

基于最小能耗的多无人机无线网络安全数据卸载策略

崔高峰^{1,2}, 徐媛媛^{1,2}, 张尚宏^{1,2}, 王卫东^{1,2}

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要: 为了解决地面用户向多无人机边缘计算网络卸载数据时存在的地面被动窃听问题, 提出了一种通过联合优化用户匹配和资源分配使系统能耗最小化的安全数据卸载策略。考虑了系统时延、通信资源、计算资源的限制, 采用保密中断概率对数据卸载过程的安全性能进行约束。利用块坐标下降和连续凸近似算法联合优化用户发送功率、卸载因子、无人机计算资源分配、干扰功率, 并基于成对稳定的用户匹配算法最小化无人机系统总能耗。仿真数据表明, 该算法可以实现数据的安全卸载, 并且在能耗、时延等性能上优于传统策略。

关键词: 物理层安全; 边缘计算; 安全数据卸载; 连续凸近似; 成对稳定

中图分类号: TN92

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2021085

Secure data offloading strategy for multi-UAV wireless networks based on minimum energy consumption

CUI Gaofeng^{1,2}, XU Yuanyuan^{1,2}, ZHANG Shanghong^{1,2}, WANG Weidong^{1,2}

1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: To solve the problems of ground passive eavesdropping when ground users offload data to the multi-UAV(unmanned aerial vehicle) edge computing network, a secure data offloading strategy that minimized system energy consumption by jointly optimizing user matching and resource allocation was proposed. Considering the constraints of system delay, communication resources and computing resources, the probability of security interruption was used to restrict the security performance of the data offload process. By using block coordinate descent and successive convex approximation algorithm, the user transmission power, offload factor, UAV computing resource allocation and jamming power were jointly optimized. A pair-wise stable user matching algorithm was proposed to minimize the total energy consumption of UAV system. Simulation results demonstrate that the algorithm can realize the safe offloading of data, and has good performance in energy consumption and delay by comparing with the conventional strategies.

Keywords: physical layer security, edge computing, secure data offloading, successive convex approximation, pair-wise stable

1 引言

随着通信技术的飞速发展, 无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 因其灵活度高、移动性强、易部署的特点被广泛应用于通信领域, 作为地面网络的延伸, 组成空中无线网络平台。一方面, 无人

机的移动部署特性弥补了传统地面网络在部署时受地形因素影响的局限性, 使通信服务逐渐全域化; 另一方面, 相比于地面无线通信网络信道存在严重的路径损耗、阴影和多径衰落, 无人机与地面之间的无线通信信道具有强烈的视距特性^[1], 这为无人机提供高质量的通信服务奠定了基础。目前,

收稿日期: 2020-08-28; 修回日期: 2020-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61971054, No.61601045)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61971054, No.61601045)

支持无人机的空中无线网络平台主要有无人机基站平台^[2]、数据收集平台^[3]、中继平台^[4-5]、边缘计算平台^[6]等。

近年来,多无人机边缘计算平台成为国内外研究人员关注的热点。由于机器学习、深度学习、虚拟现实等技术的不断兴起^[7],移动端需要处理的计算量迅速增大,但由于其计算能力有限,移动设备很难在用户可接受的服务时延内完成计算任务。因此,移动边缘计算(MEC, mobile edge computing)^[8]应运而生,该技术将移动设备端的数据卸载至具有更强计算能力的边缘计算节点进行处理,以提高用户服务质量。多无人机组成的边缘计算网络可灵活快速组网,为用户提供高质量的数据计算服务。但该过程中无人机系统会面临能耗、时延以及网络安全3个方面的挑战。

1) 能耗问题

无人机系统的性能很大程度上受限于机载电池的容量,这给无人机系统的长时间通信带来了挑战。目前,针对能源问题的相关研究已较为成熟,文献[9-11]针对无人机支持的网络场景,通过轨迹优化和联合资源分配的方法提升系统能量效率。文献[9]通过规划无人机服务时的飞行轨迹降低服务总能耗。文献[10]通过联合优化用户调度、无人机轨迹、发射功率和带宽,最大限度地提高能效。文献[11]提出了一种通过联合优化用户匹配、功率控制、计算能力分配和位置规划来最小化无人机移动边缘计算网络能耗的数据卸载方案。以上研究重点关注能耗问题,忽略了服务过程中因数据传输时延带来的用户服务质量下降的问题。

2) 时延问题

用户数据卸载过程中的传输时延很大程度上降低了用户服务质量。针对此问题,文献[12]提出了在能耗约束和无人机轨迹约束下,通过联合优化无人机轨迹、卸载率和用户调度最小化所有用户间的最大时延之和的低时延数据卸载方案。文献[13]通过联合优化无人机位置、通信和计算资源分配以及任务分割决策最小化所有设备服务时延和无人机电耗的加权和,提出了一种节能、低时延的数据卸载方案。文献[12-13]在保证低能耗的基础上研究了降低数据卸载时延的方法,通过轨迹优化、资源分配、用户调度等策略均衡系统在时延与能效两方面的性能,提高了系统的综合服务质量。但随着大数据时代的到来,数据卸载过程中由于无线传输导

致的数据泄露等问题严重威胁用户的隐私安全,成为不可忽视的隐患。

3) 网络安全问题

无人机边缘网络的无线数据传输很容易受到干扰和窃听,使用户数据安全无法得到保障。目前,传统的无线通信安全技术主要有上层加密^[14]、鉴权等。文献[15]分析了利用传统安全技术进行安全数据卸载的方案。但这些技术存在诸多缺点^[16],例如,一方面,上层加密技术需要通信双方通过发送加密信令等方式获知加密信息和高层安全通信协议,导致传输效率下降;另一方面,对称加密技术仍需一个安全信道进行密钥交换等。物理层安全技术^[17-18]因其算法复杂度低、不需要密钥交换等优势逐渐成为研究重点,其本质就是利用无线信道的各种特殊性,将不利条件转化为有利条件,用小的开销换取网络安全性能的大幅提升。目前,应用于解决地面通信网络安全问题的物理层安全技术已逐渐走向成熟,主要有噪声、协同干扰、传输波束赋形等。其中,发送干扰噪声^[19]的方法在无人机系统中应用最广泛。

文献[20-21]分析了数据卸载场景下,利用发送干扰噪声的方法降低窃听端信噪比的安全数据卸载方案。

文献[20]分析了无人机将计算任务卸载至地面边缘计算接入节点过程中存在窃听者的场景,提出了一种联合优化卸载率、无人机发送功率和卸载时长以最小化无人机电耗的安全节能数据卸载方案。该研究充分考虑系统时延、保密容量以及无人机传输功率的限制,并且在以下2个方面进行了深入的分析:1) 窃听者类型,针对主动窃听者、位置固定的被动窃听者和位置随机的被动窃听者3种情况分别提出了相应的安全数据卸载方案;2) 卸载率,分别分析了无人机数据出现零卸载、部分卸载和全卸载3种情况。仿真结果表明,该数据卸载方案在保证低时延和保密性前提下,较传统方案具有更高的能量效率。但文献[20]的研究仅考虑了单个无人机向指定地面边缘计算接入节点卸载数据的情况,而实际场景中无人机系统一般采用多无人机组网,并且地面有多个接入节点可供无人机进行选择。由于未考虑边缘计算节点计算资源上限的影响以及无人机与地面节点间的匹配问题,该方案无法扩展至多对一卸载数据的场景。

