

# 无人机辅助边缘计算中安全通信与能效优化策略

余雪勇<sup>1,2</sup>, 邱礼翔<sup>1,2</sup>, 宋家宁<sup>1,2</sup>, 朱洪波<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 无人机的灵活移动性在移动边缘计算系统中引起了广泛的关注。然而, 空中窃听者的存在使它的安全传输仍然面对巨大的挑战。为了解决高安全通信速率与低能耗之间的矛盾, 引入安全通信能效这一概念, 即无人机安全通信传输速率与无人机能耗之间的比值。首先, 在满足给定任务时延、无人机的 CPU 计算频率以及任务卸载率的约束下, 提出一种最大化安全通信能效的卸载策略, 即联合优化合法无人机悬停位置、CPU 计算频率分配以及区分计算任务复杂度的卸载策略; 同时从物理层安全角度提升了无人机-移动边缘计算场景下的安全通信。其次, 由于该策略是一个复杂的非凸问题, 将其解耦为 3 个子问题, 通过块坐标下降法与连续凸逼近 (SCA) 相结合的全局优化算法来求解该非凸问题。仿真结果表明, 针对不同任务复杂度的系统, 所提策略都能在满足地面终端卸载需求的同时, 平衡整体的通信安全性能和能耗之间的关系, 并提高安全通信能效。

**关键词:** 移动边缘计算; 无人机安全通信; 能耗优化; 资源分配; 位置优化

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2023032

## Security communication and energy efficiency optimization strategy in UAV-aided edge computing

YU Xueyong<sup>1,2</sup>, QIU Lixiang<sup>1,2</sup>, SONG Jianing<sup>1,2</sup>, ZHU Hongbo<sup>1,2</sup>

1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** The flexible mobility of the unmanned aerial vehicle (UAV) has attracted widespread attention in the mobile edge computing (MEC) system. However, the existence of eavesdroppers in the air makes it a huge challenge for its secure transmission. In order to solve the contradiction between high safe communication rate and low energy consumption, the concept of security communication energy efficiency was introduced, that was, the ratio between UAV safe communication transmission rate and UAV energy consumption. Firstly, to subject the task delay constraint, limited UAV CPU frequency and task offloading rate constraint, an offloading strategy was proposed to maximize the energy efficiency of secure communication by jointly optimizing the legal UAV hover location, CPU frequency allocation and distinguishing the complexity of computing tasks, while improving the security communication in the UAV-MEC scenario from the perspective of physical layer security. Secondly, to address the non-convex optimization problem, it was decomposed into three sub-problems that were solved with block coordinate descent and the successive convex approximation (SCA) methods respectively. The simulation results show that, with different task complexity, the proposed strategy can balance the relationship between the overall secure communication performance and energy consumption, while meeting the offloading requirements of ground terminals. And then it improves secrecy energy efficiency.

**Keywords:** mobile edge computing, UAV secure communication, energy consumption optimization, resource allocation, location optimizing

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.92067201); 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No.BE2020084-4)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.92067201), The Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (No.BE2020084-4)

## 0 引言

随着移动终端设备的普及, 计算密集型业务对终端的计算能力和存储能力提出了很高的要求。鉴于此, 移动边缘计算 (MEC) 的提出在一定程度上解决了用户计算能力不足的问题。在靠近用户的移动核心网边缘的基站侧部署多个移动边缘计算服务器, 为用户业务提供就近的计算和处理服务, 大大减缓用户终端的计算压力<sup>[1]</sup>。

近年来, 无人机 (UAV) 以其在移动性和成本上的优势被应用到无线通信网络中<sup>[2]</sup>。UAV 可以用作移动中继辅助远距离相隔的用户进行信息交换, 也可以用作移动基站增强无线网络的覆盖范围。但由于其视线线路 (LoS, line of sight) 空对地无线链路, UAV 的发射信号更有可能被地面上大面积的可疑窃听器窃听到, 因此, UAV 通信面临着比传统地面通信系统更严重的安全问题。针对这一问题, 物理层安全技术被认为是保护无线通信免受窃听器攻击的一个可行的解决方案<sup>[3]</sup>。

基于此, 近年来许多学者对 UAV 辅助边缘计算隐私安全通信问题进行了研究。文献[4]构建了一个 UAV 辅助的无线中继系统, 为了增强系统的安全通信性能, 作者建模了一个非凸优化问题, 并采用了凸函数差规划的方式对其进行了处理, 推导了一个特定情况下的闭式解, 降低了算法的计算复杂度。文献[5]提出了一种新型的 UAV 协作方案, 研究了多跳移动中继系统的保密性能。UAV 分为中继 UAV 和干扰 UAV, 中继 UAV 负责从源到目的地的信息转发, 干扰 UAV 通过向窃听器引入主动干扰来增强合法链路的保密性能, 作者通过使用有效的迭代算法联合优化 UAV 轨迹和发射功率, 并提高了平均最小保密能效。文献[6]研究了具有空中窃听者的基于非正交多址接入 (NOMA) 的 UAV-MEC 的安全通信优化, 针对空中窃听器提出了一种安全通信方案, 通过优化服务无人机和用户之间不同信道关系系数分配、CPU 计算频率、发射功率、本地计算和服务无人机轨迹, 最大化了平均安全计算能力。文献[7]考虑了 UAV 和地面节点之间的信息传输安全, 为了提高系统的安全性能, 使用干扰 UAV 产生噪声信号来对窃听器进行干扰, 构建了最大化平均保密率问题, 通过连续凸逼近 (SCA) 法进行求解。文献[8]提出了一种用于提高无线移动中继系统安全性的迭代优化算法, 该算法优化了 UAV 辅

助的中继节点和源节点的发射功率以及 UAV 的飞行轨迹, 仿真结果显示, 该算法能够有效提升该无线通信系统的安全容量。文献[9]通过联合优化通信资源、计算资源和 UAV 的轨迹, 提出了时分多址 (TDMA) 和 NOMA 这 2 种方案的最小安全计算容量最大化问题, 采用块坐标下降法和惩罚块坐标下降法分别解决了 TDMA 和 NOMA 方案的问题。

上述研究中主要存在以下几点问题。

1) 在追求保密安全性能最大化的同时, 忽视了在此过程中的能耗。由于 UAV 自身资源有限, UAV 保密容量与其能耗之间是一种矛盾关系, 即要达到更大的保密容量, 必然要消耗更多的能量。这可能导致 UAV 在追求高保密数据量的情况下自身能耗急剧增大, 使整体系统能效降低。

