{ser}}} \quad (9)$$

其中, C_k^{ser} 为MEC服务器CPU处理每单位比特数据所需的循环周期, f_k^{ser} 为CPU循环频率。因此,卸载计算的能耗为

$$E_k^{\text{ser}} = \delta^{\text{ser}} \frac{C_k^{\text{ser}} (L_k - l_k)}{f_k^{\text{ser}}} \quad (10)$$

其中, δ^{ser} 为MEC服务器CPU能耗。

执行所有计算任务的总能耗 E 可定义为

$$E = \sum_k E_k^{\text{loc}} + \sum_k E_k^{\text{ser}}, k \in \{1,2\} \quad (11)$$

2.3 保密中断概率

由于基站和用户不能获取准确的窃听者的瞬时信道状态,故引入保密中断概率 $P_{so,k}$ 来评价部分卸载时数据的安全性,可表示为

$$P_{so,k} = \mathbb{P}\{C_{e,k} > (R_{t,k} - R_{s,k})\}, \forall k \in \{1,2\} \quad (12)$$

其中, $C_{e,k} = \log_2(1 + \text{SINR}_{e,k})$ 表示窃听者获取 s_k 的信道容量。当窃听者的信道容量 $C_{e,k}$ 超过用户 k 的冗余信息速率 $R_{e,k} = R_{t,k} - R_{s,k}$ 时,用户传输任何消息时都会被窃听者解码,未能达到完全保密^[22]。

3 加权能耗和最小化问题的形成

本文的目标是在保密中断概率和时延约束情况

下，同时确保计算任务部分卸载的安全性，通过联合优化本地计算任务 l_k ，发射功率 p_k 以及保密传输速率 $R_{s,k}$ 最小化系统的加权能耗和，优化问题可表示为

$$P1: \min_{\mathbf{l}, \mathbf{p}, \mathbf{R}_{s,k}} \sum_{k=1,2} \eta_1 \times E_k^{\text{off}} + \eta \times E \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq p_k \leq p_k^{\text{max}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (13b)$$

$$0 \leq l_k \leq l_k^{\text{max}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (13c)$$

$$P_{\text{so},k} \leq \varepsilon, \forall k \in \{1, 2\} \quad (13d)$$

$$\frac{L_k - l_k}{BR_{s,k}} \leq \frac{l_k C_k^{\text{loc}}}{f_k^{\text{loc}}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (13e)$$

其中， B 表示信道带宽， $\mathbf{l} = [l_1, l_2]$ 表示本地计算任务向量， $\mathbf{p} = [p_1, p_2]$ 表示发射功率分配向量， $\mathbf{R}_{s,k} = [R_{s,1}, R_{s,2}]$ 表示保密传输数据向量， η 和 η_1 分别表示传输能耗和计算能耗的权重因子，文献[20,23]已经被证实可以显著平衡用户 k 的不同能耗，通过调整该权重因子弥补不同能耗之间的差异来对目标函数

进行优化。 $\varepsilon \in (0, 1)$ 表示保密中断概率最大容忍值， l_k^{max} 和 p_k^{max} 分别表示本地计算的最大数据量和发射功率最大值。约束式(13e)保证用户 k 能够在时延预算 T 和任何可能窃听者信道下安全地完成部分卸载。由于约束式(13d)和约束式(13e)的非凸性，问题式(13a)为非凸优化问题，因此对问题P1进行分析和转换寻找收敛良好的最优解，故本文提出一种基于二分搜索的迭代优化算法。

4 优化问题P1的求解

(1)问题P1中的决策变量 $\mathbf{l}, \mathbf{p}, \mathbf{R}_{s,k}$ 满足

$$R_{t,1} = \log_2(1 + \gamma_{\text{BS},1} p_1) \quad (14)$$

$$R_{t,2} = \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{\text{BS},2} p_2}{1 + \gamma_{\text{BS},1} p_1}\right) \quad (15)$$

$$\frac{L_k - l_k}{R_{s,k}} = \frac{l_k C_k^{\text{loc}}}{f_k^{\text{loc}}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (16)$$