文献[21]提出了多地面用户向多无人机边缘计

算网络卸载数据的安全数据卸载方案，并考虑了系统时延、功率、计算能力的限制，通过联合优化无人机悬停位置、用户发送功率、干扰功率、无人机计算能力、卸载率和用户匹配方案来最大化无人机最小保密容量。仿真结果表明，该方案具有较高的数据保密性。但该研究一方面忽略了数据卸载过程中无人机传输能力上限的影响，另一方面未考虑卸载方案整体的能耗问题；并且该研究分析了存在空中无人机窃听的情况，窃听信道仍为视距信道，而实际场景中窃听者多进行地面窃听，窃听信道为非视距信道，此种情况下被动窃听信道的小尺度衰落特性无法直接获知，系统的安全性能难以保证。

基于以上研究现状，本文提出一种多无人机无线网络能耗最小化的保密数据卸载方案，主要贡献如下。

1) 充分考虑了数据卸载过程中系统时延、功率、保密中断概率、计算能力、无人机传输能力的限制，在安全传输的前提下，提出了一种通过联合优化用户匹配和通信、计算资源分配以最小化无人机系统总能耗的保密节能传输方案。

2) 采用启发式搜索算法优化用户匹配方案，大大降低了匹配算法时间消耗，并利用成对稳定理论进行改进，通过交换匹配得到稳定的匹配方案，并结合资源分配联合优化系统性能（即能耗）。

2 系统模型及问题描述

2.1 系统模型

多无人机无线网络系统模型如图 1 所示。 N 个无人机作为边缘计算节点组成空中计算网络，联合处理 M 个地面用户的卸载数据。各用户需处理的任务总量为 G ，处理方式为本地图处理和卸载至无人机处理相结合。为了简化计算模型，无人机、用户和窃听者均只考虑装配一根天线，但本文中的问题研究同样适用于多根天线的场景。数据卸载过程中，由于存在被动窃听者，无人机系统采用全双工通信模式，在接收用户卸载数据的同时向窃听者发送干扰信号^[19]，同时无人机也受到剩余自干扰^[22]的影响。用户和无人机间的通信链路采用频分多址接入技术，各信道带宽为 B ，避免了不同信道间的干扰，因此本文暂未考虑不同用户卸载数据信号之间的干扰以及不同无人机发送的干扰信号间的影响^[23]。

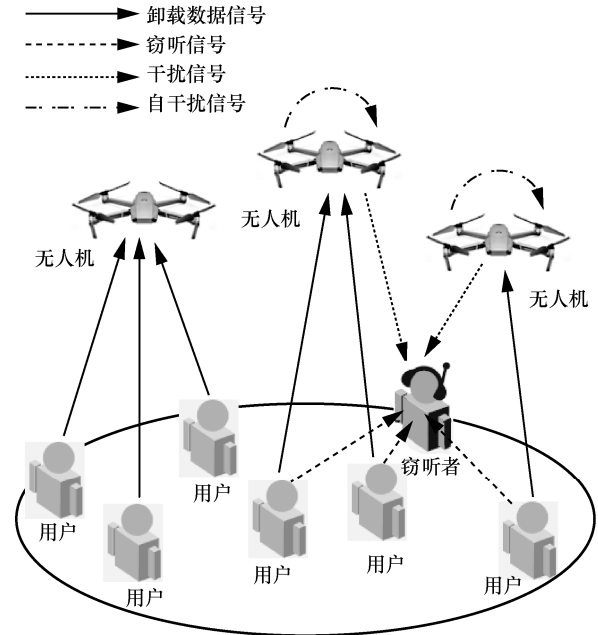


图 1 多无人机无线网络系统模型

结合实际情况，假设无人机和用户之间可以通过信道估计互相获取对方的信道状态信息和位置，而被动窃听者的信道状态信息和位置均无法获知。场景中数据卸载链路和无人机发送干扰链路均为空地之间的通信链路，根据实际情况假设为视距信道，只考虑大尺度衰落，信道增益如式(1)所示。

$$h_{n,m(l)}^{u \rightarrow s(e)} = h_0 \left(d_{n,m(l)}^{u \rightarrow s(e)} \right)^{-\gamma_0} \quad (1)$$

其中， h_0 为单位距离的信道增益， γ_0 为视距信道传播衰落指数， $d_{n,m(l)}^{u \rightarrow s(e)}$ 为无人机 n 到用户（或窃听者） $m(l)$ 的距离， u 、 s 、 e 分别为无人机、用户、窃听者， n 、 m 、 l 分别为无人机、用户、窃听者的编号。而用户与窃听者均位于地面，根据实际情况假设窃听信道为非视距信道，包含大尺度衰落和小尺度衰落。合法用户至窃听者的窃听信道的信道增益具体表示为

$$h_{m,l}^{s \rightarrow e} = h_1 \left(d_{m,l}^{s \rightarrow e} \right)^{-\gamma_1} g_{s \rightarrow e} \quad (2)$$

其中， h_1 是单位距离的信道增益； γ_1 是非视距信道的传播衰落指数； $d_{m,l}^{s \rightarrow e}$ 是地面用户到窃听者的距离； $g_{s \rightarrow e}$ 是小尺度衰落信道的信道增益，其取值服从准静态瑞利分布，累积密度函数为

$$F_{g_{s \rightarrow e}}(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (3)$$

其中， $\lambda^{-1} = E[g_{s \rightarrow e}]$ 。

1) 通信模型

用户集合用 Ω 表示, 集合中各个用户向已建立匹配关系的无人机卸载数据。每个用户只能连接一台无人机, 而一台无人机可以同时处理多个用户的卸载数据。 $a_{n,m}=1$ 表示用户 m 和无人机 n 匹配, $a_{n,m}=0$ 表示不匹配。由于卸载过程存在窃听, 因此需要对系统的安全性进行分析。一般使用保密容量指标来评估用户保密传送数据的能力, 只有当传输数据速率低于保密容量时才视为保密传输。无人机 n 和用户 m 可达到的保密容量可表示为

$$C_{n,m}^S = C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \quad (4)$$

其中, $C_{m,l}^E$ 是窃听信道的信道容量, $C_{n,m}^O$ 是合法信道的信道容量, 通常表示为

$$C_{n,m}^O = \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + r P_{n,m}^J} \right) \quad (5)$$

其中, $P_{n,m}^O$ 是用户 m 向无人机 n 卸载数据的发送功率, σ^2 是无人机接收端的噪声功率, r 是自干扰功率因子。 $C_{m,l}^E$ 主要受无人机发送的干扰功率 $P_{n,m}^J$ 影响, 具体表示为

$$C_{m,l}^E = \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{m,l}^{s \rightarrow e}}{\sigma^2 + P_{n,m}^J h_{n,l}^{u \rightarrow e}} \right) \quad (6)$$

其中, $P_{n,m}^J$ 表示无人机 n 向用户 m 发送的干扰信号的功率, $h_{m,l}^{s \rightarrow e}$ 受小尺度衰落 $g_{s \rightarrow e}$ 的影响。然而, 由于用户或无人机无法获得被动窃听者的地理位置和信道状态信息, 无法直接量化 $C_{m,l}^E$ 。为了使问题更易处理, 本文针对窃听者位置考虑了最坏的情况, 即假设窃听者位于用户附近, 最小距离为 τ 。尽管窃听者的位置信息可以假设为最坏情况, 但信道状态信息仍然无法获知, 因此无法采用保密容量指标描述无线数据卸载的保密程度。本文采用保密中断概率指标, 利用其概率不等式的特性, 对系统的安全性进行量化约束。保密中断概率限制条件为

$$\Pr \left[C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \leq C_{n,m}^{\text{th}} \right] \leq \varepsilon \quad (7)$$

