

## 无人机辅助边缘计算安全通信能力最大化方案

薛建彬, 豆俊, 王涛, 马玉玲

### 引用本文

薛建彬, 豆俊, 王涛, 马玉玲. 无人机辅助边缘计算安全通信能力最大化方案[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230800032-7.

XUE Jianbin, DOU Jun, WANG Tao, MA Yuling. Scheme for Maximizing Secure Communication Capacity in UAV-assisted Edge Computing Networks [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230800032-7.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### [改进NDO的板球系统自适应滑模抗扰控制](#)

Adaptive Sliding Mode Disturbance Rejection Control for Cricket System of Improved NDO  
计算机科学, 2024, 51(6A): 230700229-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230700229>

#### [无人机系统安全性综述](#)

Overview of Unmanned Aerial Vehicle Systems Security  
计算机科学, 2024, 51(6A): 230800086-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800086>

#### [一种避障场景下的快速航迹恢复算法](#)

Fast Path Recovery Algorithm for Obstacle Avoidance Scenarios  
计算机科学, 2024, 51(6): 331-337. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230400015>

#### [基于属性访问控制策略的无人机飞控安全方案](#)

Security Scheme of UAV Flight Control Based on Attribute Access Control Policy  
计算机科学, 2024, 51(4): 366-372. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230200135>

#### [无人机辅助的高能效边缘联邦学习综述](#)

Survey of UAV-assisted Energy-Efficient Edge Federated Learning  
计算机科学, 2024, 51(4): 270-279. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231100084>

# 无人机辅助边缘计算安全通信能力最大化方案

薛建彬 豆俊 王涛 马玉玲

兰州理工大学计算机与通信学院 兰州 730050

(volvoxuejb@126.com)

**摘要** 针对无人机辅助移动边缘计算系统下用户信息容易泄露的问题,设计了一种基于非正交多址接入技术(Non-orthogonal Multiple Access,NOMA)的无人机辅助边缘计算系统的安全通信方案。在保证每个地面用户的最小安全计算要求下,通过联合优化信道系数、发射功率、中央处理单元计算频率、本地计算和无人机轨迹来最大化系统的平均安全计算能力。由于窃听器位置的不确定性、多变量的耦合以及问题的非凸性,利用逐次凸逼近和块坐标下降方法来解决该问题。仿真结果表明,与基准方案相比,所提方案在系统安全计算性能方面优于基准方案。

**关键词**:移动边缘计算;非正交多址;无人机;物理层安全;通信安全

**中图分类号** TN929.5

## Scheme for Maximizing Secure Communication Capacity in UAV-assisted Edge Computing Networks

XUE Jianbin, DOU Jun, WANG Tao and MA Yuling

School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

**Abstract** Aiming at the problem that user information is easy to be leaked in UAV-assisted mobile edge computing system, based on non-orthogonal multiple access(NOMA) technology, a secure communication scheme for UAV-assisted mobile edge computing system is proposed. While ensuring the minimum secure computation requirement for each ground user, the average secure computation capability of the system is maximized by jointly optimizing the channel coefficients, the transmit power, the computation frequency of the central processing unit, the local computation and the UAV trajectory. Due to the uncertainty of the eavesdropper location, the coupling of multiple variables and the non-convexity of the problem, successive convex approximation and block coordinate descent method are used to solve the problem. Simulation results show that compared with the benchmark scheme, the proposed scheme outperforms the benchmark scheme in terms of system secure computation performance.

**Keywords** Mobile edge computing, Non-orthogonal multiple access, UAV, Physical layer security, Communications Security

### 1 引言

为了满足不断拓展的新兴无线业务对网络容量和覆盖的需求,空天地融合组网可能是第六代(The 6th Generation, 6G)移动通信系统的研究方向之一。作为空天地融合组网的重要组成部分,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)通信系统因其成本低、部署灵活以及具有良好的空对地视距(Line of Sight, LOS)链路等特性已被广泛应用于增强网络覆盖和提升网络容量。为了满足 6G 场景的计算要求,移动云计算允许地面用户(Ground User, GU)将任务卸载到云服务器计算,但会导致回程链路资源浪费和额外的时间开销。而移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)能满足用户端计算卸载需求,将多个基站资源多域动态共享,提高资源利用率和干扰管理能力,适应未来网络业务高计算、低时延的特点。可以预见,MEC 架构将在 6G 资源宏观部署与微观调度等方面具有巨大的潜力。

搭载 MEC 服务器的无人机可以灵活地提高无线链路的

质量,并为地面用户提供有效的计算卸载服务。UAV 使用 LOS 传输,以提高通信质量<sup>[1]</sup>。无人机先实现一对一服务,再实现一对多的服务,在很小的时隙中,可以为用户提供更好的信道条件。具体而言, Du 等<sup>[2]</sup>设计了一种 UAV-MEC 系统,该系统使用了时分多址接入技术(Time Division Multiple Address, TDMA),并且只考虑了优化 UAV 位置和计算速度来增强系统的性能。Huang 等通过优化 UAV 轨迹和发射功率来提升系统性能<sup>[3]</sup>。Zhan 等指出,UAV-MEC 系统中 GU 的计算完成时间明显缩短<sup>[4]</sup>。Zhou 等根据所考虑的约束条件减少系统的时延<sup>[5]</sup>。类似地, Hu 等联合优化了计算任务卸载率、用户调度和无人机轨迹,以减少系统的总延迟<sup>[6]</sup>。Zhang 等<sup>[7]</sup>提出可以将资源分配和无人机轨迹优化方法相结合以提升系统性能。Yu 等<sup>[8]</sup>联合优化 UAV 的位置、分配无线资源和执行任务分割决策,减少 GU 的服务延迟。但上述工作主要考虑了联合无人机轨迹和某一变量进行优化,从而减少系统时延或提升系统性能,并没有考虑联合优化所有变量来提升系统的安全通信问题。

基金项目:甘肃省科技计划(23YFGA0062);甘肃省创新基金(2022A-215)

This work was supported by the Gansu Science and Technology Program(23YFGA0062)and Innovation Fund of Gansu Province(2022A-215).