将式(12)、式(14)、式(15)、式(16)代入式(13d)中得到两用户满足的保密中断概率^[16]

$$\begin{aligned} P_{\text{so},1} &= \mathbb{P}\{C_{e,1} > R_{t,1} - R_{s,1}\} \leq \varepsilon = \mathbb{P}\left\{\log_2(1 + \gamma_{e,1} p_1) > \log_2(1 + \gamma_{\text{BS},1} p_1) - \frac{(L_1 - l_1) f_1^{\text{loc}}}{l_1 C_1^{\text{loc}}}\right\} \leq \varepsilon \\ &= \mathbb{P}\left\{|h_{e,1}|^2 > \frac{\sigma_e^2 \left(1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1 - 2 \frac{(\frac{L_1}{l_1} - 1) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}\right)}{2 \frac{(\frac{L_1}{l_1} - 1) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} p_1}\right\} \leq \varepsilon \\ &= e^{-\frac{\sigma_e^2 d_{e,1}^\alpha}{2 \frac{(\frac{L_1}{l_1} - 1) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}} \left(\frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + 1 - 2 \frac{(\frac{L_1}{l_1} - 1) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} p_1\right)} \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{so},2} &= \mathbb{P}\{C_{e,2} > R_{t,2} - R_{s,2}\} \leq \varepsilon = \mathbb{P}\left\{\log_2(1 + \gamma_{e,2} p_2) > \log_2(1 + \gamma_{\text{BS},2} p_2) - \frac{(L_2 - l_2) f_2^{\text{loc}}}{l_2 C_2^{\text{loc}}}\right\} \leq \varepsilon \\ &= \mathbb{P}\left\{|h_{e,2}|^2 > \frac{\sigma_e^2 \left(1 + \frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_2 - 2 \frac{(\frac{L_2}{l_2} - 1) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}\right)}{2 \frac{(\frac{L_2}{l_2} - 1) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}} p_2}\right\} \leq \varepsilon \\ &= e^{-\frac{\sigma_e^2 d_{e,2}^\alpha}{2 \frac{(\frac{L_2}{l_2} - 1) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}} \left(\frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + 1 - 2 \frac{(\frac{L_2}{l_2} - 1) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}} p_2\right)} \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (17b)$$

对于式(17a)，根据文献[24]可知 $h_{e,k}$ 满足的概率密度函数为 $f_{|h_{e,k}|}(x) = d_{e,k}^\alpha e^{-d_{e,k}^\alpha x}$ ，故保密中断概率 $P_{\text{so},1}$ 满足

$$P_{\text{so},1} = \mathbb{P} \left\{ |h_{e,1}|^2 > \frac{\sigma_e^2 \left(1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1 - 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} \right)}{2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} p_1} \right\} = \int_0^{+\infty} d_{e,1}^\alpha e^{-d_{e,1}^\alpha x} dx$$

$$= -e^{-d_{e,1}^\alpha x} \Big|_0^{+\infty} \frac{\sigma_e^2 \left(1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1 - 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} \right)}{2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} p_1} = e^{-\left(-\frac{\sigma_e^2 d_{e,1}^\alpha}{2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} p_1} \left(\frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} \right) \right)} \quad (18)$$

同理可得用户2的保密中断概率形式 $P_{\text{so},2}$ 为式(17b), 对式(17a)和式(17b)进一步运算可转换为

$$\frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}}{p_1} \geq \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,1}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} \quad (19a)$$

$$\frac{\frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2}}{1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}}{p_2} \geq \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,2}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}} \quad (19b)$$

根据上述转换, 问题P1可描述为

$$\text{P2: } \min_{\mathbf{l}, \mathbf{p}, \mathbf{R}_{s,k}} \sum_{k=1,2} \eta_1 \times l_k p_k \frac{C_k^{\text{loc}}}{f_k^{\text{loc}}} + \eta$$

$$\times \left(\frac{\delta^{\text{loc}} C_k^{\text{loc}}}{f_k^{\text{loc}}} - \frac{\delta^{\text{ser}} C_k^{\text{ser}}}{f_k^{\text{ser}}} \right) l_k + \eta \times \frac{L_k C_k^{\text{ser}} \delta^{\text{ser}}}{f_k^{\text{ser}}} \quad (20a)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq p_k \leq p_k^{\text{max}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (20b)$$

$$0 \leq l_k \leq l_k^{\text{max}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (20c)$$

$$\frac{L_k - l_k}{R_{s,k}} = \frac{l_k C_k^{\text{loc}}}{f_k^{\text{loc}}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (20d)$$

$$\frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}}{p_1} \geq \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,1}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} \quad (20e)$$

$$\frac{\frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2}}{1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}}{p_2} \geq \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,2}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}} \quad (20f)$$