其中, $C_{n,m}^O > C_{n,m}^{\text{th}}$, $C_{n,m}^{\text{th}}$ 是用户 m 期望的保密容量阈值, ε 是期望的保密中断概率上限。式(7)可以结合式(5)和式(6)进行展开, 展开后可以发现, 式(7)中的 ε 、 $C_{n,m}^{\text{th}}$, 以及用户、窃听者、无人机的位置均

为固定值, 本文通过优化 $P_{n,m}^O$ 、 $P_{n,m}^J$ 和无人机与窃听者之间的信道增益 $h_{n,l}^{u \rightarrow e}$ 来满足式(7)。其中, $h_{n,l}^{u \rightarrow e}$ 受优化变量用户匹配方案 $a_{n,m}^c$ 的影响, 接收用户卸载数据的无人机在数据传输时向窃听者发送干扰信号, 不同无人机与窃听者之间的距离不同, 导致信道增益不同, 进而影响保密中断概率。

因此, 在用户和窃听者以及无人机位置均确定的情况下, 保密中断概率限制条件式(7)是通过 $P_{n,m}^O$ 、 $P_{n,m}^J$ 以及 $a_{n,m}^c$ 联合优化保证的。

2) 计算模型

该场景中, 数据的卸载和计算都会产生系统时延, 时延过长将直接降低用户服务质量, 因此本文对系统时延加以限制。系统中, 各用户数据一部分进行本地计算, 一部分卸载至无人机网络进行边缘计算。假设每个用户需要处理的总任务量为 G_m , 卸载因子为 β_m ($0 \leq \beta_m \leq 1$), $\beta_m G_m$ 为本地用户的计算量, 本地处理时延为

$$T_{m,1} = \frac{\beta_m G_m C}{f_s} \quad (8)$$

其中, C 是系统每计算 1 bit 数据需要的 CPU 运行周期数, f_s 是本地用户的计算能力。除本地处理的数据外, 剩余的数据卸载至无人机边缘计算节点处理。卸载数据导致系统出现的传输时延为

$$T_{m,2} = \frac{(1 - \beta_m) G_m}{C_{n,m}^O} \quad (9)$$

当无人机 n 接收到用户 m 卸载的数据时, 会为用户 m 分配计算资源 $f_{n,m}^U$, 数据计算时延为

$$T_{m,3} = \frac{(1 - \beta_m) G_m C}{f_{n,m}^U} \quad (10)$$

除了系统时延, 能耗也是无人机系统关注的重点, 本文的优化目标设置为最小化无人机系统总能耗。场景中无人机系统总能耗分为两部分: 计算能耗和发送干扰能耗。无人机 n 处理用户 m 卸载数据的能耗为

$$Q_{n,m}^C = k (f_{n,m}^U)^3 T_{m,3}, \forall m \in \Theta_n \quad (11)$$

其中, k 是功率消耗因子, Θ_n 是与无人机 n 匹配的所有用户的集合。如果用户 m 卸载数据过程中需要无人机 n 发送干扰信号协助才能进行安全传输, 干扰能耗为

$$Q_{n,m}^J = P_{n,m}^J T_{m,2}, \forall m \in \Theta_n \quad (12)$$

2.2 问题描述

本文目标是在时延、功率、保密中断概率、无人机传输能力和计算能力的限制条件下，通过联合优化用户匹配方案、用户发送功率、干扰功率、无人机计算资源分配和卸载因子以最小化无人机系统总能耗，如式(13)所示。

$$\begin{aligned}
 & \min_{a_{n,m}, P_{n,m}^O, P_{n,m}^J, f_{n,m}^U, \beta_m} \sum_n \sum_m a_{n,m} (Q_{n,m}^C + Q_{n,m}^J) \\
 \text{s.t. } & C_1 : T_{m,1} \leq T_{\text{req1}}, \quad \forall m \in \Omega \\
 & C_2 : T_{m,2} + T_{m,3} \leq T_{\text{req2}}, \quad \forall m \in \Theta_n \\
 & C_3 : \sum_{m \in \Theta_n} f_{n,m}^U \leq f_n^U, \quad \forall n \\
 & C_4 : \sum_{m \in \Theta_n} C_{n,m}^O \leq C_n^{\text{max}}, \quad \forall n \\
 & C_5 : P_{n,m}^O + k(f_s^U)^3 \leq P_S^{\text{max}}, \quad \forall m \\
 & C_6 : \Pr[C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \leq C_{n,m}^{\text{th}}] \leq \varepsilon, \quad \forall m \in \Theta_n \\
 & C_7 : \sum_{m \in \Theta_n} P_{n,m}^J + \sum_{m \in \Theta_n} k(f_{n,m}^U)^3 \leq P_n^{\text{max}}, \quad \forall n \\
 & C_8 : \sum_n a_{n,m} = 1, \quad \forall m
 \end{aligned} \quad (13)$$

其中， T_{req1} 是本地用户处理数据时延上限， T_{req2} 是卸载数据传输、处理总时延上限， f_n^U 是无人机 n 的总计算能力， C_n^{max} 是无人机 n 的最大传输容量， P_S^{max} 是本地用户的功率上限， P_n^{max} 是无人机 n 的功率上限。若用户 m 与无人机 n 匹配，则 $a_{n,m}=1$ ，否则 $a_{n,m}=0$ ，约束条件 C_8 表示一个用户只能同时连接一台无人机。式(13)所示问题为含有混合整数规划的非凸优化问题，无法直接快速求得最优解，本文提出联合优化算法解决此问题。

3 基于用户匹配和资源分配联合优化的安全数据卸载方案

式(13)所示问题中，无人机系统总能耗与 $a_{n,m}$ 、 $P_{n,m}^O$ 、 $P_{n,m}^J$ 、 $f_{n,m}^U$ 、 β_m 有关，为非凸多变量优化问题。求取非凸问题的全局最优解一方面算法难度极大，另一方面时间复杂度过高。因此，本文引入块坐标下降算法和连续凸近似 (SCA, successive convex approximation) 算法。块坐标下降算法^[24] 广泛应用于拥有多变量块的连续方程求解，在每次迭代时只优化单个变量块，而其他变量保持固定，利用该算法可以将多变量联合的非凸问题拆解，再单独考虑单变量子问题的凹凸性和求解方案，降低

了解难度。连续凸近似算法^[25] 可以通过构造凸上界/下界方程将原问题约束中的非凸约束转化为凸函数近似，然后不断迭代逼近最优解。2种算法结合即可求解式(13)。

首先，利用块坐标下降算法将式(13)分解为5个单变量子优化问题，资源分配的4个子问题采用连续凸近似算法将非凸优化问题转化为凸优化问题，联合迭代求解，具体求解方法见3.1节~3.4节；用户匹配子问题涉及整数规划，具体解决方案见3.5节。