通信作者:豆俊(1964513763@qq.com)

非正交多址(NOMA)允许多个 GU 共享链路资源,并且可以在 NOMA 传输中使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)来解码信号。因此, NOMA 被广泛应用于 UAV-MEC 网络中,为大规模接入 GU 提供灵活方便的计算卸载服务。Cui 等提出在 BS 和 UAV 之间的通信链路中利用正交多址(Orthogonal Multiple Access, OMA)和 NOMA 来提高系统速率<sup>[9]</sup>。Na 等提出了一种协作优化算法,该算法使用聚类 NOMA 来减少信道间干扰并提高总上行链路速率<sup>[10]</sup>。Li 等指出, NOMA-MEC 可以进一步降低大数据的卸载和缓存压力<sup>[11]</sup>。Wu 等提出,当 NOMA 传输具有同信道干扰时,可以将更多信息卸载到 MEC 服务器<sup>[12]</sup>。Zhang 等提出,具有 NOMA 的 UAV-MEC 框架可以减少卸载的能耗,并克服设备计算能量的限制<sup>[13]</sup>。由此可见, NOMA 传输可以为大规模 UAV-MEC 网络中的 GU 提供灵活方便的计算服务。然而,需要进行卸载处理的数据很容易被恶意用户窃听,这给基于 NOMA 的 UAV-MEC 网络带来了严重的安全风险。

在未来海量通信模式下,很可能存在恶意的窃听者窃取传输过程中的敏感信息。因此, Chen 等<sup>[14]</sup>研究了 NOMA-UAV 网络的安全传输; Xu 等<sup>[15]</sup>研究了 TDMA 和 NOMA 模式下在 UAV-MEC 系统中的安全通信。Sun 等表明, NOMA 执行的 UAV 通信不仅扩大了覆盖范围,而且提高了安全性<sup>[16]</sup>。由于 UAV 具有高移动性和易于隐藏的独特优势,恶意用户很容易利用它来窃听合法信号。Hu 等<sup>[17]</sup>利用无人机窃听多个可疑链路的通信,以精确控制可疑链路的传输速率,从而便于对监视器进行窃听。Huang 等提出量化无人机的伪装性能,从而避免窃听无人机被地面设备发现<sup>[18]</sup>。上述工作大多考虑了飞行窃听器对用户信息的窃听情况。与现有工程相比,由于人为窃听和空中管制等原因,用户信息更容易被地面设备窃听。

因此,提出一种双无人机辅助 MEC 系统的安全通信方案。与现有方案相比,其安全计算性能大大提高,主要贡献如下:

1) 构建了一种新颖的安全通信模型。其中,潜在的窃听者窃听用户卸载到无人机服务器(UAV-server, UAV-S)的任务信息。为了提升系统的安全性能,无人机干扰器(UAV-Jammer, UAV-J)和地面干扰器(Ground Jammer, GJ)共同发送人工干扰信号来干扰窃听。

2) 制定了安全计算能力最大化的方案。针对窃听者位置的不确定性、二元约束、多变量耦合以及非凸性的问题,通过数学推导和凸优化方法将其近似为凸问题来解决。

3) 在满足 GU 的计算任务需求下,利用逐次凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)和块坐标下降(Block Coordinate Descent, BCD)算法,依次解决变化的信道关系系数分配、处理器(Center Processing Unit, CPU)计算频率、发射功率、本地计算和 UAV 轨迹的优化问题。

## 2 系统模型

如图 1 所示, UAV-S 携带 MEC 服务器来服务  $K$  个地面用户( $GU_K$ ) 计算来自 GU 的卸载信息,用  $\kappa = \{1, 2, \dots, K\}$  表示。地面存在  $E$  个窃听者窃听卸载信息,用  $\epsilon = \{1, 2, \dots, E\}$  表示。UAV-J 和 GJ 发送干扰信号,防止 GU 的任务被窃听。

假设 UAV-S 对 GJ 和 UAV-J 发送的干扰信号具有先验知识,因为 UAV-S 属于合法网络, GJ 和 UAV-J 发出的干扰信号对它是友好的。将干扰信号时隙划分足够小,无论每个时隙的强度是否一样,其接收端信噪比默认不受影响。然而,地面窃听者不知道 GJ 和 UAV-J 的存在,它不属于合法网络,它将窃听过程中窃听的所有信号视为 GU 的信号。因此, GJ 和 UAV-J 发送的干扰信号只干扰  $E$  个窃听者。该系统中的所有 GJ, GU, UAV-S 和 UAV-J 都备单根天线。

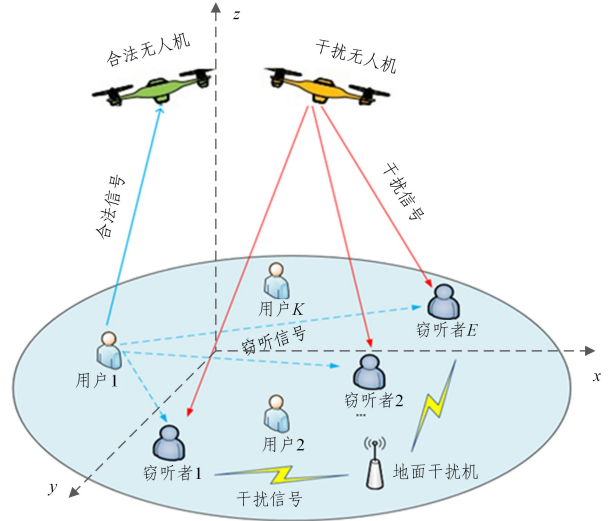


图 1 UAV-MEC 安全通信系统

Fig. 1 UAV-MEC secure communication system

在三维笛卡尔坐标系中, GJ 和  $GU_K$  ( $K \in \kappa$ ) 的坐标分别表示为  $\omega_j = (x_j, y_j, 0)^T$ ,  $\omega_k = (x_k, y_k, 0)^T$ 。假设 UAV-S 和 UAV-J 分别在一定高度  $H_s$  和  $H_j$  飞行。UAV 的总飞行时间表示为  $T$ 。UAV-S 和 UAV-J 的位置表示为:

$$q_s(t) = (x_s(t), y_s(t), H_s)$$

$$q_j(t) = (x_j, y_j, H_j), t \in (0, T)$$

为了便于讨论,采用离散轨迹,将总飞行时间  $T$  平均分为  $N$  个时隙,即  $\delta_t = T/N$ 。

UAV-S 和 UAV-J 的位置分别表示为:

$$q_s[n] = (x_s[n], y_s[n], H_s)$$

$$q_j[n] = (x_j[n], y_j[n], H_j), n \in [1, 2, \dots, N]$$

在实践中,某个时隙内,合法用户传输信息时,在无人机覆盖范围内的其他用户暂都被视为非法用户。将  $q_s^I$  和  $q_s^F$  表示为 UAV-S 的飞行起点和终点,将  $q_j^I$  和  $q_j^F$  表示为 UAV-J 的飞行起点和终点。UAV-S 在总飞行时间  $T$  内从  $q_s^I$  飞到  $q_s^F$ ,以帮助地面合法用户计算卸载任务。UAV-J 在飞行时间  $T$  内从  $q_j^I$  飞往  $q_j^F$ ,执行其干扰任务。假设 UAV-S 的最大飞行速度表示为  $V_s^{\max}$ ,然后, UAV-S 飞行轨迹应满足:

$$q_s[1] = q_s^I \quad (1a)$$

$$q_s[N] = q_s^F \quad (1b)$$

$$\|q_s[n+1] - q_s[n]\| \leq V_s^{\max} \delta_t \quad (1c)$$

为了防止无人机之间发生碰撞,定义最小距离为  $d_{\min}$ :

$$\|q_s[n] - q_j[n]\|^2 \geq d_{\min}^2, \forall n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