2) 无论是全卸载策略, 还是二进制卸载策略, 用户终端的任务在同一时刻只能在本地或边缘侧执行。由于用户的本地计算资源不足, 任务只在本地进行计算并不合理。同时由于完全卸载产生的延迟问题、带宽浪费问题以及 UAV 自身电力有限, 数据只在 UAV 边缘侧进行处理也存在较大局限。

3) 缺乏对不同任务复杂度的讨论。在对终端数据进行卸载时, 均只考虑了任务的数据量。对于同样比特大小的任务, 其所花费的 CPU 频率数可能是不一样的, 不同的任务复杂度可能导致系统整体优化策略的改变, 因此对于任务复杂度也需要进行讨论。

针对上述问题, 本文研究了一种以最大化系统安全通信传输速率与合法 UAV 能耗的比值为目标的 UAV 辅助 MEC 系统, 在满足给定时延、MEC 服务器 CPU 计算频率以及卸载率等约束下, 提出了一种联合优化合法 UAV 的位置、CPU 计算频率分配以及计算任务的卸载策略, 从物理层安全角度提升了 UAV-MEC 场景下的安全通信能效。本文为了实现这一优化策略, 主要完成如下工作。

1) 在系统中建立了 UAV 的位置设计和任务卸载策略模型。假设用户终端任务可分割, 为了能灵活适应更一般的卸载场景, 本文考虑了终端本地计算、部分卸载以及全卸载相结合的卸载策略。同时针对系统中的时延需求, 进一步解决了用户卸载计算和本地计算不同步问题。

2) 构建了一种基于块坐标下降法和 SCA 相结合的全局优化算法。将上述最大化 UAV 安全通信

能效的优化问题解耦为3个子问题，引入松弛变量将非凸子问题近似为局部凸优化问题。

3) 讨论并分析了区分任务复杂度对系统整体卸载策略和联合优化问题的影响。通过仿真数据验证了该系统适用于不同复杂度的用户任务，并且都能在保证完成终端计算任务的同时，有效提升系统的安全通信能效。

## 1 系统模型

基于 UAV 辅助边缘计算中的安全通信与能效优化系统架构如图 1 所示，包括  $N$  个地面用户、 $E$  个窃听 UAV 和一个搭载边缘服务器的合法 UAV。用户和窃听 UAV 的集合分别用  $\mathcal{N}$  和  $\mathcal{E}$  表示。这里假设用户的位置是固定的，此外，合法 UAV 可以通过安装在 UAV 上的摄像头或合成孔径雷达 (SAR, synthetic aperture radar) 等设备来获取窃听节点和终端节点的位置信息<sup>[10-11]</sup>。不同窃听 UAV 之间不发生通信。UAV 沿用户上空飞行，并在沿途为用户提供边缘卸载服务。由于有限的本地计算能力和时延需求，用户可以采取本地计算、部分卸载以及全卸载 3 种卸载方式进行任务处理。当存在窃听 UAV 时，在全双工模式运行下的合法 UAV 搭载两根天线，其中一根接收天线用于接收来自卸载用户的卸载信号，另一根发射天线用于向窃听 UAV 发射干扰信号。用户和窃听 UAV 分别配备一根天线用于传输和窃听。本文考虑一个多址接入信道，所有用户可以使用同一个信道同时发送他们的信号<sup>[12-13]</sup>。对于合法 UAV 和窃听 UAV，通过将所有非卸载用户信号视为同信道干扰来解码当前卸载的用户信号。当合法 UAV 发射电磁波干扰附近的窃听者时，该电磁波也会也对自身进行干扰，产生自干扰信号。

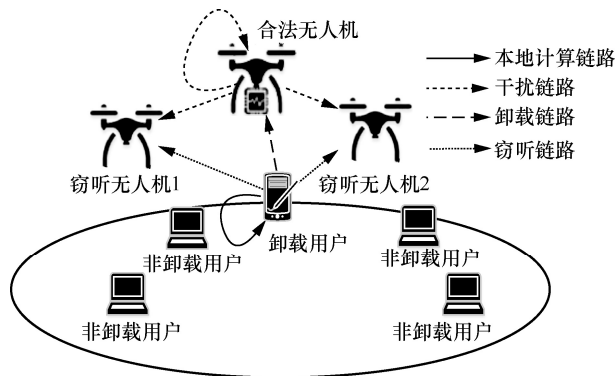


图 1 基于 UAV 辅助边缘计算中的安全通信与能效优化系统架构

### 1.1 通信模型

基于上述系统模型，第  $i$  个用户的位置表示为  $\mathbf{w}_i = (x_i, y_i)^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, \forall i \in \mathcal{N}$ ，合法 UAV 固定在地面以上的高度  $H_u$ ，其水平位置用  $\mathbf{q} = (x_u, y_u)^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  表示。对于空对地信道，假设通信中多普勒频移可以被接收端补偿，信道质量取决于 UAV 和用户之间的链路，由于 UAV 链路都为 LoS<sup>[14]</sup>，即信道增益服从自由空间损耗模型，则第  $i$  个用户和合法 UAV 之间的信道功率增益可以表示为

$$h_{iu} = \beta_1 d^{-2} = \frac{\beta_1}{H_u^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_i\|^2}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (1)$$

其中， $d$  表示系统中各终端之间的欧氏距离；

$\beta_1 = g_t g_r \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2$  表示参考距离  $d_0 = 1$  m 时传输功率为 1 W 的接收功率， $g_t$  和  $g_r$  分别表示用户天线的传输增益和 UAV 天线的接收增益， $\lambda$  表示传输信号波长。

假设第  $e$  个窃听 UAV 位于固定高度  $H_e$ ，水平坐标  $\mathbf{v}_e = (x_e, y_e)^T \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, \forall e \in \mathcal{E}$ 。由于在合法的 UAV 上  $\mathbf{v}_e$  是完全已知的，从第  $i$  个用户到第  $e$  个窃听 UAV 之间的信道增益可以表示为

$$h_{ie} = \beta_1 d^{-2} = \frac{\beta_1}{H_e^2 + \|\mathbf{w}_i - \mathbf{v}_e\|^2}, \forall i \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (2)$$

类似地，在合法和窃听 UAV 之间的空中信道，窃听 UAV 和合法 UAV 之间的信道功率增益可以表示为

$$h_{eu} = \beta_2 d^{-2} = \frac{\beta_2}{(H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (3)$$

其中， $\beta_2 = g_r g_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2$  是参考距离  $d_0 = 1$  m 时合法 UAV 和窃听 UAV 间的信道增益。