3.1 用户发送功率优化

固定用户匹配方案、干扰功率、无人机计算资源和卸载因子，单独优化用户发送功率。目标函数和限制条件中与 $P_{n,m}^O$ 非直接相关的部分暂不加入计算。因此优化用户发送功率的子问题可表示为

$$\begin{aligned}
 & \min_{P_{n,m}^O} \sum_n \sum_{m \in \Theta_n} a_{n,m} \left(\frac{P_{n,m}^J}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + r P_{n,m}^J} \right)} \right) \\
 \text{s.t. } & C_1 : \frac{(1 - \beta_m) G_m}{C_{n,m}^O} + T_{m,3} \leq T_{\text{req2}}, \quad \forall m \in \Theta_n \\
 & C_2 : \sum_{m \in \Theta_n} C_{n,m}^O \leq C_n^{\text{max}}, \quad \forall n \\
 & C_3 : P_{n,m}^O + k(f_s^U)^3 \leq P_S^{\text{max}}, \quad \forall m \\
 & C_4 : \Pr[C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \leq C_{n,m}^{\text{th}}] \leq \varepsilon, \quad \forall m \in \Theta_n
 \end{aligned} \quad (14)$$

其中， $C_{n,m}^O$ 直接受 $P_{n,m}^O$ 影响。式(14)中，目标函数为凸函数， C_1 、 C_3 为凸限制条件， C_2 是非凸的， C_4 可以转化为凸限制条件。首先利用连续凸近似算法，通过一阶泰勒展开将 C_2 变为凸条件，再不断迭代逼近最优值。 $C_{n,m}^O$ 可以一阶泰勒展开为 \mathcal{L}_1 。

$$\mathcal{L}_1 = \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O [i] h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + r P_{n,m}^J} \right) +$$

$$\left(P_{n,m}^O - P_{n,m}^O [i] \right) \frac{B h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\ln 2 (\sigma^2 + r P_{n,m}^J + P_{n,m}^O [i] h_{n,m}^{u \rightarrow s})} \quad (15)$$

其中， $P_{n,m}^O [i]$ 表示 $P_{n,m}^O$ 进行第 i 次迭代优化时的值。

另外，由于被动窃听者的信道状态信息未知，无法直接计算保密中断概率。本文利用 $g_{s \rightarrow e}$ 的累积密度函数求解 C_4 ， $C_{n,m}^O - C_{m,l}^E$ 可整理为

$$\begin{aligned}
 & C_{n,m}^O - C_{m,l}^E = \\
 & \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + r P_{n,m}^J} \right) - \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{m,l}^{s \rightarrow e}}{\sigma^2 + P_{n,m}^J h_{n,l}^{u \rightarrow e}} \right) =
 \end{aligned}$$

$$\text{Blb} \frac{1 + \frac{P_{n,m}^O h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow s})^{-\gamma_0}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J}}{1 + \frac{P_{n,m}^O h_1 (d_{n,m}^{s \rightarrow e})^{-\gamma_1} g_{s \rightarrow e}}{\sigma^2 + P_{n,m}^J h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow e})^{-\gamma_0}}} \quad (16)$$

由 $C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \leq C_{n,m}^{\text{th}}$, 可以整理得到关于 $g_{s \rightarrow e}$ 的不等式为

$$g_{s \rightarrow e} \geq \frac{(\xi - 1) (\sigma^2 + P_{n,m}^J h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow e})^{-\gamma_0})}{P_{n,m}^O h_1 (d_{n,m}^{s \rightarrow e})^{-\gamma_1}} \quad (17)$$

其中, $\xi = 2 \frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow s})^{-\gamma_0}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right)$ 。

记式(17)不等号右侧部分为 $\mathcal{L}_2(P_{n,m}^O)$, 又因

$$F_{g_{s \rightarrow e}}(\mathcal{L}_2(P_{n,m}^O)) = \Pr[g_{s \rightarrow e} \leq \mathcal{L}_2(P_{n,m}^O)] \quad (18)$$

所以, 限制条件 C_4 等价于求解式(19)。

$$\Pr[g_{s \rightarrow e} \geq \mathcal{L}_2(P_{n,m}^O)] = 1 - F_{g_{s \rightarrow e}}(\mathcal{L}_2(P_{n,m}^O)) \leq \varepsilon \quad (19)$$

最终, 可以求得 $P_{n,m}^O$ 满足式(20)。

$$P_{n,m}^O \geq \frac{\left(1 - 2 \frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B} \right) \omega}{2 \frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B} h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow s})^{-\gamma_0} \omega + \frac{\ln \varepsilon}{\lambda} h_1 (d_{n,m}^{s \rightarrow e})^{-\gamma_1}} \quad (20)$$

其中, $\omega = \sigma^2 + P_{n,m}^J h_0 (d_{n,m}^{u \rightarrow e})^{-\gamma_0}$, 记式(20)不等号右侧记为 \mathcal{L}_3 。由式(15)和式(20), 式(14)所示问题最终转化为

$$\min_{P_{n,m}^O} \sum_n \sum_{m \in \Theta_n} a_{n,m} \left(P_{n,m}^J \frac{(1 - \beta_m) G_m}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right)} \right)$$

s.t. C_1, C_3

$$\begin{aligned} C_2 : \sum_{m \in \Theta_n} \mathcal{L}_1 &\leq C_n^{\text{max}}, \quad \forall n \\ C_4 : P_{n,m}^O &\geq \mathcal{L}_3, \quad \forall m \in \Theta_n \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)所示问题为关于用户发送功率的凸优化问题, 采用 MATLAB 中的凸优化 (CVX, convex) 工具箱可以求得最优解。

3.2 无人机干扰功率优化

固定用户匹配方案、用户发送功率、无人机分

配的计算能力和卸载因子, 单独优化干扰功率。该子问题可以表示为

$$\min_{P_{n,m}^J} \sum_n \sum_m a_{n,m} \left(P_{n,m}^J \frac{(1 - \beta_m) G_m}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right)} \right)$$

$$\text{s.t. } C_1 : \frac{(1 - \beta_m) G_m}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right)} + T_{m,3} \leq T_{\text{req}2}, \quad \forall m \in \Theta_n$$

$$C_2 : \sum_{m \in \Theta_n} \text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right) \leq C_n^{\text{max}}, \quad \forall n$$

$$C_3 : \Pr[C_{n,m}^O - C_{m,l}^E \leq C_{n,m}^{\text{th}}] \leq \varepsilon, \quad \forall m \in \Theta_n$$

$$C_4 : \sum_{m \in \Theta_n} P_{n,m}^J + \sum_{m \in \Theta_n} k (f_{n,m}^U)^3 \leq P_n^{\text{max}}, \quad \forall n \quad (22)$$

首先, 注意到目标函数是关于 $P_{n,m}^J$ 的非凸函数, 本文引入变量 $\mathcal{S}_{n,m}$, 将目标函数转化为

$$\min_{P_{n,m}^J, \mathcal{S}_{n,m}} \sum_n \sum_m a_{n,m} \mathcal{S}_{n,m} \quad (23)$$

此时目标函数变为凸函数, 令

$$\mathcal{S}_{n,m} \geq P_{n,m}^J \frac{(1 - \beta_m) G_m}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J} \right)}, \quad \forall m \in \Theta_n \quad (24)$$