时隙  $n$  中  $GU_K$  和 UAV-S, UAV-J 和  $E$ , GJ 和  $E$ ,  $GU_K$  和  $E$  之间的距离表示为:

$$d_{k,s}[n] = \sqrt{H_s^2 + \|q_s[n] - \omega_k\|^2}$$

$$d_{uj,\epsilon}[n] = \sqrt{H_j^2 + \|q_j[n] - \omega_\epsilon\|^2}$$

$$d_{G_j,e} = \sqrt{\|w_j - w_e\|^2}$$

$$d_{k,e} = \sqrt{\|w_k - w_e\|^2}$$

将 $\beta_0$ 定义为单位距离处的信道功率增益,假设 $GU_K$ 到UAV-S信道和UAV-J到E信道,由准静态块衰落LOS链路很好地建模,并遵循依赖于距离的路径损耗模型。因此,时隙 $n$ 中 $GU_K$ 和UAV-S、UAV-J和E之间的信道增益表示为

$$h_{k,s}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{d_{k,s}^{\alpha_{k,s}}[n]}}, h_{U_j,e}[n] = \sqrt{\frac{\beta_0}{d_{U_j,e}^{\alpha_{U_j,e}}[n]}}$$

GJ和窃听者E之间的信道和 $GU_K$ 和E之间的信道被建模为独立的瑞利衰落。因此,从GJ到窃听者E和 $GU_K$ 到窃听器E的信道幅度

$$\text{分别表示为 } g_{G_j,e} = \sqrt{\beta_0 d_{G_j,e}^{-\alpha_{G_j,e}} \xi_e}, g_{k,e} = \sqrt{\beta_0 d_{k,e}^{-\alpha_{k,e}} \xi_e}.$$

其中, $\xi_e$ 是单位平均值服从指数分布的瑞利衰落系数。将 $p_k[n]$ 定义为 $GU_K$ 的发射功率,其不大于 $GU_K$ 的峰值功率,则需要满足:

$$0 \leq p_k[n] \leq P_{\max}, \forall k, n \quad (3)$$

### 3 问题建模

使用二进制参数 $\lambda_{k,l}[n]$ 来指示每个时隙中UAV-S和GU之间的这些变化信道的关系,表示为时隙 $n$ 中 $GU_K$ 和UAV-S的信道与 $GU_l$ 和UAV-S的信道之间的变化信道关系系数。由于单位信道功率增益相同,用 $GU_K$ 和UAV-S的距离与 $GU_l (l \in \kappa)$ 与UAV-S之间的距离之间的关系来表示 $\lambda_{k,l}[n]$ ,其可以写成:

$$\lambda_{k,l}[n] \in \{0, 1\} \quad (4a)$$

$$\lambda_{k,l}[n] + \lambda_{l,k}[n] = 1, \forall k, l, n \quad (4b)$$

$$\lambda_{k,l}[n] = \begin{cases} 1, & \text{if } d_{k,s}[n] \leq d_{l,s}[n] \\ 0, & \text{if } d_{k,s}[n] > d_{l,s}[n] \end{cases} \quad (4c)$$

其中, $d_{l,s}[n]$ 表示时隙 $n$ 中 $GU_l$ 与UAV-S之间的距离。从(4c)可以看出,如果 $d_{k,s}[n] \leq d_{l,s}[n]$ ,则 $h_{k,s}[n] \geq h_{l,s}[n]$ 。因此, $\lambda_{k,l}[n] = 1$ 表示 $GU_K$ 的信道条件优于 $GU_l$ ,并且 $GU_l$ 的任务信息干扰 $GU_K$ ,否则 $\lambda_{k,l}[n] = 0$ 。为了避免SIC解码过程中的干扰,用(4a)对其进行抑制,这表明当 $GU_l$ 的信号干扰 $GU_K$ 的信号卸载时, $GU_K$ 的信号将不再因SIC解码而干扰 $GU_l$ 的信号卸载。

#### 3.1 通信模型

UAV-S和窃听者E处接收的信噪比表示为:

$$r_{k,s}[n] = \frac{p_k[n] |h_{k,s}[n]|^2}{\sum_{l \neq k, l \in \kappa} \lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 p_l[n] + \delta_s^2}, \forall k, n \quad (5)$$

$$r_{k,e}[n] =$$

$$\frac{p_k[n] |g_{k,e}|^2}{|h_{U_j,e}[n]|^2 p_{U_j} + |g_{G_j,e}|^2 p_j + \sum_{z \in \kappa_k} |g_{z,e}|^2 p_z[n] + \delta_e^2}, \quad \forall k, e, n \quad (6)$$

其中, $\kappa_k = \{z | z \in \kappa, |g_{z,e}| < |g_{k,e}|\}$ 表示在合法用户传输信息的过程中其他信道增益差的用户产生的干扰。 $P_j$ 是GJ的发射功率, $P_{U_j}$ 是UAV-J的发射功率, $\delta_s^2$ 和 $\delta_e^2$ 分别是在UAV-S和E处接收的高斯噪声的功率。因此,从UAV-S到 $GU_K$ 的信息卸载速率和从E到 $GU_K$ 的信息窃听速率分别表示如下:

$$R_{k,s}[n] = \log_2(1 + r_{k,s}[n]) \quad (7)$$

$$R_{k,e}[n] = \log_2(1 + r_{k,e}[n]) \quad (8)$$

$GU_K$ 到UAV-S的可实现的保密率为:

$$R_{k,\text{sec}}[n] = (R_{k,s}[n] - \max_{V \in \mathcal{E}} R_{k,e}[n])^+, \forall k, n \quad (9)$$