假设用户终端的任务可以被分割，用户在进行本地计算或者任务卸载时，将变量  $\xi_i = [0, 1], \forall i \in \mathcal{N}$  定义为用户与合法 UAV 建立卸载连接时的卸载系数。UAV 和用户可根据自身计算资源来共同决定该卸载系数大小。当用户自身的计算任务满足本地计算时延要求时，用户可选择卸载计算或本地计算。本文默认执行全部本地计算的用户（即  $\xi_i = 0$ ）不存在信息被窃取的问题，即信息安全问题只发生在卸载过程中。当第  $i$  个用户将计算任务卸载到合法

UAV 时, 用户  $i$  和 UAV 以 bit/(s·Hz) 为单位的上行链路传输速率可以表示为

$$r_{iu} = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_i h_{iu}}{\gamma p_{\text{jam}} + \sigma^2} \right), \forall i \in \mathcal{N} \quad (4)$$

其中,  $p_i$  为第  $i$  个用户的发射功率,  $\sigma^2$  为噪声功率,  $\gamma$  为自干扰系数,  $p_{\text{jam}}$  为合法 UAV 发射电磁波干扰窃听 UAV 的功率, 这会导致合法 UAV 自身产生  $\gamma p_{\text{jam}}$  的自干扰噪声信号。

同理, 用户和窃听 UAV 之间以 bit/(s·Hz) 为单位的上行链路传输速率可以表示为

$$r_{ie} = \text{lb} \left( 1 + \frac{p_i h_{ie}}{p_{\text{jam}} h_{eu} + \sigma^2} \right), \forall i \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (5)$$

因此, 在任务卸载过程中产生的系统保密容量问题可以表示为

$$R_i^{\text{sec}} = [r_{iu} - r_{ie}^{\text{ub}}]^+, \forall i \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (6)$$

其中,  $r_{ie}^{\text{ub}}$  表示窃听 UAV 中窃听第  $i$  个用户的最大传输速率,  $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$ 。

### 1.2 计算时延模型

定义第  $i$  个用户所需要执行的任务数据量大小为  $D_i$ , 任务复杂度为  $C_i$ , 即执行每比特数据量所需要的 CPU 周期频率数, 这里假设每个用户的计算任务都需要在  $T$  时间内完成, 信道中每个用户的传输带宽为  $B$ 。无法满足本地计算时延要求的用户必须将任务卸载到合法 UAV 搭载的边缘服务器。终端用户数据的整个计算过程可分为本地计算、部分卸载和全卸载 3 种模式。因此, 用户卸载到合法 UAV 的任务数据量为  $\xi_i D_i$ , 用户本地计算的任务数据量为  $(1 - \xi_i) D_i$ 。由于经过合法 UAV 计算后的数据返回给用户的数据量相比卸载输入数据的数据量非常小, 因此本文中由 UAV 回传给用户的时延可以忽略不计<sup>[15]</sup>。

由上述分析, 用户本地计算时延可以表示为

$$T_i^{\text{loc}} = (1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (7)$$

其中,  $f_0$  是用户本地的计算频率, 默认每个用户本地的 CPU 计算频率均相同。

用户任务卸载到 UAV 的时延可以表示为

$$T_i^{\text{ul}} = \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (8)$$

UAV 边缘服务器执行用户任务的计算产生的时延为

$$T_i^{\text{c}} = \frac{\xi_i C_i D_i}{f_{iu}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (9)$$

其中,  $f_{iu}$  表示合法 UAV 分配给用户  $i$  的计算频率。UAV 的计算功率为

$$P_i^{\text{c}} = \epsilon f_{iu}^3, \forall i \in \mathcal{N} \quad (10)$$

其中,  $\epsilon$  为功率消耗系数, 它的值取决于 UAV 边缘服务器的 CPU 芯片结构<sup>[16]</sup>。

### 1.3 能耗模型

由上述通信和计算时延模型分析可知, 在执行用户卸载数据时, 合法 UAV 产生的能耗包括 3 个方面: 发射电磁波干扰窃听器产生的干扰能耗、接收用户卸载数据过程中产生的通信能耗以及计算用户卸载数据产生的计算能耗。由于合法 UAV 只有在接收卸载数据时才会产生干扰能耗, 则 UAV 发射电磁波产生的干扰能耗可以表示为

$$E_i^{\text{jam}} = p_{\text{jam}} T_i^{\text{ul}} = \frac{\xi_i D_i p_{\text{jam}}}{B r_{iu}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (11)$$

设  $p_u$  为合法 UAV 接收用户卸载数据的功率, 则合法 UAV 接收用户卸载数据过程中产生的通信传输功耗可以表示为

$$E_i^{\text{ul}} = p_u T_i^{\text{ul}} = \frac{\xi_i D_i p_u}{B r_{iu}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (12)$$

类似地, 执行用户卸载数据的合法 UAV 产生的计算能耗可以表示为

$$E_i^{\text{c}} = p_i^{\text{c}} T_i^{\text{c}} = \epsilon \xi_i D_i C_i (f_{iu})^2, \forall i \in \mathcal{N} \quad (13)$$

UAV 处理用户卸载数据所产生的能耗总和为

$$E_i = E_i^{\text{jam}} + E_i^{\text{ul}} + E_i^{\text{c}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (14)$$

### 1.4 描述问题

由于用户任务时延受限, 分配的计算任务必须要在时间  $T$  内完成, 因此时延约束可以表示为

$$0 \leq T_i^{\text{loc}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \quad (15)$$

$$T_i^{\text{loc}} + T_i^{\text{ul}} + T_i^{\text{c}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \quad (16)$$

并且合法 UAV 的 CPU 计算频率有限, 则分配给用户的卸载数据需满足

$$\sum_{i=1}^N f_{iu} \leq f_{\text{max}}^{\text{UAV}}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (17)$$

本文采用本地计算、部分卸载和全卸载相结合

的策略,通过联合优化 UAV 的位置  $\mathbf{q}$ 、用户卸载率  $\xi$  以及分配的频率  $\mathbf{f}$  来最大化 UAV 的安全通信能效。

基于上述分析,将安全通信能效定义为安全数据传输速率与 UAV 能耗的比值

$$\eta = \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{R_i^{\text{sec}}}{E_i} = \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{r_{iu} - r_{ie}^{\text{ub}}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B r_{iu}} + \epsilon C_i (f_{iu})^2 \right]} \quad (18)$$

则优化问题可以被建模成问题 P1

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\mathbf{q}, \xi, \mathbf{f}} \eta \\ \text{s.t. } & \text{C1: } \xi_i \in [0, 1], \forall i \in \mathcal{N} \\ & \text{C2: } 0 \leq T_i^{\text{loc}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \\ & \text{C3: } T_i^{\text{loc}} + T_i^{\text{ul}} + T_i^c \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \\ & \text{C4: } \sum_{i=1}^N f_{iu} \leq f_{\text{max}}^{\text{UAV}}, \forall i \in \mathcal{N} \\ & \text{C5: } f_{iu} \geq 0, \forall i \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, C1 表示卸载系数, C2 表示本地计算模式下任务需要满足的时延约束, C3 表示在 MEC 卸载模式下用户任务需要保证在总时延  $T$  内完成, C4 表示总共分配的频率应该保证在 UAV 的 CPU 总频率范围内, C5 表示合法 UAV 分配的频率应该是非负的。