但式(24)不等号右侧仍为非凸函数, 记右侧部分为 $\mathcal{L}_4(P_{n,m}^J)$, 继续使用连续凸近似理论将其进行一阶泰勒展开为

$$\mathcal{L}_4(P_{n,m}^J) = \frac{P_{n,m}^J [i] (1 - \beta_m) G_m}{\text{Blb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J [i]} \right)} + (P_{n,m}^J - P_{n,m}^J [i]) \mathcal{J}_1 \quad (25)$$

其中, \mathcal{J}_1 为

$$\mathcal{J}_1 = \frac{(1 - \beta_m) G_m}{B} \left(\frac{1}{\text{lb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + rP_{n,m}^J [i]} \right)} + \mathcal{G} \right) \quad (26)$$

而 $\mathcal{G} = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}$, ζ_1 和 ζ_2 分别为

$$\zeta_1 = \frac{rP_{n,m}^J [i] P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\ln 2 (\sigma^2 + rP_{n,m}^J [i]) (\sigma^2 + rP_{n,m}^J [i] + P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s})} \quad (27)$$

$$\zeta_2 = \left(\text{lb} \left(1 + \frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{\sigma^2 + r P_{n,m}^J [i]} \right) \right)^2 \quad (28)$$

约束条件 C_1 通过变形可以整理为

$$P_{n,m}^J \leq \frac{1}{r} \left(\frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{(1-\beta_m) G_m} - \sigma^2 \right) \frac{1}{2^{\frac{B(T_{\text{req}2} - T_{m,3})}{B}} - 1}}, \forall m \in \Theta_n \quad (29)$$

此时式(29)为凸限制条件, 符合要求。约束条件 C_3 无法直接计算得出, 同式(14)约束条件 C_4 的解决方案, 通过 $g_{s \rightarrow e}$ 的累积密度函数可以将式(22)的约束条件 C_3 整理转化为

$$(P_{n,m}^J)^2 \mathcal{A} + P_{n,m}^J \mathcal{B} + \mathcal{C} \leq 0 \quad (30)$$

式(30)实际为 $P_{n,m}^J$ 的一元二次不等式, 其中

$$\mathcal{A} = \left(1 - 2^{-\frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B}} \right) r h_{n,l}^{u \rightarrow e}, \mathcal{B} = \left(1 - 2^{-\frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B}} \right) (r \sigma^2 + \sigma^2 h_{n,l}^{u \rightarrow e}) - 2^{-\frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B}} P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s} h_{n,l}^{u \rightarrow e} - \frac{\ln \varepsilon}{\lambda} P_{n,m}^O r h_{m,l}^{s \rightarrow e}, \mathcal{C} = \left(1 - 2^{-\frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B}} \right) (\sigma^2)^2 - 2^{-\frac{C_{n,m}^{\text{th}}}{B}} P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s} \sigma^2 - \frac{\ln \varepsilon}{\lambda} P_{n,m}^O h_{m,l}^{s \rightarrow e} \sigma^2。$$

通过式(30)可知, C_3 可以化为凸限制条件。最终式(22)转化为

$$\begin{aligned} & \min_{P_{n,m}^J, S_{n,m}} \sum_n \sum_m a_{n,m} \mathcal{S}_{n,m} \\ \text{s.t. } & C_2, C_4 \\ & C_1 : P_{n,m}^J \leq \frac{1}{r} \left(\frac{P_{n,m}^O h_{n,m}^{u \rightarrow s}}{(1-\beta_m) G_m} - \sigma^2 \right) \frac{1}{2^{\frac{B(T_{\text{req}2} - T_{m,3})}{B}} - 1}}, \forall m \in \Theta_n \\ & C_3 : (P_{n,m}^J)^2 \mathcal{A} + P_{n,m}^J \mathcal{B} + \mathcal{C} \leq 0 \\ & C_5 : \mathcal{S}_{n,m} \geq \mathcal{L}_4, \forall m \in \Theta_n \end{aligned} \quad (31)$$

此时, 该子问题已经转化为凸问题, 可利用 CVX 工具箱求出最优解。

3.3 无人机计算资源优化

固定用户匹配方案、用户发送功率、无人机干扰功率和卸载因子, 单独优化无人机分配给各个用户的计算资源。该子问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \min_{f_{n,m}^U} \sum_n \sum_m a_{n,m} \left(k (f_{n,m}^U)^2 (1-\beta_m) G_m C \right) \\ \text{s.t. } & C_1 : T_{m,2} + \frac{(1-\beta_m) G_m C}{f_{n,m}^U} \leq T_{\text{req}2}, \forall m \in \Theta_n \\ & C_2 : \sum_{m \in \Theta_n} f_{n,m}^U \leq f_n^U, \forall n \end{aligned}$$

$$C_3 : \sum_{m \in \Theta_n} P_{n,m}^J + \sum_{m \in \Theta_n} k (f_{n,m}^U)^3 \leq P_n^{\text{max}}, \forall n \quad (32)$$

可以发现, 式(32)所示问题是关于 $f_{n,m}^U$ 的凸优化问题, 利用 CVX 工具箱即可求得最优解。

3.4 卸载因子优化

固定用户匹配方案、用户发送功率、无人机干扰功率和计算资源, 单独优化卸载因子。该子问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\beta_m} \sum_n \sum_m a_{n,m} \left(k (f_{n,m}^U)^2 (1-\beta_m) G_m C + P_{n,m}^J \frac{(1-\beta_m) G_m}{C_{n,m}^O} \right) \\ \text{s.t. } & C_1 : \frac{\beta_m G_m C}{f_s} \leq T_{\text{req}1}, \forall m \in \Omega \\ & C_2 : \frac{(1-\beta_m) G_m}{C_{n,m}^O} + \frac{(1-\beta_m) G_m C}{f_{n,m}^U} \leq T_{\text{req}2}, \forall m \in \Theta_n \end{aligned} \quad (33)$$

可以发现式(33)所示问题是一阶线性规划问题, 利用 CVX 工具箱可快速求得最优解。

基于前文分析可知, 4 个资源分配问题可联合迭代求解, 具体如算法 1 所示。

算法 1 连续凸近似^[26-27]优化资源分配

初始化 由匹配算法得到的匹配方案 ζ 得出 $a_{n,m}^c$, 给定初始值 $P_{n,m}^O(0), P_{n,m}^J(0), f_{n,m}^U(0)$ 和 $\beta_m(0)$, 令 $i=0$

- 1) repeat
- 2) 固定 $P_{n,m}^J(i), f_{n,m}^U(i), \beta_m(i)$, 通过解决凸问题式(21)得出 $P_{n,m}^O(i+1)$
- 3) 固定 $P_{n,m}^O(i+1), f_{n,m}^U(i), \beta_m(i)$, 通过解决凸问题式(31)得出 $P_{n,m}^J(i+1)$
- 4) 固定 $P_{n,m}^O(i+1), P_{n,m}^J(i+1), \beta_m(i)$, 通过解决凸问题式(32)得出 $f_{n,m}^U(i+1)$
- 5) 固定 $P_{n,m}^O(i+1), P_{n,m}^J(i+1), f_{n,m}^U(i+1)$, 通过解决凸问题式(33)得出 $\beta_m(i+1)$

6) 计算目标函数 (无人机系统总能耗)

$$\sum_n \sum_m a_{n,m} (Q_{n,m}^c + Q_{n,m}^j), \text{ 记为 } Q_u(i)$$

7) until 连续 N 次迭代中均满足: $|Q_u(i) - Q_u(i-1)| \leq \epsilon$; 否则 $i=i+1$, 转至步骤 1)