由于式(20e)和式(20f)的非凸性, 式(20)依然为

非凸优化问题, 为解决该问题, 本文首先对 $\mathbf{l} = [l_1, l_2]$ 进行二分法迭代搜索获取满足条件的最优 l_1^*, l_2^* , 而后利用式(20d)可获得闭合形式下的最优保密传输速率为

$$R_{s,k}^* = \frac{\left(\frac{L_k}{l_k^*} - 1\right) f_k^{\text{loc}}}{C_k^{\text{loc}}}, \forall k \in \{1, 2\} \quad (21)$$

最后结合式(20e)、式(20f)确定用户最优的发射功率为

$$p_1^* = \frac{2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1^*} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}} - 1}{\frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} - \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,1}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1^*} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}} \quad (22a)$$

$$p_2^* = \frac{2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2^*} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}} - 1}{\frac{\frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2}}{1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1} - \frac{\ln(\varepsilon^{-1})}{\sigma_e^2 d_{e,2}^\alpha} 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2^*} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}} \quad (22b)$$

$$\text{证明: 对式(22)令 } f(p_1) = \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_1}{l_1} - 1\right) f_1^{\text{loc}}}{C_1^{\text{loc}}}}{p_1}$$

$$\text{和 } f(p_2) = \frac{\frac{|h_{\text{BS},2}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2}}{1 + \frac{|h_{\text{BS},1}|^2}{\sigma_{\text{BS}}^2} p_1} + \frac{1 - 2 \frac{\left(\frac{L_2}{l_2} - 1\right) f_2^{\text{loc}}}{C_2^{\text{loc}}}}{p_2}, \text{ 经过计}$$

算可以发现 $f(p_1)$ 随着 p_1 的增大而增大, $f(p_2)$ 随着 p_1 的增大而减小, 随着 p_2 的增大而增大。因此, 当约束式(20d)可行时, 结合二分迭代搜索算法和式(22a)和式(22b)可以获得用户 k 最优的发射功率。故在考虑两个用户之间优先级的情况下, 通过

联合优化 l_k 和 p_k 可实现最小化用户1能耗的同时尽可能使用户2的能耗最小。通过二等分迭代计算本地计算比特 l_k ，直至两用户能耗加权和最小。证毕其算法流程如表1所示。

表1 问题P2的二等分迭代优化算法

初始化: $C_k^{\text{loc}}, C_k^{\text{ser}}, f_k^{\text{loc}}, f_k^{\text{ser}}, \delta_k^{\text{loc}}, \delta_k^{\text{ser}}, B, T, \alpha, \varepsilon, \gamma_{\text{BS},k}$, 迭代次数 $x, X_{\text{max}}, l_k^{\text{MIN}} = 0, l_k^{\text{MAX}} = 0.7L_k$, 精度 τ
(1) while $l_k^{\text{max}} - l_k^{\text{min}} \geq \tau$ do
定义 $l_1 = \frac{l_1^{\text{min}} + l_1^{\text{max}}}{2}$
根据式(21)计算 $R_{s,1}^*$
根据式(22a)计算 p_1^*
根据式(17a)计算 $P_{\text{so},1}$
if $P_{\text{so},1} \leq \varepsilon$
$l_1^{\text{MIN}} = l_1$
else
$l_1^{\text{MAX}} = l_1$
(2) until l_1 满足式(7)和 $x = X_{\text{max}}$
(3) $x = x + 1$
(4) while $l_k^{\text{max}} - l_k^{\text{min}} \geq \tau$ do
定义 $l_2 = \frac{l_2^{\text{min}} + l_2^{\text{max}}}{2}$
根据式(21)计算 $R_{s,2}^*$
根据式(22b)计算 p_2^*
根据式(17b)计算 $P_{\text{so},2}$
if $\frac{C_2^{\text{loc}} l_2}{f_2^{\text{loc}}} \leq T$
$l_2^{\text{min}} = l_2$
else
$l_2^{\text{max}} = l_2$
(5) until l_2 满足式(7)和 $x = X_{\text{max}}$
(6) $x = x + 1$
(7) end while

表1的计算复杂度主要来自满足最大保密概率的本地计算比特的二分法以及保密卸载速率，用户传输功率的计算，对于含有数据长度为 L_k 的传统二分法^[15]，复杂度为 $O(\log_2(L_k))$ 。因此与传统二分法类似，表1算法的总计算复杂度为 $2O(\log_2^2(X_{\text{max}}))$ 。