## 2 优化过程

由于问题 P1 的目标函数存在 3 个优化变量的耦合,即合法 UAV 位置、卸载系数和 CPU 计算频率,表示为  $(\mathbf{q}, \xi, \mathbf{f})$ , 并且约束 C3 非凸,因此该问题是非凸的,难以利用传统凸优化技术直接求解。文献[17]提出了一种块坐标下降法,其在解决优化问题时,一次只更新一个或几个变量块,通过交替优化 3 个子问题来迭代求解获得原问题的一个近似解。相对于一次更新所有变量块复杂度要低得多,基于该思想,本文采用一种基于 SCA 和块坐标下降法相结合的算法对问题 P1 进行求解。

将目标问题解耦为 3 个子问题来进行求解,首先,采用基于一阶泰勒展开的 SCA 连续凸逼近技术来优化合法 UAV 位置;其次,对于其他的子问题(如频率分配子问题和用户任务卸载率子问题),通过对其求二次导,可验证其满足凸函数关系,采用一般的凸优化技术可进行求解;最后,采用基于块坐标下降法进行全局优化,即可求解系统最大安全通信能效。

### 2.1 合法 UAV 位置优化子问题

固定用户卸载率  $\xi$  和合法 UAV 分配的频率  $\mathbf{f}$ , 则合法 UAV 位置优化子问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{q}} \eta &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{R_i^{\text{sec}}}{E_i} = \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{r_{iu} - r_{ie}^{\text{ub}}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B r_{iu}} + \epsilon F_i (f_{iu})^2 \right]} \\ \text{s.t. } & \text{C3: } (1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0} + \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}} + \frac{\xi_i D_i C_i}{f_{iu}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (20)$$

可以看出,问题 P1 中的其他变量约束和该子问题是不相关的。由于  $\frac{\partial^2 \eta}{\partial \mathbf{q}^2}$  不恒小于或等于 0,因此该目标问题仍是非凸的。非凸性主要是由变量  $r_{iu}$  和  $r_{ie}^{\text{ub}}$  引起的,故在这里引入辅助变量  $\phi_{iu}$  和  $\varepsilon_{ie}$  将变量  $r_{iu}$  和  $r_{ie}^{\text{ub}}$  松弛为

$$0 \leq \phi_{iu} \leq r_{iu}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (21)$$

$$\varepsilon_{ie} \geq r_{ie}^{\text{ub}}, \forall i \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (22)$$

其中,  $\phi_{iu}$  是  $r_{iu}$  的下界,  $\varepsilon_{ie}$  是  $r_{ie}^{\text{ub}}$  的上界,故该目标问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{q}, \phi_{iu}, \varepsilon_{ie}} \eta &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{\phi_{iu} - \varepsilon_{ie}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B \phi_{iu}} + \epsilon C_i (f_{iu})^2 \right]} \\ \text{s.t. } & \text{C3: } (1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0} + \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}} + \frac{\xi_i D_i C_i}{f_{iu}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \\ & \text{C6: } 0 \leq \phi_{iu} \leq r_{iu} \\ & \text{C7: } \varepsilon_{ie} \geq r_{ie}^{\text{ub}} \end{aligned} \quad (23)$$

引入松弛变量后,目标函数变为局部凸函数形式,但是约束 C6 和 C7 仍然是非凸的,其原因是  $r_{iu}$  和  $r_{ie}^{\text{ub}}$  关于合法 UAV 位置  $\mathbf{q}$  是非凸的。考虑到  $r_{iu}$  关于  $\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_i\|^2$  是凸的,  $r_{ie}^{\text{ub}}$  关于  $\|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2$  是凸的,故这里采用 SCA 技术重新对约束 C6 和 C7 进行表示

$$\begin{aligned} \phi_{iu} \leq r_{iu} &= \text{lb} \left( \frac{p_i h_{iu}}{\gamma p_{\text{jam}} + \delta^2} + 1 \right) = \\ & \text{lb} \left( \frac{p_i h_{iu} + \gamma p_{\text{jam}} + \delta^2}{\gamma p_{\text{jam}} + \delta^2} \right) = \\ & \text{lb} \left( \frac{\beta_1 p_i}{H_u^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{w}_i\|^2} + \gamma p_{\text{jam}} + \delta^2 \right) - \\ & \text{lb}(\gamma p_{\text{jam}} + \delta^2) = L_1 - \text{lb}(\gamma p_{\text{jam}} + \delta^2) \end{aligned} \quad (24)$$

其中,  $L_1$  是第  $m$  次迭代中合法 UAV 位置  $\mathbf{q}[m]$  的一

阶泰勒展开下界表达式, 即

$$L_1 = \text{lb} \left( \frac{\beta_1 p_i}{H_u^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{w}_i\|^2} + \gamma p_{\text{jam}} + \delta^2 \right) - \frac{\beta_1 p_i}{(H_u^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{w}_i\|^2)^2} \cdot \frac{\|\mathbf{q} - \mathbf{w}_i\|^2 - \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{w}_i\|^2}{\ln 2 \left( \frac{\beta_1 p_i}{H_u^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{w}_i\|^2} + \gamma p_{\text{jam}} + \delta^2 \right)} \quad (25)$$

类似地, 局部凸化  $\varepsilon_{ie}$

$$\varepsilon_{ie} \leq r_{ie}^{\text{ub}} = \text{lb} \left( \frac{p_i h_{ie}}{p_{\text{jam}} h_{eu}} + 1 \right) = \text{lb} \left( \frac{p_i h_{ie} + p_{\text{jam}} h_{eu} + \delta^2}{h_{eu} p_{\text{jam}} + \delta^2} \right) = \text{lb} \left( \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{(H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2} + p_i h_{ie} + \delta^2 \right) - \text{lb} (p_{\text{jam}} h_{eu} + \delta^2) = L_2 - L_3 \quad (26)$$

利用 SCA 技术,  $L_2$  也可表示为第  $m$  次迭代中合法 UAV 位置  $\mathbf{q}[m]$  的一阶泰勒展开下界

$$L_2 = \text{lb} \left( \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{(H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2} + p_i h_{ie} + \delta^2 \right) - \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{\left[ (H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2 \right]^2} \cdot \frac{\|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2 - \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2}{\ln 2 \left( \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{(H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2} + p_i h_{ie} + \delta^2 \right)} \quad (27)$$