#### 3.2 计算模型

$l_{\text{loc},k}[n]$ 表示 $GU_K$ 在时隙 $n$ 中本地计算的比特数, $c_s$ 和 $c_e$ 表示在UAV-S和 $GU_K$ 处计算信息每比特所需的CPU计算周期; $F_s^{\max}$ 和 $F_k^{\max}$ 表示UAV-S和 $GU_K$ 最大CPU频率。由于 $GU_K$ 不能计算超过其最大本地计算能力,因此它应满足:

$$c_k l_{\text{loc},k}[n] \leq F_k^{\max} \delta_t, \forall k, n \quad (10)$$

为确保无人机可以协助多个用户执行任务,设 $f_k[n]$ 表示在UAV-S处分配给 $GU_K$ 的CPU计算频率,以计算任务的卸载信息。因此它应满足:

$$\sum_{k=1}^K f_k[n] \leq F_s^{\max}, \forall n \quad (11a)$$

$$0 \leq f_k[n] \leq F_s^{\max}, \forall k, n \quad (11b)$$

类似地, $GU_K$ 在UAV-S处的安全计算应满足:

$$c_k B R_{k,\text{sec}}[n] \delta_t \leq f_k[n] \delta_t \quad (12)$$

$B$ 表示信道带宽。此外,时隙 $n$ 中每个GU的最小安全计算要求满足:

$$l_{\text{loc},k}[n] + B R_{k,\text{sec}}[n] \delta_t \geq Q_m, \forall k, n \quad (13)$$

$Q_m$ 表示GU的最低安全计算要求。将 $k_k$ 表示为 $GU_K$ 的有效电容系数。然后, $GU_K$ 在本地计算中的能量消耗可以写成 $\frac{k_k (c_k l_{\text{loc},k}[n])^3}{\delta_t^2}$ 。

$GU_K$ 在本地计算任务信息和在时间 $T$ 内向UAV-S传输卸载任务信息时的能耗不能大于 $GU_K$ 的平均能耗预算:

$$\sum_{n=1}^N \left( p_k[n] \delta_t + \frac{k_k (c_k l_{\text{loc},k}[n])^3}{\delta_t^2} \right) \leq p_{\text{ave}}^k T, \forall k, n \quad (14)$$

其中, $P_{\text{ave}}^k$ 是 $GU_K$ 平均功率预算。在时间 $T$ 内的平均安全计算能力如下:

$$\bar{R}_{\text{sec}} = \frac{1}{KT} \sum_{k=1}^K \left( \sum_{n=1}^N l_{\text{loc},k}[n] + B \sum_{n=1}^N R_{k,\text{sec}}[n] \delta_t \right) \quad (15)$$

其表示所有时隙中的总安全计算容量的平均值。

#### 3.3 问题提出

为了最大化系统的安全计算能力,针对信道关系系数 $\lambda_{k,l}[n]$ 、发射功率 $p_k[n]$ 、CPU计算频率 $f_k[n]$ 、本地计算能力 $l_{\text{loc},k}[n]$ 和无人机服务器的轨迹 $q_s[n]$ 进行优化,优化问题表示为:

$$(P1): \max_{\{\lambda_{k,l}[n], p_k[n], f_k[n], l_{\text{loc},k}[n], q_s[n]\}} \bar{R}_{\text{sec}} \quad (1), (2), (3), (4), (10), (11), (12), (13), (14) \quad (16)$$

**命题1** 原始问题P1是非凸的。

证明:约束(2)的左侧是凹的。因此,(2)是非凸的。约束(12)和(13)与 $R_{k,\text{sec}}[n]$ 相关, $R_{k,\text{sec}}[n]$ 由多个优化变量组成。例如, $\lambda_{k,l}[n]$ , $p_k[n]$ 和 $q_s[n]$ ,这使得(12)和(13)是多变量耦合且非凸的。此外,目标函数 $\bar{R}_{\text{sec}}$ 与 $R_{k,\text{sec}}[n]$ 相关,它也是非凸的。因此,问题P1是非凸的,证毕。

#### 4 问题优化

为了简化原始问题(P1)引入辅助变量 $\hat{s}_s, \hat{s}_{1,k}[n], \hat{s}_{2,k}[n]$ 。原始问题(P1)可以写为:

$$(P1.1): \max \hat{s} \quad (1), (2), (3), (4), (10), (11), (14) \quad (17a)$$

$$KT \hat{S} \leq \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (l_{\text{loc},k}[n] + B \delta_t (\hat{s}_{1,k}[n] - \hat{s}_{2,k}[n])), \forall n \quad (17b)$$

$$\hat{s}_{1,k}[n] \leq R_{k,s}[n], \forall k, n \quad (17c)$$

$$\hat{s}_{2,k}[n] \geq R_{k,e}[n], \forall k, e, n \quad (17d)$$

$$c_k B (\hat{s}_{1,k}[n] - \hat{s}_{2,k}[n]) \leq f_k[n] \quad (17e)$$

$$l_{loc,k}[n] + B (\hat{s}_{1,k}[n] - \hat{s}_{2,k}[n]) \delta_i \geq Q_m, \forall k, n \quad (17f)$$

$$\hat{z} = \{\lambda_{k,l}[n], f_k[n], p_k[n], l_{loc,k}[n], q_s[n], \hat{s}_{1,k}[n], \hat{s}_{2,k}[n]\},$$

表示平均安全计算容量  $\bar{R}_{sec}$  的下限。其中  $\hat{s}_{1,k}[n]$  表示瞬时任务信息卸载率  $R_{k,s}[n]$  的下限,  $\hat{s}_{2,k}[n]$  表示瞬时任务信息窃听率  $R_{k,e}[n]$  的上限。以上约束条件依靠数学表达不同的解变量,因此本文所有约束默认成立。

#### 4.1 通过固定 $\{q_s[n]\}$ 优化 $\hat{z} \setminus \{q_s[n]\}$

固定 UAV 轨迹, 问题(P1.1)被重新表述为:

$$(P2): \max_{\hat{z} \setminus \{q_s[n]\}} \hat{s} \quad (3), (4), (10), (11), (14), (17b) - (17f) \quad (18)$$

问题(P2)很难得到解决。首先, 约束(4)是二进制约束, 它不是连续的。其次, 约束(17c)和(17d)都是非凸的。可以使用 SCA 和 BCD 技术来求解(P2), 其中, 通过考虑其他固定值, 以迭代方式更新, 可以获得变化的信道关系系数优化  $A = \lambda_{k,l}[n]$ 、发射功率分配  $B = p_k[n]$ 、CPU 计算频率分配  $C = f_k[n]$  和本地计算分配  $D = l_{loc,k}[n]$ 。

##### 4.1.1 可变信道关系系数优化

固定  $B$ 、 $C$  和  $D$ , 将可变信道关系系数优化问题表述为:

$$(P2.1): \max_{\{A\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (4), (17b) - (17f) \quad (19)$$