5 仿真结果分析

本文通过Matlab仿真平台评估所提出算法的性能，具体仿真参数如表2所示。为评估本文设计的NOMA-MEC部分保密卸载方案的有效性，以NOMA-MEC完全保密卸载计算、NOMA-MEC无窃听者部分卸载和OMA-MEC部分保密卸载的基准方案为对比对象，其中OMA-MEC部分保密卸载采

表2 仿真参数

参数	数值
任务计算比特 L_k	$0.5 \sim 2.5 \times 10^5$ bit
计算任务所需CPU周期 $C_k^{\text{loc}}, C_k^{\text{ser}}$	1000 cycles/bit
移动终端计算能力 f_k^{loc}	1.415 GHz
MEC服务器计算能力 f_k^{ser}	3.3 GHz
移动终端CPU每周期能耗 δ_k^{loc}	1.4265×10^{-4} W
MEC服务器CPU每周期能耗 δ_k^{ser}	5.6265×10^{-4} W
路径损耗指数 α	4
系统最大发射功率 p_k^{max}	0.1 W
能耗权重因子 η	10000 J/s
最大保密中断概率 ε	5%
用户 k 到基站的距离 $d_{\text{BS},k}$	60 m
用户 k 到窃听者的距离 $d_{e,k}$	100 m
噪声方差 $\sigma_{\text{BS}}^2, \sigma_e^2$	-105 dBm/Hz
系统带宽 B	1 MHz
时延预算 T	0.1 s

用TDMA协议进行部分卸载计算，将时延预算 T 分为两部分由两用户分别占用。

为确保对比公平性，所有仿真均采用准静态衰落信道。

图2显示了所提算法的收敛性。从仿真结果图中可以看出，本文所设计的NOMA-MEC部分保密卸载方案的能耗总是低于OMA-MEC部分保密卸载方案的能耗，并逼近无窃听者存在时的NOMA-MEC部分卸载方案的能耗，从而证明本文所提方案的优越性。与完全卸载方案相比，3种部分卸载方案实现更低的加权平均和能耗。对于部分卸载，随着迭代次数的增加，系统能耗基本趋于稳定，算法收敛。对于完全保密卸载方案，在卸载过程中以最大时延预算为卸载时延，由于不存在对本地计算任务的分配，其卸载计算量、保密卸载速率和功率消耗保持不变，故系统能耗与迭代次数无关，在每次迭代过程中保持相同的值。

图3显示了每个用户计算任务对系统能耗的影

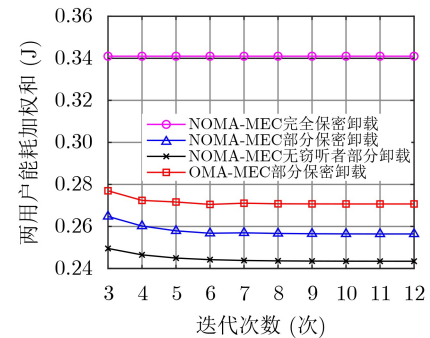


图2 两用户能耗加权和随迭代次数的变化关系

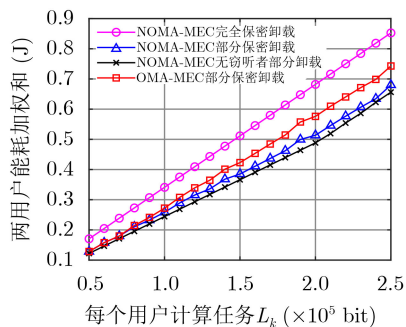


图3 两用户能耗加权和随每个用户计算任务的变化关系

响。图3可以看出，系统能耗随着计算任务的增加而线性增加，这是因为能耗函数是关于部分卸载计算任务的拟线性递增函数，同时用户计算任务与部分卸载计算任务存在线性关系，因此随着计算任务的增加能耗值也线性增加。另外与OMA-MEC部分保密卸载方案相比，NOMA-MEC保密部分卸载方案总能实现更低的系统能耗。在满足最大保密中断概率的情况下，通过有效的卸载和资源优化，使部分保密卸载的系统能耗逼近无窃听者部分卸载的系统能耗。