同理, 为了凸化  $L_3$ , 引入辅助变量  $\lambda_e \leq \|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2$

$$L_3 = \text{lb} \left( \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{(H_u - H_e)^2 + \|\mathbf{q} - \mathbf{v}_e\|^2} + \delta^2 \right) = \text{lb} \left( \frac{\beta_2 p_{\text{jam}}}{(H_u - H_e)^2 + \lambda_e} + \delta^2 \right) \quad (28)$$

其中,  $\lambda_e$  满足

$$\lambda_e \leq \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2 + 2(\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e)^T (\mathbf{q} - \mathbf{q}[m]), \forall e \in \mathcal{E} \quad (29)$$

因此 UAV 位置规划问题变为求解以下问题

$$\begin{aligned} \text{P1.1: } \max_{\mathbf{q}, \phi_{iu}, \varepsilon_{ie}} \eta &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{\phi_{iu} - \varepsilon_{ie}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B \phi_{iu}} + \varepsilon C_i (f_{iu})^2 \right]} \\ \text{s.t. C3: } &(1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0} + \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}} + \frac{\xi_i D_i C_i}{f_{iu}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C8: } &\phi_{iu} + \text{lb}(\gamma p_{\text{jam}} + \delta^2) \leq L_1, \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C9: } &\varepsilon_{ie} \leq L_2 - L_3, \forall i \in \mathcal{N}, \forall e \in \mathcal{E} \\ \text{C10: } &\lambda_e \leq \|\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e\|^2 + 2(\mathbf{q}[m] - \mathbf{v}_e)^T (\mathbf{q} - \mathbf{q}[m]), \forall e \in \mathcal{E} \end{aligned} \quad (30)$$

由于问题式(30)是凸问题, 本文可以利用 CVX 工具<sup>[18]</sup>, 通过标准凸优化技术进行求解, 得到第  $m$  次迭代时 UAV 位置  $\mathbf{q}[m]$  的局部最优解。

### 2.2 UAV 频率分配子问题

以问题 P1.1 中解得的 UAV 位置局部最优解为基础, 对于任意给定的卸载率  $\xi$ , 问题 P1 可以转化为

$$\begin{aligned} \max_f \eta &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{R_i^{\text{sec}}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B r_{iu}} + \varepsilon C_i (f_{iu})^2 \right]} \\ \text{s.t. C3: } &(1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0} + \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}} + \frac{\xi_i D_i C_i}{f_{iu}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \\ &\text{C4, C5} \end{aligned} \quad (31)$$

问题 P1 中只有约束条件 C3~C5 对其频率分配有影响。故根据块坐标下降法思想, 在其他变量均为定值时, 求解该目标问题最大值问题可以等价于求解以下问题

$$\begin{aligned} \text{P1.2: } \max_f \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{1}{(f_{iu})^2} \\ \text{s.t. } &\text{C3, C4, C5} \end{aligned} \quad (32)$$

由于目标函数和约束条件均为凸函数, 同样可以利用 CVX 工具, 通过标准凸优化算法进行求解, 得到当前迭代次数下的 UAV 频率分配局部最优解。

### 2.3 卸载率子问题

以上述子问题解得的 UAV 位置局部最优解以及 UAV 频率分配为基础, 问题 P1 可以转化为

$$\begin{aligned} \text{P1.3: } \max_{\xi} \eta &= \sum_{i \in \mathcal{N}} \frac{R_i^{\text{sec}}}{\xi_i D_i \left[ \frac{p_{\text{jam}} + p_u}{B r_{iu}} + \varepsilon C_i (f_{iu})^2 \right]} \\ \text{s.t. C1: } &\xi_i \in [0, 1], \forall i \in \mathcal{N} \\ \text{C3: } &(1 - \xi_i) \frac{D_i C_i}{f_0} + \frac{\xi_i D_i}{B r_{iu}} + \frac{\xi_i D_i C_i}{f_{iu}} \leq T, \forall i \in \mathcal{N} \end{aligned} \quad (33)$$

当其他变量为固定值时，求解该问题最大值等价于求卸载率  $\xi_i$  最小值问题。而  $\xi_i$  又由系统最大时延决定<sup>[19]</sup>，故由约束 C1 与 C3 可得

$$\xi_i = \min \left\{ \frac{Br_{iu}f_{iu}(Tf_0 - D_iC_i)}{D_i(f_0f_{iu} - C_iBr_{iu}f_{iu} + f_0C_iBr_{iu})}, 1 \right\} \quad (34)$$

利用块坐标下降法可对上述子问题进行迭代求解。

## 2.4 算法设计及复杂度分析

基于上述对 P1 问题的分解与局部凸近似处理，利用块坐标下降法可以进行全局优化，具体的迭代过程如算法 1 所示。

**算法 1** 基于块坐标下降的三阶段迭代优化算法

**初始化** 当前迭代次数  $m=0$ ，迭代精度  $\kappa$  以及优化变量初值  $q[m], f[m], \xi[m]$

开始迭代

1) 给定第  $m$  次迭代优化变量初始值  $f[m], \xi[m]$ ，根据子问题 P1.1 得到优化的 UAV 位置  $q[m+1]$

2) 给定  $q[m+1], \xi[m]$ ，根据子问题 P1.2 得到优化的 UAV 频率分配  $f[m+1]$

3) 给定  $q[m+1], f[m+1]$ ，根据子问题 P1.3 得到优化的卸载率  $\xi[m+1]$

4) 将  $q[m+1], f[m+1], \xi[m+1]$  代入目标函数，得到  $\eta[m+1]$

5) 更新  $m=m+1$ ，返回步骤 1)

6) 目标函数  $\eta[m]$  收敛，收敛条件  $\|\eta[m+1] - \eta[m]\| < \kappa$

算法 1 的复杂度主要来自 3 个方面：第一，合法 UAV 的 CPU 频率分配和卸载率的计算；第二，UAV 最大安全通信能效的计算；第三，解决 P1.1、P1.2 和 P1.3 问题的 CVX 法。令  $L_1$  和  $L_2$  分别表示算法 1 外层循环和内层循环迭代数， $l_1$  表示块坐标法的容错精度，由文献[20-22]可知，若用户数量为  $K$ ，用户的任务复杂度为  $N$ ，则第一次迭代的复杂度为  $K2^N + KN^{3.5}$ ，第二次和第三次迭代的任务复杂度为  $KN$ 。故算法 1 的总任务复杂度为  $O\left[L_1\left(KN + \frac{1}{l_1^2} + L_2(K2^N + KN^{3.5})\right)\right]$ ，其中， $O(\cdot)$  表示“大 O 表示法”<sup>[23]</sup>。