将  $\tilde{\lambda}_{k,l}[n]$  引入二元约束(4)中, 等价地转换为:

$$\lambda_{k,l}[n] = \tilde{\lambda}_{k,l}[n], \forall k, l, n \quad (20a)$$

$$\lambda_{k,l}[n](1 - \tilde{\lambda}_{k,l}[n]) = 0 \quad (20b)$$

$$\lambda_{k,l}[n] d_{k,s}[n] \leq d_{l,s}[n], \forall k, n \quad (20c)$$

如果  $d_{l,s}[n] > d_{k,s}[n]$ ,  $\lambda_{k,l}[n]$  可以是 1 或 0, 否则,  $\lambda_{k,l}[n] = 0$ 。然而,  $\lambda_{k,l}[n]$  和  $\lambda_{l,k}[n]$  受(4b)约束, 如果  $\lambda_{k,l}[n]$  或  $\lambda_{l,k}[n]$  为 1, 则另一个必须为 0, 问题(P2.1)转换为:

$$(P2.1.1): \max_{\{A, \tilde{\lambda}_{k,l}[n]\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (17b) - (17f), (20) \quad (21)$$

问题(P2.1.1)是凸问题, 可以通过 CVX 解决。

##### 4.1.2 发射功率分配

固定  $A$ 、 $C$  和  $D$ , 发射功率分配问题表示为:

$$(P2.2): \max_{\{B\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (3), (14), (17b) - (17f) \quad (22)$$

问题(P2.2)是非凸的, 利用 SCA 近似为凸问题, 将式(5)代入式(7), 再代入式(17c)可以得到:

$$\hat{s}_{1,k}[n] \leq F_{1,k}[n] - \log_2 \sum_{l \neq k, l \in \kappa} (\lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 p_l[n] + \delta_s^2) \forall k, n \quad (23)$$

$$F_{1,k}[n] = \log_2 \sum_{l \neq k, l \in \kappa} (\lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 p_l[n] + \delta_s^2 + |h_{k,s}[n]|^2 p_k[n]) \quad (24)$$

凸函数可以通过一阶泰勒展开的全局下界获得。在引理 1 中, 近似得到  $\hat{s}_{1,k}[n]$  的下界。

$$\pi_{1,k}[n] = \log_2 \left( \frac{\beta_0 p_k[n]}{H_s^2 + \|q_s[n] - w_k\|^2} + \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) - \log_2 \left( \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) \quad (34)$$

对  $\pi_{1,k}[n]$  的第一项和第二项可以近似为:

引理 1 式(23)通过一阶泰勒展开得到:

$$\hat{s}_{1,k}[n] \leq F_{1,k}[n] - \log_2 \sum_{l \neq k, l \in \kappa} (\lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 p_l[n] + \delta_s^2) - \frac{1}{\ln 2} \frac{\lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 (p_l[n] - p_l^r[n])}{\sum_{l \neq k, l \in \kappa} (\lambda_{k,l}[n] |h_{l,s}[n]|^2 p_l^r[n] + \delta_s^2)} \forall k, n \quad (25)$$

其中,  $p_l^r[n]$  表示  $GU_l$  在第  $r$  次迭代中获得的发射功率。

证明: 定义  $f(x) = \log(1 + ax)$ ,  $a$  表示常数, 给定一个可行点  $x_0$ , 可以使用一阶泰勒展开将  $f(x)$  近似变换为:

$$f(x) \approx \log(1 + ax_0) + \frac{a(x - x_0)}{1 + ax_0}$$

类似地, 将式(6)替换为式(8)和式(17d)可以得到:

$$\hat{s}_{2,k}[n] \geq F_{2,k}[n] + \log_2 \left( \sum_{z \in k_e} |g_{z,e}|^2 p_z[n] + p_k[n] |g_{k,e}|^2 + A_1[n] \right), \forall k, n \quad (26)$$

$$\text{定义 } A_1[n] = |h_{U_j,e}[n]|^2 p_{U_j} + |g_{G_j,e}|^2 p_j + \delta_e^2$$

$$F_{2,k}[n] = -\log_2 \left( |h_{U_j,e}[n]|^2 p_{U_j} + |g_{G_j,e}|^2 p_j + \sum_{z \in k_e} |g_{z,e}|^2 p_z[n] + \delta_e^2 \right) \quad (27)$$

$$\hat{s}_{2,k}[n] \geq F_{2,k}[n] + \log_2 \left( \sum_{z \in k_e} |g_{z,e}|^2 p_z^r[n] + |g_{k,e}|^2 p_k^r[n] + A_1[n] + \frac{\sum_{z \in k_e} |g_{z,e}|^2 (p_z[n] - p_z^r[n]) + |g_{k,e}|^2 (p_k[n] - p_k^r[n])}{\ln 2 \sum_{z \in k_e} |g_{z,e}|^2 p_z^r[n] + |g_{k,e}|^2 p_k^r[n] + A_1[n]} \right) \quad (28)$$

其中,  $p_z^r[n]$  和  $p_k^r[n]$  分别表示  $GU_z$  和  $GU_k$  在第  $r$  次迭代中获得的发射功率。问题(P2.2)转化为:

$$(P2.2.1): \max_{\{B\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (3), (14), (17b), (17e), (17f), (25), (28) \quad (29)$$

问题(P2.2.1)是凸问题, 使用 CVX 获得最优解。

##### 4.1.3 CPU 计算频率分配

固定  $A$ 、 $B$  和  $D$ , CPU 计算频率问题表述为:

$$(P2.3): \max_{\{C\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (11), (17b) - (17f) \quad (30)$$

问题(P2.3)是凸问题, 可以通过 CVX 解决。

##### 4.1.4 本地计算分配

固定  $A$ 、 $B$  和  $C$ , 本地计算分配问题表述为:

$$(P2.4): \max_{\{D\}, \{\hat{s}_{1,k}[n]\}, \{\hat{s}_{2,k}[n]\}} \hat{s} \quad (14), (17b) - (17f) \quad (31)$$

问题(P2.4)是凸的, 可以使用 CVX 来解决。

#### 4.2 通过固定 $\hat{z} \setminus \{q_s[n]\}$ 优化 $\{q_s[n]\}$

固定  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$ , 将 UAV-S 轨迹转换为:

$$(P3): \max_{\hat{z} \setminus \{q_s[n]\}} \hat{s} \quad (1a) - (1c), (2), (17b) - (17f) \quad (32)$$

因为约束(2)和(17c)都是非凸的, 问题(P3)很难处理, 可以通过 SCA 技术来近似处理。假设  $q_s^r[n]$  表示第  $r$  次迭代后的 UAV-S 的轨迹, 将式(2)近似为:

$$d_{\min}^2 \leq \|q_s^r[n] - q_j[n]\|^2 + 2 \|q_s^r[n] - q_j[n]\| \|q_s[n] - q_s^r[n]\|, \forall n \quad (33)$$