图4显示了两用户在NOMA-MEC部分保密卸载方案下计算能耗和卸载能耗随能耗权重因子比例的变化关系，从图4中可以看出，在给定 η 的情况下，权重因子主要影响卸载能耗，并且随着能耗权重因子比例的增大，卸载能耗逐渐趋于稳定。图5显示了不同能耗权重因子与系统能耗的关系。能耗包括传输能耗和计算能耗，结合图4的仿真结果，考虑传输能耗权重因子 $\eta_1 = \frac{\eta}{250}$ [20]，从图5可知，系统能耗随着权重因子的增加而线性增加，其原因在于能耗权重因子为常数，与能耗函数存在线性变换，该特性在文献[20]中已得到证实，故随着能耗权重因子的增加其目标函数也线性增加。同时可以发现完全保密卸载的能耗在任何情况下都高于另外3种方案，其中NOMA-MEC部分保密卸载能耗总是低于OMA-MEC部分保密卸载，也证明了本文所提算法的有效性。由于可以获得最优的发射功率，

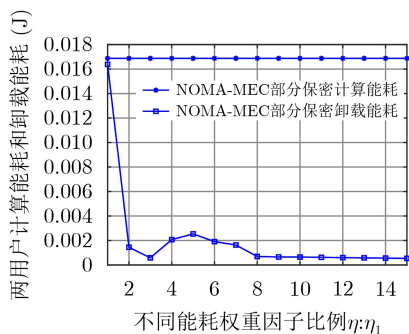


图4 两用户计算能耗和卸载能耗随能耗权重因子比例的变化关系

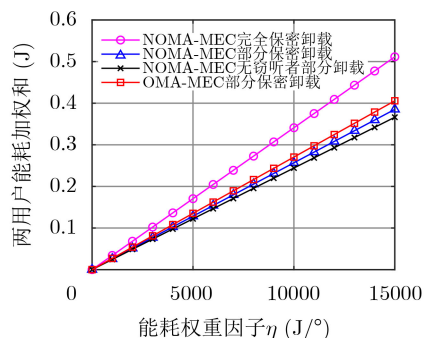


图5 两用户能耗加权和随能耗权重因子的变化关系

随着 η 的增加，NOMA-MEC部分保密卸载方案的性能得到显著提高。

6 结束语

本文研究了基于NOMA的MEC安全节能资源优化问题，设计了一种在保证最大保密中断概率约束的情况下，使两用户能够在同一时隙内成功将计算任务安全部分卸载到远端基站进行计算最小化两用户能耗加权和的方法，通过实验仿真表明本文提出的算法解决本地计算任务和发射功率分配问题的合理性，在未来的工作中将进一步研究在非完美信道情况下对任务卸载计算和资源分配的联合优化。

参考文献

- [1] ZENG Ming, HAO Wanming, DOBRE O A, *et al.* Delay minimization for massive MIMO assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6788–6792. doi: 10.1109/TVT.2020.2979434.
- [2] NING Bing, HAO Wanming, ZHANG Aihua, *et al.* Energy efficiency–delay tradeoff for a cooperative NOMA system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 732–735. doi: 10.1109/LCOMM.2019.2900320.
- [3] WANG Xinxin, WU Wei, LÜ Bin, *et al.* Delay minimization for secure NOMA mobile-edge computing[C]. 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT), Xi'an, China, 2019: 1529–1534. doi: 10.1109/ICCT46805.2019.8947270.
- [4] 唐伦, 肖娇, 赵国繁, 等. 基于能效的NOMA蜂窝车联网动态资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(2): 526–533. doi: 10.11999/JEIT190006.
- [5] TANG Lun, XIAO Jiao, ZHAO Guofan, *et al.* Energy efficiency based dynamic resource allocation algorithm for cellular vehicular based on non-orthogonal multiple access[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 526–533. doi: 10.11999/JEIT190006.
- [6] DING Zhiguo, LEI Xianfu, KARAGIANNIDIS G K, *et al.* A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 1–10.