## 3 实验条件

本节利用 MATLAB R2019a 进行仿真实验，实验设备 CPU 为 Intel Core i5-9500T，内存为 16.0 GB，

所采用的算法收敛阈值  $\kappa=10^{-2}$ 。

本文的仿真环境参数参考文献[24]进行设置，在开阔无障碍的环境中设置  $N=5$  个用户和  $\varepsilon=2$  个窃听 UAV 分布在  $400\text{ m} \times 400\text{ m}$  的正方形区域，合法 UAV 和窃听 UAV 有着固定高度，其中， $H_u=120\text{ m}$ 、 $H_{e1}=110\text{ m}$  以及  $H_{e2}=130\text{ m}$ ，假设各个用户的任务量  $D_i$  服从均匀分布，即  $D_i \sim U[20, 50]$  kbit，用户 1~用户 5 的任务量分别设置为  $[20, 25, 30, 40, 50]$  kbit。本文设置了 2 种任务复杂度  $C$  进行讨论，分别为 500 cycle/bit 和 1 200 cycle/bit，每个用户的任务时延  $T=0.1\text{ s}$ ，用户计算频率  $f_0=200\text{ MHz}$ 。其他仿真参数如表 1 所示。

表 1		仿真参数	
参数	数值	参数	数值
$B / \text{MHz}$	1	$\delta^2 / \text{dBm}$	-110
$\beta_1$	$10^{-5}$	$\beta_2$	$10^{-4}$
$\epsilon$	$10^{-27}$	$\gamma$	$10^{-11}$
$p_{\text{jam}} / \text{W}$	0.2	$p_i / \text{W}$	$10^{-2}$
$f_{\text{max}}^{\text{UAV}} / \text{MHz}$	2 000	$p_u / \text{W}$	0.2

本文参考文献[24]中的仿真场景，将所提的安全通信能效策略与其他基准方案进行了性能比较。基准方案主要包括以下 3 种。

1) 固定 UAV 悬停位置。将合法 UAV 位置设置为所有用户的质心，并使用算法 1 优化其他所有变量。

2) 合法 UAV 不发射干扰信号，即无干扰功率。该方案令  $p_{\text{jam}}=0$ ，并且其他所有变量使用算法 1 进行优化。

3) 固定卸载率。设置  $\xi_i=0.5$ ， $f_{iu} = \frac{f_{\text{max}}^{\text{UAV}}}{N}$ ， $\forall i \in \mathcal{N}$ ，并且其他所有变量使用算法 1 进行优化。

## 4 仿真分析

当  $T=0.1\text{ s}$  时，不同通信功率下系统安全通信能效优化过程如图 2 所示。由算法 1 可知，基于块坐标下降的迭代优化算法的终止条件为迭代得到的系统安全能效差值小于阈值  $\kappa$ 。由图 2 可知，随着合法 UAV 通信功率的增大，系统最大的安全通信能效趋于收敛所需的迭代次数不断减小。这是因为随着通信功率  $p_u$  的增大，合法 UAV 可以接收更多用户的卸载数据，相比之下会有更少的数据量被窃听。此外，从图 2 中还可以观察到，随着 UAV 通信功率成倍增加，最大安全通信能效并不会一直增加，最终也会趋于稳定，这也进

一步验证了香农公式中功率与信道容量的关系。特别地,当曲线趋于收敛时,通信功率  $p_u$  从 0.2 W 依次增加到 0.4 W、0.8 W 和 1.6 W 时,相较于  $p_u$  从 0.1 W 增加到 0.2 W,系统安全能效分别提升了 66%、43%和 21%。可见,无限制增加 UAV 的通信功率并不能使系统最大安全通信能效持续增加。另外,从整个收敛过程来看,基于块坐标下降的迭代优化算法能够实现合法 UAV 最大安全通信能效的快速提升,并在有限迭代次数内达到数值收敛,收敛速度较快,具备实用意义。

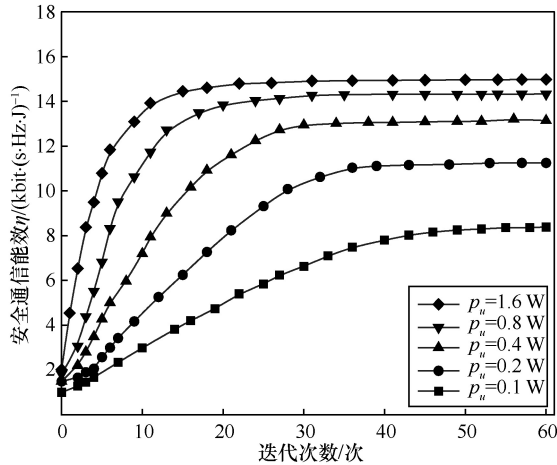


图 2 不同通信功率下系统安全通信能效优化过程

$T=0.1$  s 时 UAV 的飞行位置如图 3 所示。UAV 从起点用户 1 附近出发,依次服务完其他用户后再返回起点。用户 1~用户 5 的数据量依次递增,不难看出,对于数据量越大的用户,UAV 的位置就相对密集。这是因为用户的数据量越大,UAV 就会停留更长的时间去处理用户的数据,所以在单位时间内在该用户附近将会采样到更多的位置点。另外,当 UAV 服务用户时,UAV 会更倾向于靠近用户,同时也会增强对窃听 UAV 的干扰,为数据卸载提供更好的信道条件。其次,结合图 4 中的联合优化下各用户卸载数据比例也可看出,除固定 UAV 悬停位置外的其他方案,合法 UAV 均不会在用户 1 附近停留。这是因为用户 1 数据量相对较小,在给定时延内用户自身在本地能够完成计算任务。此外,从图 3 中也可看出,所提方案中 UAV 的路程优于其他方案的路程,尤其是对比无干扰功率方案,即有更短的飞行路程,这也会减小由飞行带来的能耗损失。

图 4 和图 5 分别绘制了任务复杂度  $C=500$  cycle/bit 和  $C=1200$  cycle/bit 时 UAV 最大安全能效与用户数据量的关系。可以观察到,随着用户数据量的增多,为了在给定时延内完成计算任务,用户会更多地向