算法 1 中, ϵ 为收敛精度, N 为迭代稳定次数阈值。算法 1 通过优化 $P_{n,m}^O, P_{n,m}^J, f_{n,m}^U$ 和 β_m 求解目标函数 Q_u 。当连续 N 次相邻迭代计算出的 Q_u 差值小于收敛精度 ϵ 时, 认为连续凸近似算法收敛, 得到

近似最优解，即无人机系统最小能耗。

3.5 用户匹配和资源分配联合优化

通信、计算资源的优化问题在上文中已经解决，本节针对用户匹配方案的优化提出解决方案。首先，传统的用户匹配方案，例如遍历匹配，虽然可以用复杂度较低的算法求得全局最优解，但其求解运行时耗会随着系统规模的增大而急剧增大（呈指数态），这导致系统整体时延增大，用户服务质量下降。本文采用启发式搜索算法^[28-29]大幅降低运行时耗，同时求得近似最优匹配方案。其次，为了解决多对一匹配外部特性的影响，利用成对稳定理论^[30]对匹配算法进行改进，得到了稳定的匹配结果。具体匹配流程如下。

为了更加清晰地描述用户和无人机的匹配关系，利用集合 \mathcal{M} 和 \mathcal{N} 分别表示用户和无人机，其中， $m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}$ 。2 个集合之间的匹配关系用 ζ 表示，例如 $(m, n) \in \zeta$ 表示用户 m 和无人机 n 相互连接，并且该连接属于整体匹配方案 ζ 。另外，这里定义匹配方案 ζ 下的系统效用函数为

$$u(\zeta) = \sum_n \sum_m a_{n,m}^{\zeta} (Q_{n,m}^C + Q_{n,m}^J) \quad (34)$$

其中， $a_{n,m}^{\zeta}$ 可以从整体匹配方案 ζ 中获得， $a_{n,m}^{\zeta} = 1$ 表示 $(m, n) \in \zeta$ 。另外，每个用户对所有无人机都计算一个用户偏好值，组成一个偏好列表。在匹配关系 ζ 下，用户 m 对无人机 \bar{n} 的偏好值为

$$\mathcal{P}_m^{\zeta \setminus (n,m) \cup (\bar{n},m)} = Q_{\bar{n},m}^C + Q_{\bar{n},m}^J \quad (35)$$

其中， $\zeta \setminus (n,m) \cup (\bar{n},m)$ 表示用户 m 连接的无人机由 n 变为 \bar{n} ，且 $n \neq \bar{n}$ 。计算用户 m 的偏好值时，其他用户的匹配方案保持不变。每个用户根据偏好列表选择出偏好值最小（即匹配后传输数据消耗能耗最小）的无人机，此时若该无人机与原匹配方案不同，则用户向最优无人机发送连接请求。无人机对发送匹配请求的用户计算无人机偏好值，无人机偏好值为

$$\mathcal{R}_n^{\zeta \setminus (\bar{n},m) \cup (n,m)} = \sum_{m \in \mathcal{M}_n \cup \bar{m}} (Q_{n,m}^C + Q_{n,m}^J) \quad (36)$$

其中， \bar{n} 是原匹配方案中与用户 m 连接的无人机。无人机 n 选择偏好值最小的用户进行连接。但是，由于该匹配问题属于多对一匹配，匹配结果受外部性的影响并不稳定。例如，当用户 m 尝试与无人机 n 匹配时，连接同一无人机的用户的状态和数量都会对用户 m 的选择造成影响，这就是外部特性。因

此，一般很难保证多对一匹配问题的稳定性。本文采用交换匹配算法^[30]和成对稳定理论促使多对一匹配过程收敛稳定。在初始匹配方案 ζ 的条件下，交换匹配过程可以定义为

$$\zeta_{n,m}^{k,j} = \{\zeta \setminus (n,m) \setminus (k,j)\} \cup (n,j) \cup (k,m) \quad (37)$$

其中， $(n,m) \in \zeta, (k,j) \in \zeta$ ，并且 $(n,m) \neq (k,j)$ 。在给定匹配方案的条件下，通过连续凸近似算法优化通信资源得到的系统最小效用函数表示为 u_{\min} 。不存在交换匹配方案 $\zeta_{n,m}^{k,j}$ ，使式(38)成立的状态称为成对稳定状态。

$$u_{\min}(\zeta_{n,m}^{k,j}) < u_{\min}(\zeta) \quad (38)$$

因此，基于成对稳定的用户匹配方案和资源分配联合优化方法如算法 2 所示。

算法 2 基于成对稳定的用户匹配方案和资源分配联合优化算法

初始化 生成随机匹配方案 ζ

阶段 1 启发式搜索

1) while

2) 各用户按照式(35)计算的偏好值选择无人机 n^*

3) 如果 $n^* \neq n$ ，则用户向无人机 n^* 发送匹配请求

4) 各无人机按照式(36)在发送匹配请求的用户中选择用户 m^* 进行连接，并且更新匹配方案，记为 ζ_{temp}

5) 利用连续凸近似算法（即算法 1）计算 $u_{\min}(\zeta)$ 和 $u_{\min}(\zeta_{\text{temp}})$

6) if $u_{\min}(\zeta_{\text{temp}}) < u_{\min}(\zeta)$

7) 更新匹配方案， $\zeta = \zeta_{\text{temp}}$

8) else

9) break

10)end if

11)end while

阶段 2 交换匹配评估

12) repeat

13) 任意选择 2 对匹配 (n,m) 和 (k,j)

14) 根据算法 1 计算 $u_{\min}(\zeta_{n,m}^{k,j})$

15) if $u_{\min}(\zeta_{n,m}^{k,j}) < u_{\min}(\zeta)$

16) 更新匹配方案， $\zeta = \zeta_{n,m}^{k,j}$ ，转至步骤 12)

17) until $\nexists \zeta_{n,m}^{k,j} : u_{\min}(\zeta_{n,m}^{k,j}) < u_{\min}(\zeta)$

4 仿真结果

本节通过 MATLAB 仿真分析系统性能和算法的可行性及效率。假设该场景中存在一个被动窃听器，用户数 $M = 5$ ，无人机数 $N = 2$ ，并且水平位置分布在一个边长为 100 m 的正方形区域内，其余仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	含义	数值
H / m	无人机固定悬停高度 ^[31]	300
G / Mbit	用户需处理总任务量	10
B / MHz	带宽 ^[21]	1
h_0	UAV-地面单位信道增益 ^[19]	1.42×10^{-4}
γ_0	视距信道路径衰落指数	2
h_1	用户-窃听器单位信道增益	1.42×10^{-4}
γ_1	非视距信道路径衰落指数	3.5
λ^{-1}	$g_{s \rightarrow e}$ 的期望 ^[19]	1
σ^2 / dBm	噪声功率 ^[6]	-100
$P_n^{\text{max}} / \text{dBm}$	无人机功率上限	35
$P_s^{\text{max}} / \text{dBm}$	用户功率上限 ^[21]	20
f_n^U / MHz	无人机计算能力	10^4
f_s / MHz	用户计算能力	6×10^3
C	1 bit 数据所需 CPU 周期数 ^[21]	10^3
$T_{\text{req}1} / \text{s}$	本地计算时延上限	3
$T_{\text{req}2} / \text{s}$	无人机计算时延上限	7
ε	保密中断概率	[0.001, 0.1]