(17c)的右半部分可以表述为:

$$t_{1,k}[n] = \log_2 \left( \frac{\beta_0 p_k[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_k\|^2} + \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) - \frac{\beta_0 p_k[n] (\|q_s[n] - w_k\|^2 - \|q_s^r[n] - w_k\|^2)}{(H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_k\|^2)^2} \ln 2 \left( \frac{\beta_0 p_k[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_k\|^2} + \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n] (\|q_s[n] - w_l\|^2 - \|q_s^r[n] - w_l\|^2)}{(H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2)^2} \ln 2 \left( \frac{\beta_0 p_k[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_k\|^2} + \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) \frac{\sum_{l \neq k, l \in \kappa} \lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n] 2 \|q_s^r[n] - w_l\| \|q_s[n] - q_s^r[n]\|}{(H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2)^2} \ln 2 \left( \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) \quad (35)$$

$$t_{2,k}[n] = \log_2 \left( \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) - \frac{\sum_{l \neq k, l \in \kappa} \lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n] 2 \|q_s^r[n] - w_l\| \|q_s[n] - q_s^r[n]\|}{(H_s^2 + \|q_s^r[n] - w_l\|^2)^2} \ln 2 \left( \sum_{l \neq k, l \in \kappa} \frac{\lambda_{k,l}[n] \beta_0 p_l[n]}{H_s^2 + \|q_s[n] - w_l\|^2} + \delta_s^2 \right) \quad (36)$$

因此,(17c)近似表述为:

$$\hat{s}_{1,k}[n] \leq t_{1,k}[n] - t_{2,k}[n] \quad (37)$$

问题(P3)被重新表述为:

$$(P3.1): \max_{\hat{s}} \hat{s} \quad (1a) - (1c), (17b), (17d) - (17f), (33), (37) \quad (38)$$

问题(P3.1)是凸的,可以通过使用 CVX 来解决。

### 4.3 BCD 优化算法

通过交替地解决问题(P2.1.1),(P2.2.1),(P2.3)和(P2.4)以获得问题(P2)的解,通过解决问题(P3.1)来获得问题(P3)的解,通过迭代地解决问题(P2)和(P3),得到最后的(P1)。

#### 算法1 基于块坐标下降的优化算法

1. 初始化,设置最大迭代次数 $r_{\max}$ 和精度 $\epsilon$
2. 设置初始迭代指标 $r=0$ ,收敛精度 $\epsilon>0$
- 迭代:
3. while  $r < r_{\max}$ :
4.  $\lambda_{k,l}[n] = \text{solve} - \lambda_{k,l}(p_k^r[n], f_k^r[n], l_{loc,k}^r[n], q_s^r[n])$   
 $\lambda_{k,l}^r[n] = \lambda_{k,l}[n]$  # 求解可变信道关系系数优化 $\lambda_{k,l}[n]$ ,求解(P2.1.1)
5.  $p_k[n] = \text{solve} - p_k(\lambda_{k,l}^r[n], f_k^r[n], l_{loc,k}^r[n], q_s^r[n])$   
 $p_k^r[n] = p_k[n]$  # 求解发射功率分配 $p_k[n]$ ,求解(P2.2.1)
6.  $f_k[n] = \text{solve} - f_k(\lambda_{k,l}^r[n], p_k^r[n], l_{loc,k}^r[n], q_s^r[n])$   
 $f_k^r[n] = f_k[n]$  # 求解 CPU 计算频率分配 $f_k[n]$ ,求解(P2.3)
7.  $l_{loc,k}[n] = \text{solve} - l_{loc,k}(\lambda_{k,l}^r[n], p_k^r[n], f_k^r[n], q_s^r[n])$   
 $l_{loc,k}^r[n] = l_{loc,k}[n]$  # 求解局部计算分配 $l_{loc,k}[n]$ ,求解(P2.4)
8.  $q_s[n] = \text{solve} - q_s(\lambda_{k,l}^r[n], p_k^r[n], f_k^r[n], l_{loc,k}^r[n])$   
 $q_s^r[n] = q_s[n]$  # 求解 UAV-S 优化轨迹 $q_s[n]$ ,求解(P3.1)
9.  $r = r + 1$
10. if converged:
11. break
12. 输出  $(\hat{s}, \hat{s}_{1,k}[n], \hat{s}_{2,k}[n], \lambda_{k,l}[n], p_k[n], f_k[n], l_{loc,k}[n], q_s[n])$

## 5 仿真结果和讨论

在拟定方案中,5个GU随机分布在 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的区域内,GJ的位置固定为 $[0,0]^T$ ,UAV-S需要以固定速度从 $q_s^I = [-200, -10]^T$ 飞到 $q_s^F = [200, -10]^T$ ,UAV-J从 $q_j^I = [-200, -50]^T$ 飞至 $q_j^F = [200, -60]^T$ 。UAV的最大飞行速度为 $V_s^{\max} = 50\text{m/s}$ 。UAV-S和UAV-J之间避免碰撞的最小距离为 $d_{\min} = 1\text{m}$ 。其他参数如表1所列。

表1 系统参数设置

模拟参数	值
UAV 的高度/m	$H_s = H_j = 100$
时隙大小/s	$\delta_t = 0.5$
通信带宽/MHz	$B = 1$
信道功率增益/dB	$\beta_0 = -60$
噪声功率/dBm	$\delta_s^2 = \delta_e^2 = -110$
$GU_K$ 有效电容系数	$k_k = 10^{-27}$
$GU_K$ 峰值发射功率/w	$P_{\max} = 0.1$
GJ 发射功率/w	$P_j = 0.1$
$GU_K$ 的平均发射功率/w	$P_{\text{ave}}^k = 2$
$GU_K$ 和 UAV-S 最大 CPU 频率/GHz	$F_k^{\max} = 1, F_s^{\max} = 20$
$GU_K$ 和 UAV-S 计算每比特所需的周期数/(cycles/bit)	$c_s = c_k = 10^3$
$GU_K$ 每比特所需的最小安全计算需求/Mbits	$Q_m = 0.5$

为了证明本文方案的优越性,将与以下已有研究文献中的4个基准方案进行了性能比较。

方案1:在基于TDMA的UAV-MEC系统中,优化 $GU_K$ 本地计算、 $GU_K$ 发射功率、时间分配因子和UAV-S轨迹。方案2:UAV-S以直线轨迹飞行,同时对变化的信道关系系数、 $GU_K$ 发射功率、 $GU_K$  CPU计算频率、 $GU_K$ 发送功率和 $GU_K$ 本地计算进行优化。方案3:GU的发射功率是固定的,同时对变化的信道关系系数、 $GU_K$ 的CPU计算频率、 $GU_K$ 本地计算和UAV-S轨迹进行优化。方案4:固定UAV-S位置,通过联合优化GU发射功率、干扰功率、卸载比、无人机计算能力和用户分配来最大化系统的安全计算能力,其中UAV-S发送干扰信号以增强安全性。