合法 UAV 卸载数据,与此同时,随着卸载数据量的增多,也会导致被窃听 UAV 窃听更多的数据量,因此随着用户卸载数据量比例的增加,系统安全通信能效也在减小。

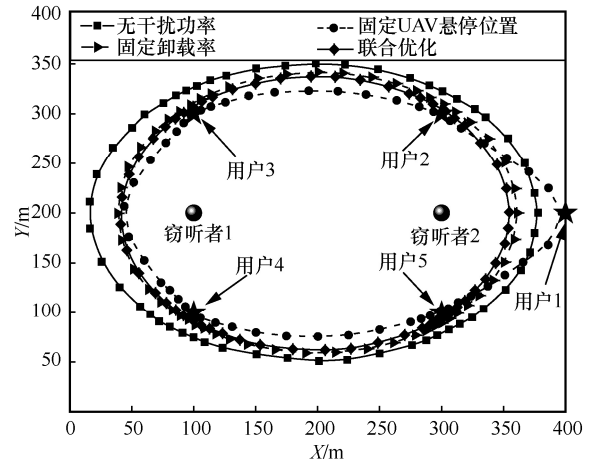


图 3  $T=0.1$  s 时 UAV 的飞行位置

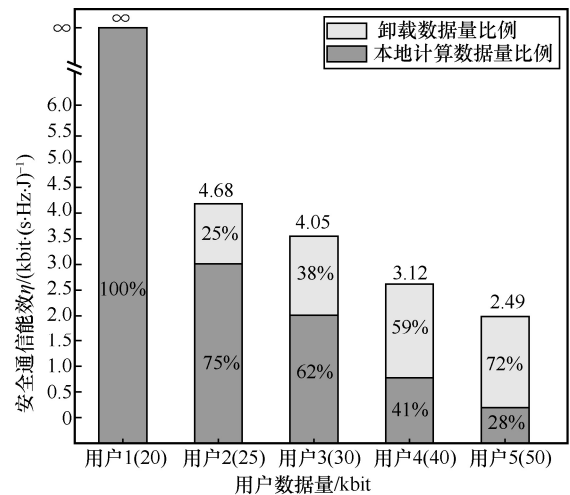


图 4  $C=500$  cycle/bit 时 UAV 最大安全能效与用户数据量的关系

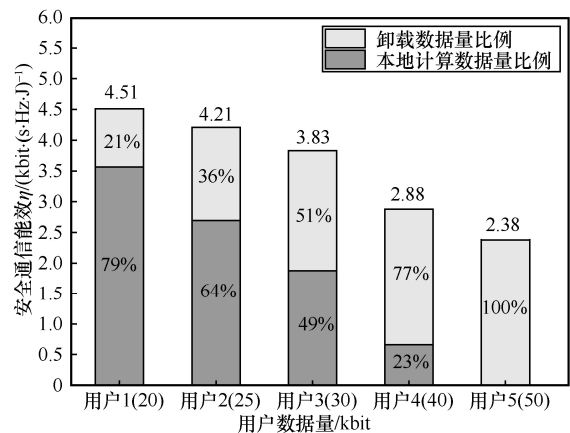


图 5  $C=1200$  cycle/bit 时, UAV 最大安全能效与用户数据量的关系

当任务复杂度  $C=500$  cycle/bit 时,用户 1 的数据量为 20 kbit,其本地能够在给定时延内完成计算任务,

不会产生被窃听的风险,故此时代 UAV 对其的安全通信能效为 $\infty$ 。作为对比,当任务复杂度为 $C=1\ 200$  cycle/bit 时,用户 1 本地不能在给定时延内完成计算任务,故需要进行部分卸载,将 21%的任务量卸载到了合法 UAV;对于用户 2~用户 5,相较于任务复杂度为 $C=500$  cycle/bit,分别多卸载了 11%、13%、18%、28%。此时对于用户 5 的任务,由于其整体的任务复杂度较高,为了整体满足时延关系,用户 5 会进行全卸载。

最后,无论任务复杂度的高低,本文所提策略都取得了良好的性能表现。并且,从图 4 和图 5 还可得出,当任务复杂度分别为 500 cycle/bit 和 1 200 cycle/bit 时,系统整体最大安全通信能效分别为 14.34 kbit/(s·Hz·J)和 17.81 kbit/(s·Hz·J)。故对于不同复杂度的任务,该策略对系统安全通信能效的提升效果也是有所区别的。

当 $T=0.1$  s 时,合法 UAV 自干扰效率与系统最大安全通信能效之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出,所提方案系统安全通信能效优于其他基准方案,分别提升了 64%、86%和 100%,即 $\eta_1$  (联合优化) $>\eta_2$  (固定卸载率) $>\eta_3$  (固定悬停位置) $>\eta_4$  (无干扰功率)。此外,在合法 UAV 无干扰方案中,即 $p_{jam}=0$ ,可观察到系统最大安全通信能效与自干扰效率 $\gamma$ 无关。而在其他策略中,最大安全通信能效随 $\gamma$ 的增大而减小。这是因为当自干扰效率 $\gamma$ 增大时,合法 UAV 发射电磁波在对窃听 UAV 造成干扰的同时,也会对合法 UAV 自身与用户的信息卸载造成一定的影响。此外,当 $\gamma$ 从-120 dB 增加至-100 dB 时,联合优化下系统最大安全通信能效从 14.809 5 kbit/(s·Hz·J)降至 6.931 3 kbit/(s·Hz·J)。

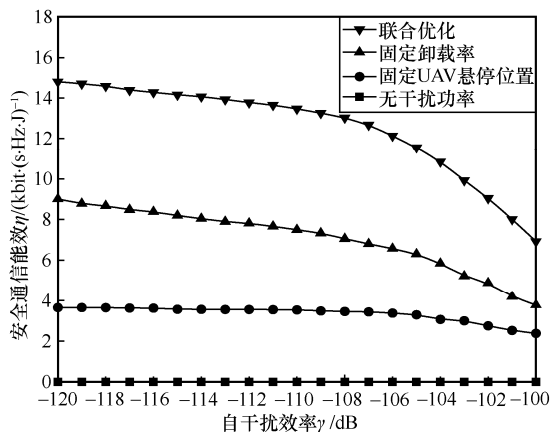


图6 合法 UAV 自干扰效率与系统最大安全通信能效之间的关系

不同 UAV 最大计算频率下时延与安全通信能效之间的关系如图 7 所示。UAV 的 3 个最大的计算频

率分别为 4 000 MHz、2 000 MHz 和 1 000 MHz。从图 7 中可观察到,随着用户任务时延 $T$ 的增加,系统安全通信能效不断增加。这是因为时延越大,用户能够选择进行本地计算的数据量就会更多,从而卸载到 UAV 上的数据量会降低,一方面减小了卸载过程中被窃听的风险;另一方面由于 UAV 接收用户更少的数据量,其通信能耗以及计算能耗也会明显降低。注意到,随着任务时延 $T$ 的增大,系统安全通信能效趋于稳定。这是因为图 7 中曲线趋于收敛时所对应的时延已经接近最优的联合卸载方案中任务执行所需要的时延,所以系统最大安全通信能效会收敛到一个稳定值。其次,从仿真结果中也可看出,随着 UAV 最大计算频率的增大,也会带来系统安全通信能效的提升。这是因为随着合法 UAV 的 CPU 计算频率增大,会导致单位时间内合法 UAV 计算的数据速率快于窃听 UAV 窃听的数据速率,即安全通信速率增大。由此,安全通信速率增大的影响将大于合法 UAV 计算产生的能耗,进而提升了系统安全通信能效。