连续凸近似算法收敛性如图 2 所示，设置收敛精度为 10^{-3} ，迭代稳定次数阈值设为 6。可以看出，采用连续凸近似算法优化用户资源分配问题得到无人机系统最小能耗速度快，一般在进行 4 次迭代后，相邻迭代得到的系统最小能耗之差均小于收敛精度，认为算法达到收敛，得到近似最优解。实际仿真中，还将迭代稳定次数阈值扩大至 30 次，对迭代稳定性进行了进一步验证，结果表明经过 4 次迭代后算法稳定收敛至近似最优解。由此可以得出，连续凸近似算法具有较快的收敛速度并且收敛性能较稳定。

设置保密中断概率上限为 0.1。无人机系统最小能耗随用户任务量的变化如图 3 所示，用户本地计算量有限且固定不变，随着用户任务量逐渐增大，用户向无人机卸载的数据量逐渐增大，导致无人机系统最小能耗逐渐增大。另外，通过连续凸近

似算法联合优化用户发送功率、无人机干扰功率、计算资源分配和卸载因子 4 个资源量得到的无人机系统最小能耗小于固定任一变量联合优化其余 3 个资源量得到的系统最小能耗。尤其当固定无人机分配给各用户的计算资源时的系统最小能耗远大于联合优化 4 个变量的最小能耗。随着任务量的增大，三资源量联合优化算法（除固定无人机分配计算能力优化算法）得到的无人机系统最小能耗与联合优化 4 个资源量得出的值差距逐渐增大，可见当任务量增大时，联合优化四资源量的算法性能更优。

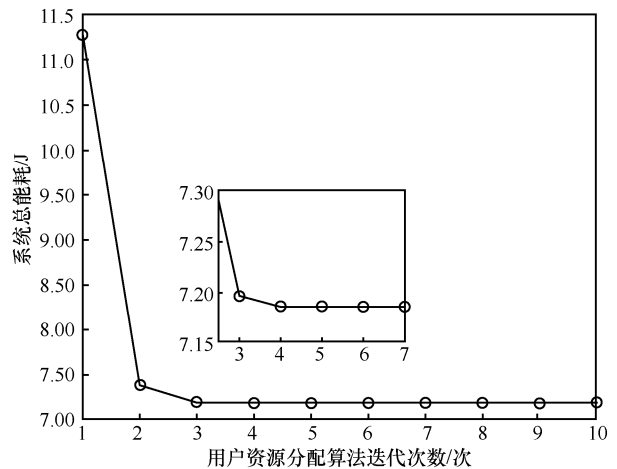


图 2 连续凸近似算法收敛性

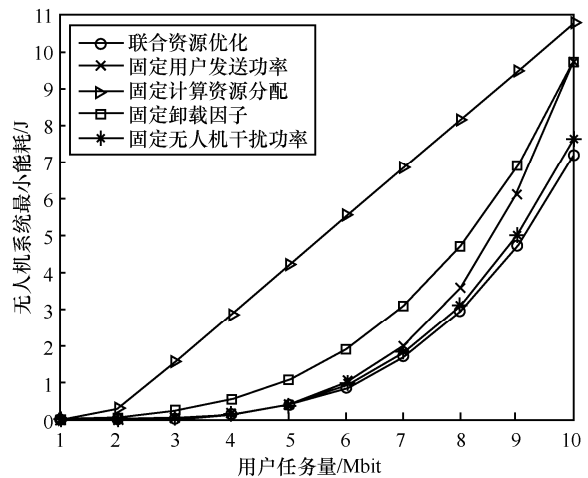


图 3 无人机系统最小能耗随用户任务量的变化

目标保密容量阈值、保密中断概率对无人机系统干扰信号总功率的影响如图 4 所示。当保密中断概率不变时，随着目标保密容量阈值的增加，为了满足系统安全传输要求，无人机向用户发送干扰信号的总功率不断增大。当目标保密容量阈值不变，保密中断概率阈值减小时，系统安全传输的要求提

高，无人机干扰信号总功率提高，以保证数据的安全卸载。随着可保证的保密中断概率由 0.1 降至 0.001，目标保密容量阈值由 3 Mbit/s 上升至 3.6 Mbit/s，系统的保密要求提高，归一化无人机系统干扰信号总功率由 0.283 5（三维图最低点）上升至 1（三维图最高点），由此可以看出，适当提高无人机发送干扰的功率有助于系统进行更为严格的保密传输，提升网络安全性能。

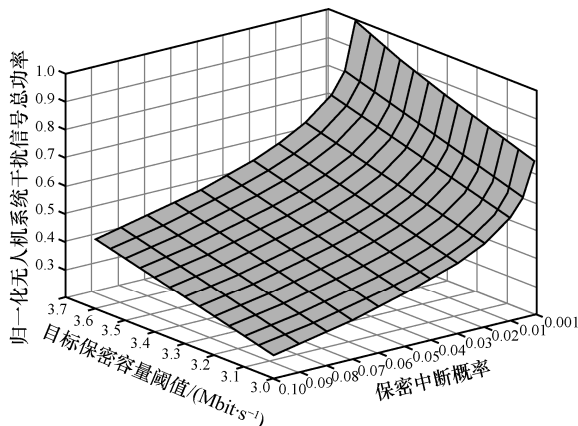


图 4 目标保密容量阈值、保密中断概率对无人机系统干扰信号总功率的影响

算法性能与系统规模（用户数量）的关系如图 5 所示。首先固定用户匹配方案均采用随机匹配算法，用户采用资源平均分配方案得出的系统最小能耗远大于采用连续凸近似联合优化得出的系统最小能耗，这说明在用户匹配方案固定时，算法 1 可以大幅降低系统能耗。当用户资源固定采用连续凸近似算法联合求解时，用户匹配方案采用基于成对稳定的匹配算法得出的系统最小能耗与采用遍历算法求解的系统最小能耗极其近似，这验证了基于成对稳定的匹配算法的收敛性和稳定性。

同时，随着用户数量的增加，随机匹配方案与基于成对稳定的匹配方案（两者均结合连续凸近似算法联合优化用户资源分配）得出的最小无人机系统最小能耗差距逐渐增大。这说明随着系统规模增大，本文提出的联合优化算法（算法 2）的性能优势越明显。

算法运行时长随用户数量的变化如图 6 所示。2 种算法用户资源均采用连续凸近似联合优化，随着用户数量的增加，遍历得出最优匹配方案的算法运行时间（运行软件为 MATLAB R2018b，Windows10 操作系统，内存为 4 GB，CPU 为 2.2 GHz）呈指数

增加。而本文提出的基于成对稳定的用户匹配方案（算法 2）运行时间增长缓慢，当用户数量达到 10 时，遍历匹配方案的时耗近似是基于成对稳定匹配方案的 6 倍，这说明算法 2 的时间复杂度较全局遍历算法大大降低。虽然算法 2 得出的是近似最优解而非全局最优解，但近似最优解与全局最优解极其近似（如图 5 所示），算法 2 用极小的精确度换取了复杂度的大幅降低，也就是时间消耗上的优势。