图2给出了不同飞行时间 $T$ 和不同GU发射峰值功率 $P_{\max}$ 的平均安全计算能力的收敛性。可以观察到,本文方案具有良好的收敛性能。当 $T$ 和 $P_{\max}$ 增加时,系统的平均安全计算能力增强。

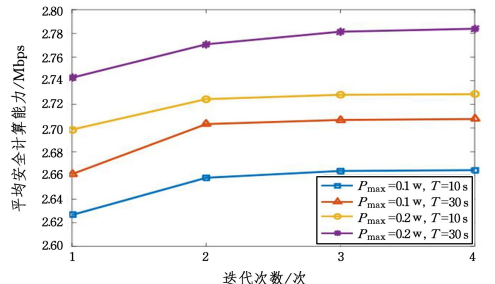


图2 不同 $P_{\max}$ 和 $T$ 下的收敛性能

Fig. 2 Convergence performance at different  $P_{\max}$  and  $T$

图3给出了不同飞行时间 $T$ 下优化的UAV-S轨迹和预

先确定的 UAV-J 轨迹的比较。图 3(a)给出了当  $T=10\text{ s}$  时, NOMA 传输的 UAV-S 和 UAV-J 的轨迹。可以观察到, UAV-S 调整其飞行轨迹以尝试接近 GU。然而, 由于  $T$  很小, 并且 UAV-S 需要按时到达终点, 它不能在空中悬停。如图 3(b)所示, 当  $T$  变大时, UAV-S 将有足够的时间到达终点, 它可以飞到 GU 正上方悬停, 以增强安全通信能力。

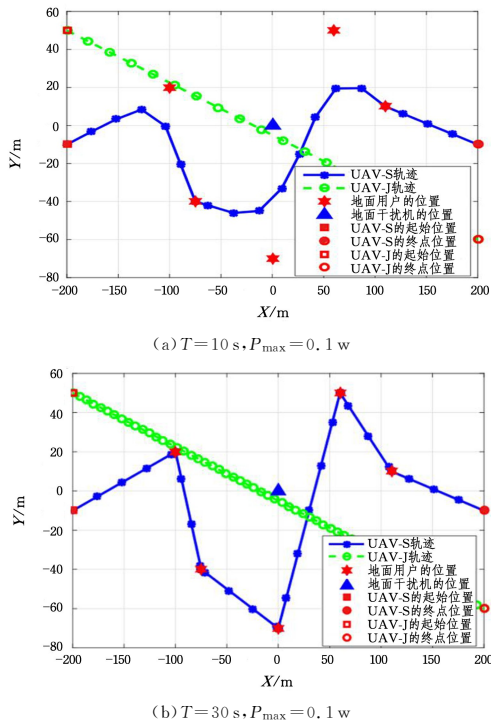


图 3 不同  $T$  下 UAV-S 和 UAV-J 的优化轨迹

Fig. 3 Optimal trajectories of UAV-S and UAV-J at different  $T$

图 4 给出了 UAV-S 的优化飞行速度与 UAV-J 在不同  $T$  下的恒定飞行速度的比较。U-S 和 U-J 分别表示 UAV-S 和 UAV-J 的速度。

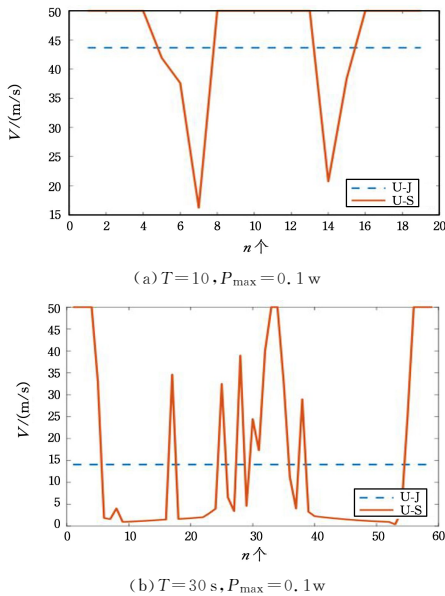


图 4 不同  $T$  下 UAV-S 和 UAV-J 的飞行速度比较

Fig. 4 Comparison of flight speeds of UAV-S and UAV-J at different  $T$

由于 UAV-J 从  $q_j^i$  飞到  $q_j^f$  在飞行过程中以恒定速度飞行, 当  $T$  固定时, 其速度不会改变。注意, 图 4(a)和图 4(b)

中, UAV-J 的总飞行距离相同, 但是  $T$  不同, 因此 UAV-J 的速度不同。UAV-S 的轨迹需要优化以最大化平均安全计算能力。因此, 它将倾向于悬停在尽可能靠近 GU 的位置, 以便更好地卸载信息, 速度也会随之改变。当  $T=10\text{ s}$  时, 如图 4(a)所示, 由于飞行时间有限, UAV-S 几乎以最大速度飞行到终点位置。然而, 当  $T=30\text{ s}$  时, 如图 4(b)所示, 在足够的时间内, UAV 以其最大速度接近 GU, 然后悬停在 GU 的正上方, 在最佳状态下接收到 GU 的卸载任务。

图 5 给出了在不同飞行时间  $T$  系统的平均安全计算能力与 GU 的  $P_{\max}$  峰值功率之间的关系。从图中可以发现, 当  $T$  较大时, UAV-S 能够有更多的时间悬停在最佳位置以接收卸载信息。当  $P_{\max}$  增加时, 系统的平均安全计算能力也会增强, 因为 GU 可以获得更多的能量来支持具有更大  $P_{\max}$  的卸载任务信息的传输。

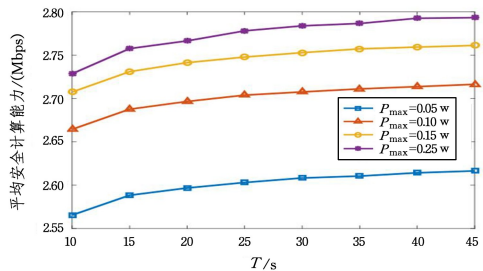


图 5 不同  $T$  下平均安全计算能力与  $P_{\max}$  的变化比较

Fig. 5 Comparison of average security computing power and  $P_{\max}$  at different  $T$