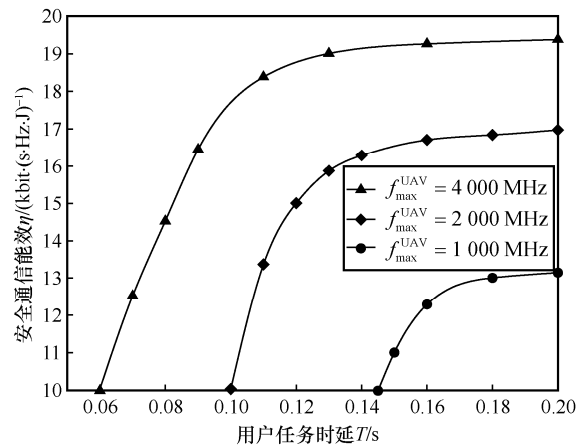


图7 不同 UAV 最大计算频率下时延与安全通信能效之间的关系

## 5 结束语

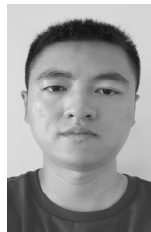
本文构建了一种新型的 UAV 辅助边缘计算系统,从物理层安全角度出发,在保证 UAV-MEC 场景下用户与 UAV 安全通信的同时,平衡 UAV 的能耗。针对高安全通信速率与能耗之间的关系,构建了由两者比值组成的目标函数,提出了基于块坐标下降的三阶段迭代优化算法,通过联合优化合法 UAV 的位置、CPU 计算频率分配以及计算任务的卸载策略,实现了最大化系统安全通信能效的目标。实验结果表明,无论计算任务复杂度的高低,该算法都能在保证完成终端计算任务的同时,有效提升系统的安全通信能效,即平衡高安全通信速率

与 UAV 能耗之间的关系。未来将考虑采用多 UAV 协同方式来代替本文中的单合法 UAV 的 MEC 功能和干扰者角色, 进一步提高系统的安全通信能效。

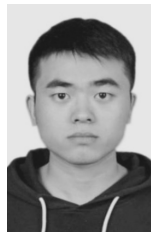
### 参考文献:

- [1] 吴启晖, 吴伟. 无人机辅助边缘计算的能效最大化算法设计[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 15-24.  
WU Q H, WU W. Algorithm design on energy efficiency maximization for UAV-assisted edge computing[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 15-24.
- [2] 任品毅, 许茜. 基于移动边缘计算的时延能耗最小化安全传输[J]. 通信学报, 2020, 41(11): 52-63.  
REN P Y, XU Q. Delay and energy minimization for MEC-based secure communication[J]. Journal on Communications, 2020, 41(11): 52-63.
- [3] LI Z Y, CHEN M, PAN C H, et al. Joint trajectory and communication design for secure UAV networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 636-639.
- [4] SUN G E, LI N, TAO X F, et al. Power allocation in UAV-enabled relaying systems for secure communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 119009-119017.
- [5] MIAO J S, LI H R, ZHENG Z Y, et al. Secrecy energy efficiency maximization for UAV swarm assisted multi-hop relay system: joint trajectory design and power control[J]. IEEE Access, 2021, 9: 37784-37799.
- [6] LU W D, DING Y, GAO Y, et al. Secure NOMA-based UAV-MEC network towards a flying eavesdropper[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(5): 3364-3376.
- [7] ZHONG C H, YAO J P, XU J. Secure UAV communication with cooperative jamming and trajectory control[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 286-289.
- [8] WANG Q, CHEN Z, LI H, et al. Joint power and trajectory design for physical-layer secrecy in the UAV-aided mobile relaying system[J]. IEEE Access, 2018, 6: 62849-62855.
- [9] XU Y, ZHANG T K, YANG D C, et al. Joint resource and trajectory optimization for security in UAV-assisted MEC systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(1): 573-588.
- [10] LI C J, LING H. Synthetic aperture radar imaging using a small consumer drone[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2015: 685-686.
- [11] ZHANG G C, WU Q Q, CUI M, et al. Securing UAV communications via joint trajectory and power control[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(2): 1376-1389.
- [12] CHEN X, JIAO L, LI W Z, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(5): 2795-2808.
- [13] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of wireless communication[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [14] LIU C X, QUEK T Q S, LEE J. Secure UAV communication in the presence of active eavesdropper (invited paper)[C]//Proceedings of 2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [15] ZHANG T K, XU Y, LOO J, et al. Joint computation and communication design for UAV-assisted mobile edge computing in IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5505-5516.
- [16] WANG Y T, SHENG M, WANG X J, et al. Mobile-edge computing: partial computation offloading using dynamic voltage scaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(10): 4268-4282.
- [17] YUN S, TSENG P, TOH K C. A block coordinate gradient descent method for regularized convex separable optimization and covariance selection[J]. Mathematical Programming, 2011, 129(2): 331-355.
- [18] CVX Research. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[R]. 2011.
- [19] HAN D S, SHI T H. Secrecy capacity maximization for a UAV-assisted MEC system[J]. China Communications, 2020, 17(10): 64-81.
- [20] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [21] BUBECK S. Convex optimization: algorithms and complexity[J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2015, 8(3/4): 231-357.
- [22] 尹国泉. 无人机协作安全通信系统的轨迹设计和资源分配研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
YIN G X. Research on trajectory design and resource allocation of UAV cooperated secure communication system[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [23] PAN C H, REN H, DENG Y S, et al. Joint blocklength and location optimization for URLLC-enabled UAV relay systems[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 498-501.
- [24] ZHOU Y, PAN C H, YEOH P L, et al. Secure communications for UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 376-388.

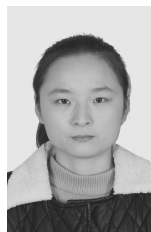
### [作者简介]



余雪勇 (1979- ), 男, 江西南昌人, 博士, 南京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网技术、移动边缘计算和异构无线网络资源管理。



邱礼翔 (1997- ), 男, 河南信阳人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为边缘计算与无人机安全通信。



宋家宁 (1999- ), 女, 河南焦作人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动边缘计算、智能反射面通信技术。



朱洪波 (1956- ), 男, 江苏扬州人, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网与无线通信、宽带移动通信、无线通信与电磁兼容等。