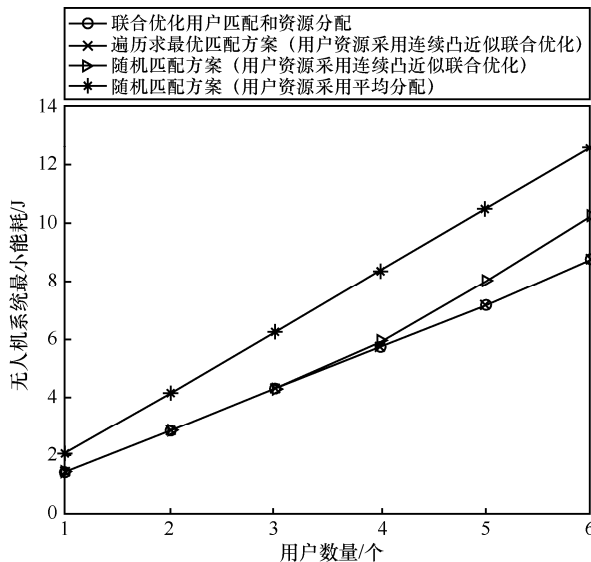


图 5 算法性能与系统规模（用户数量）的关系

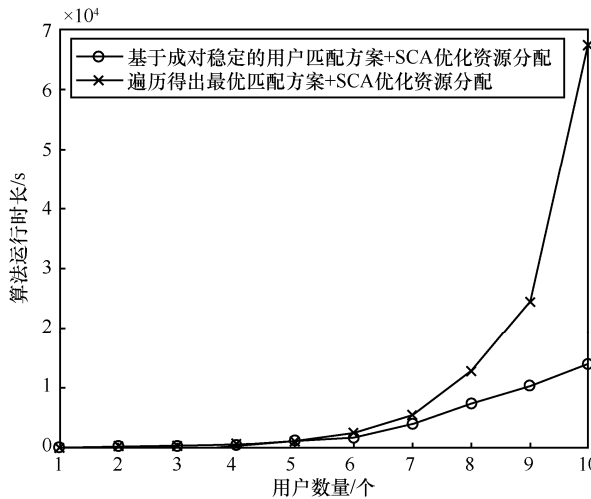


图 6 算法运行时长随用户数量的变化

5 结束语

为了解决多无人机支持的边缘计算过程中由于存在被动窃听者导致的信息泄露问题，在窃听信道状态信息未知的情况下，本文采用物理层安全技

术, 提出了一种地面用户向无人机安全卸载数据的节能传输方案, 并且充分考虑系统时延、通信和计算资源的限制, 通过基于成对稳定的用户匹配和资源分配联合优化以最小化无人机系统总能耗。仿真结果表明, 本文所提算法可以实现在保障系统安全指标的前提下, 以最小的无人机能耗完成边缘计算任务。同时, 算法收敛速度快且稳定, 随着系统规模增大, 在时耗和能耗方面都优于对比算法。后续工作将会针对更复杂的多无人机边缘计算网络场景, 考虑用户非频分多址接入的情况, 重点研究其他无人机发送的干扰信号对于数据卸载合法信道容量的影响, 进一步扩展联合优化迭代算法, 使其适用于更多以及更复杂的网络场景。

参考文献:

- [1] WU Q Q, MEI W D, ZHANG R. Safeguarding wireless network with UAVs: a physical layer security perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(5): 12-18.
- [2] ALZENAD M, EL-KEYI A, LAGUM F, et al. 3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(4): 434-437.
- [3] ZHANG B, LIU C H, TANG J, et al. Learning-based energy-efficient data collection by unmanned vehicles in smart cities[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(4): 1666-1676.
- [4] ZHAN P C, YU K, SWINDLEHURST A L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 2068-2085.
- [5] 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.
- [6] ZHOU F H, HU R Q, LI Z, et al. Mobile edge computing in unmanned aerial vehicle networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(1): 140-146.
- [7] FAN L Y, YAN W, CHEN X H, et al. An energy efficient design for UAV communication with mobile edge computing[J]. *China Communications*, 2019, 16(1): 26-36.
- [8] PATEL M, NAUGHTON B, CHAN C, et al. Mobile-edge computing introductory technical white paper[R]. Mobile-edge Computing (MEC) Industry Initiative, (2014-09-18)[2020-08-28].
- [9] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [10] ZENG F Z, HU Z Z, XIAO Z, et al. Resource allocation and trajectory optimization for QoE provisioning in energy-efficient UAV-enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7634-7647.
- [11] YANG Z H, PAN C H, WANG K Z, et al. Energy efficient resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4576-4589.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] CENTONZE P. Security and privacy frameworks for access control big data systems[J]. *Computers, Materials and Continua*, 2019, 59(2): 361-374.
- [15] RAYAN R, RAMALAVANYA R. A survey on secure data offloading using auction based mechanism[C]//2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication. Piscataway: IEEE Press, 2017: 335-341.
- [16] YAO Y J, ZHOU W Y, HUANG L. Joint antenna selection and cooperative communication design with physical layer security[C]//2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2016: 514-519.
- [17] LI B, FEI Z S, ZHOU C Q, et al. Physical-layer security in space information networks: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 33-52.
- [18] MA J, SHRESTHA R, ADELBERG J, et al. Security and eavesdropping in terahertz wireless links[J]. *Nature*, 2018, 563(7729): 89-93.
- [19] MIAO J S, ZHENG Z Y. Cooperative jamming for secure UAV-enabled mobile relay system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 48943-48957.
- [20] BAI T, WANG J J, REN Y, et al. Energy-efficient computation offloading for secure UAV-edge-computing systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 6074-6087.
- [21] 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.
- [22] 刘毅, 吴炯, 杨普, 等. 面向 OFDM 的同时同频全双工双向高谱效中继方案[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(2): 402-408.
- [23] LIU Y, WU J, YANG P, et al. High spectrum efficiency full-duplex two-way relay scheme for OFDM[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, 41(2): 402-408.
- [24] XU D, ZHU H B. Secure transmission for SWIPT IoT systems with full-duplex IoT devices[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(6): 10915-10933.
- [25] BECK A, TETRUASHVILI L. On the convergence of block coordinate descent type methods[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2013, 23(4): 2037-2060.
- [26] RAZAVIYAYN M. Successive convex approximation: analysis and applications[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2014.
- [27] WU Q Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109-2121.
- [28] 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.

- [28] PLIATSIOS D, SARIGIANNIDIS P. Resource allocation combining heuristic matching and particle swarm optimization approaches: the case of downlink non-orthogonal multiple access[J]. Information, 2019, 10(11): 336.
- [29] EDELKAMP S, SCHRDL S. Heuristic search: theory and applications[M]. California: Morgan Kaufmann, 2011.
- [30] BODINE-BARON E, LEE C, CHONG A, et al. Peer effects and stability in matching markets[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6982: 117-129.
- [31] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Drone small cells in the clouds: design, deployment and performance analysis[C]//2015 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.

[作者简介]



崔高峰(1987-)，男，河南驻马店人，博士，北京邮电大学副教授、博士生导师，主要研究方向为空天通信、卫星通信、卫星网络资源管理。



徐媛媛(1996-)，女，天津人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为卫星通信、卫星网络资源管理、强化学习等。



张尚宏(1993-)，男，河南郑州人，北京邮电大学博士生，主要研究方向为卫星通信、卫星网络资源管理、5G 通信等。



王卫东(1967-)，男，内蒙古包头人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为卫星通信、移动通信、物联网等。