- 2181–2195. doi: [10.1109/JSAC.2017.2725519](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519).
- [6] DING Zhiguo, FAN Pingzhi, and VINCENT POOR H. Impact of non-orthogonal multiple access on the offloading of mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(1): 375–390. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2870894](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2870894).
- [7] MAO Yuyi, YOU Changsheng, ZHANG Jun, *et al.* A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2322–2358. doi: [10.1109/COMST.2017.2745201](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2745201).
- [8] XIAO Zhu, DAI Xingxia, JIANG Hongbo *et al.* Vehicular task offloading via heat-aware MEC cooperation using game-theoretic method[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(3): 2038–2052. doi: [10.1109/JIOT.2019.2960631](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2960631).
- [9] FANG Sangsha, CHEN Hongyang, KHAN Z, *et al.* On the content delivery efficiency of NOMA assisted vehicular communication networks with delay constraints[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 847–850. doi: [10.1109/LWC.2020.2973138](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2973138).
- [10] WANG Feng, XU Jie, and DING Zhiguo. Multi-antenna NOMA for computation offloading in multiuser mobile edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2450–2463. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2881725](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2881725).
- [11] HUA Meihui, TIAN Hui, NI Wanli, *et al.* Energy efficient task offloading in NOMA-based mobile edge computing system[C]. 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Turkey, 2019: 1–7. doi: [10.1109/PIMRC.2019.8904347](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2019.8904347).
- [12] DING Zhiguo, XU Jie, DOBRE O A, *et al.* Joint power and time allocation for NOMA-MEC offloading[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6207–6211. doi: [10.1109/TVT.2019.2907253](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2907253).
- [13] YE Yinghui, HU R Q, LU Guangyue, *et al.* Enhance latency-constrained computation in MEC networks using uplink NOMA[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(4): 2409–2425. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2969666](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2969666).
- [14] KIANI A and ANSARI N. Edge computing aware NOMA for 5G networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 1299–1306. doi: [10.1109/JIOT.2018.2796542](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2796542).
- [15] WU Wei, ZHOU Fuhui, HU R Q, *et al.* Energy-efficient resource allocation for secure NOMA-enabled mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(1): 493–505. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2949994](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2949994).
- [16] HE Biao, LIU An, YANG Nan, *et al.* On the design of secure non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2196–2206. doi: [10.1109/JSAC.2017.2725698](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725698).
- [17] ZHENG Tongxing, WANG Huiming, and DENG Hao. Improving anti-eavesdropping ability without eavesdropper's CSI: A practical secure transmission design perspective[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(6): 946–949. doi: [10.1109/LWC.2018.2840152](https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2840152).
- [18] DING Zhiguo, YANG Zheng, FAN Pingzhi, *et al.* On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(12): 1501–1505. doi: [10.1109/LSP.2014.2343971](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2343971).
- [19] 3rd Generation Partnership Project. Study on downlink multiuser superposition transmission for LTE[R]. 3GPP TSG RAN #67. RP-150496, 2015.
- [20] LI Linfeng, KUANG Zhufang, and LIU Anfeng. Energy efficient and low delay partial offloading scheduling and power allocation for MEC[C]. 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2019.8761160](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761160).
- [21] SUN Yan, NG D W K, ZHU Jun, *et al.* Robust and secure resource allocation for full-duplex MISO multicarrier NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4119–4137. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2830325](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2830325).
- [22] ZHOU Xiangyun, MCKAY M R, MAHAM B, *et al.* Rethinking the secrecy outage formulation: A secure transmission design perspective[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(3): 302–304. doi: [10.1109/LCOMM.2011.011811.102433](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.011811.102433).
- [23] MAO Yuyi, ZHANG Jun, and LETAIEF K B. Joint task offloading scheduling and transmit power allocation for mobile-edge computing systems[C]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925615](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925615).
- [24] LIU Yuanwei, QIN Zhijin, ELKASHLAN M, *et al.* Enhancing the physical layer security of non-orthogonal multiple access in large-scale networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1656–1672. doi: [10.1109/TWC.2017.2650987](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2650987).
- 郝万明: 男, 1988年生, 讲师, 博士, 研究方向为毫米波、无线通信、NOMA、边缘缓存和无线携能通信等。
- 孙继威: 男, 1998年生, 硕士生, 研究方向为移动边缘计算、安全通信等。
- 孙钢灿: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为通信信号处理、通信信号关键参数盲估计、调制方式识别、机器人和智慧物流等。
- 朱政字: 男, 1988年生, 讲师, 博士, 研究方向为无线通信和信号处理、5G、物联网、机器学习、大规模MIMO、毫米波通信、无人机通信、物理层安全、无线协作网络、凸优化技术和携能传输等。
- 周一青: 女, 1975年生, 研究员, 研究方向为无线移动通信技术。