图 6 给出了 GU 的  $P_{\max}$  峰值功率不同时, 系统的平均安全计算能力与  $Q_m$  的关系。当  $Q_m$  值较小时, 例如小于  $0.5\text{ Mbits}$  时, 平均安全计算能力缓慢下降。因为每个 GU 的最大 CPU 频率设置为  $1\text{ GHz}$ , 这可以保证本地计算的最大任务数。然而, 当  $Q_m$  进一步增加时, 由于 GU 的计算能力有限, 必须将更多任务卸载到 UAV-S 进行计算, 这使  $E$  有更多机会窃听 GU 发送给 UAV-S 的信息。因此, 随着  $Q_m$  的增加, 性能将变得更差。

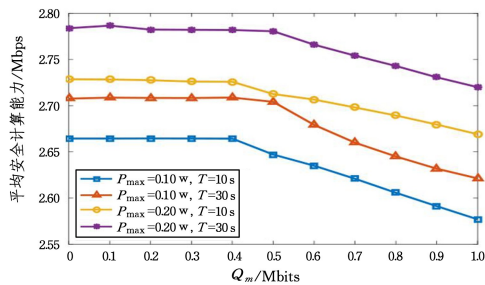


图 6 平均安全计算能力随  $Q_m$  变化的比较

Fig. 6 Comparison of the average secure computation power as  $Q_m$  changes

图 7 中, 与方案 1 相比, 本文方案利用了 NOMA 传输的优点, 允许多个用户共享相同的资源。与方案 2 相比, 本文方案还优化了 UAV-S 的轨迹, 表明了轨迹优化在提高安全计算性能方面的重要性。与方案 3 相比, 本文方案还优化了 GU 的发射功率, 表明了发射功率分配在提高安全计算性能方面的重要性。与方案 4 相比, 本文方案优化了 UAV-S 轨迹, 并且 UAV-S 可以飞行以辅助 GU 计算卸载任务。由于方案 4 中无人机的位置是固定的, 平均安全计算能力不会随

$T$  的变化而变化。

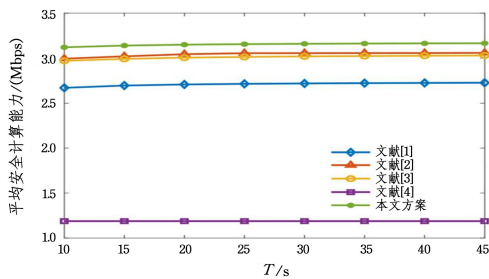


图7 不同方案的平均安全计算能力随  $T$  变化的比较

Fig. 7 Comparison of average security computing power of different schemes as  $T$  change

**结束语** 本文研究了基于 NOMA 的 UAV-MEC 系统中无人机通信链路的安全问题。其中,在保证每个 GU 满足其最小安全计算要求的条件下,首先通过数学推导来研究最差的安全情况。然后,优化 UAV-S 和 GU 之间的变化信道关系系数、CPU 计算频率、发射功率、本地计算和 UAV-S 的轨迹来最大化系统的平均安全计算能力。使用 SCA 和 BCD 方法以迭代方式解决所提出的优化问题。仿真结果表明,所提方案在系统安全计算性能方面优于基准方案。

## 参考文献

- [1] HUANG H L, SAVKIN A. A Method for Optimized Deployment of Unmanned Aerial Vehicles for Maximum Coverage and Minimum Interference in Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(5): 2638-2647.
- [2] DU Y Y, KUN W, ZHANG K Z. Joint Resources and Workflow Scheduling in UAV-Enabled Wirelessly-Powered MEC for IoT Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 10187-10200.
- [3] HUANG F, CHEN J, WANG H C, et al. UAV-Assisted SWIPT in Internet of Things With Power Splitting: Trajectory Design and Power Allocation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 68260-68270.
- [4] ZHAN C, HU H, SUI X F, et al. Completion Time and Energy Optimization in the UAV-Enabled Mobile-Edge Computing System[J]. IEEE Internet of Journal, 2020, 7(8): 7808-7822.
- [5] ZHOU F H, WU Y P, HU R, et al. Computation Rate Maximization in UAV-Enabled Wireless-Powered Mobile-Edge Computing Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1927-1941.
- [6] HU Q Y, CAI Y L, YU G D, et al. Joint Offloading and Trajectory Design for UAV-Enabled Mobile Edge Computing Systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1879-1892.
- [7] ZHANG T K, XU Y, JONATHAN L, 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.
- [8] YU Z, GONG Y M, GONG S M, et al. Joint Task Offloading and Resource Allocation in UAV-Enabled Mobile Edge Computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3147-3159.

- [9] CUI F Y, CAI Y L, QIN Z J, et al. Multiple Access for Mobile-UAV Enabled Networks: Joint Trajectory Design and Resource Allocation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(7): 4980-4994.
- [10] NA Z Y, LIU Y, SHI J C, et al. UAV-Supported Clustered NOMA for 6G-Enabled Internet of Things: Trajectory Planning and Resource Allocation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(20): 15041-15048.
- [11] LI S L, LI B G, ZHAO W. Joint Optimization of Caching and Computation in Multi-Server NOMA-MEC System via Reinforcement Learning[J]. IEEE Access, 2020, 8: 112762-112771.
- [12] WU Y, NI K J, ZHANG C, et al. NOMA-Assisted Multi-Access Mobile Edge Computing: A Joint Optimization of Computation Offloading and Time Allocation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12244-12258.
- [13] ZHANG X C, ZHANG J, XIONG J, et al. Energy-Efficient Multi-UAV-Enabled Multiaccess Edge Computing Incorporating NOMA[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5613-5627.
- [14] CHEN X Y, YANG Z T, ZHAO N, et al. Secure Transmission via Power Allocation in NOMA-UAV Networks With Circular Trajectory[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10033-10045.
- [15] 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.
- [16] SUN X L, YANG W W, CAI Y M. Secure Communication in NOMA-Assisted Millimeter-Wave SWIPT UAV Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3): 1884-1897.
- [17] HU G J, CAI Y M, CAI Y L, et al. Joint Optimization of Position and Jamming Power for UAV-Aided Proactive Eavesdropping Over Multiple Suspicious Communication Links[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(12): 2093-2097.
- [18] HUANG H L, SAVKIN A, WEI N W. Navigation of a UAV Team for Collaborative Eavesdropping on Multiple Ground Transmitters[J]. IEEE Transactions on vehicular Technology, 2021, 70(10): 10450-10460.



**XUE Jianbin**, born in 1973, Ph.D, professor. His main research interests include future mobile communication, communication network and system security, wireless network edge intelligence computing, IOT and ubiquitous heterogeneous networks.



**DOU Jun**, born in 1999, postgraduate. Her main research interest is secure communication for drones.