

无人机辅助智能反射面系统的安全通信策略

郭宇新, 贾向东, 李月

(西北师范大学计算机科学与工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 智能反射面(RIS)被认为是未来无线通信技术中具有潜力的技术之一。无人机(UAV)也因其独特优势在无线通信领域日益受到关注。然而,随着通信环境的日益复杂化,信息传输面临着日益严峻的窃听风险,RIS与UAV的结合则为未来无线通信领域开辟了新的解决路径与可能性。为此,提出一种基于RIS-UAV的保密无线通信系统。该系统利用UAV的灵活性和RIS的动态调整能力,有效抵御潜在窃听行为。从物理层安全角度出发,该系统考虑了RIS的相移和UAV的飞行轨迹,旨在最大化系统的平均保密速率。由于该问题本质上是非凸的,因此所提解决方案将问题分解为2个子问题。首先,通过系统的特殊结构推导出相移的闭式解;其次,通过一阶泰勒展开将UAV的飞行轨迹转化为凸问题,并采用逐次凸逼近法进行迭代求解。仿真结果表明,该系统在平均保密速率方面表现良好,与基准方案相比,该系统的平均保密速率提升了约12.5%,与固定RIS和无RIS方案相比,性能也得到显著提升。此外,该方案在安全性、计算复杂度等方面也显示出明显优势,计算复杂度为 $O(MN+KN^{3.5})$ 。

关键词: 智能反射面;无人机;轨迹优化;无源波束形成;物理层安全

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0070720

Security Communication Strategy for UAV-Assisted Reconfigurable Intelligence Surface System

GUO Yuxin, JIA Xiangdong, LI Yue

(School of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

【Abstract】 Reconfigurable Intelligence Surface (RIS) is a promising technology for future wireless communication. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are gaining increasing attention in the field of wireless communications because of their unique advantages. However, with the increasing complexity of communication environments, information transmission faces increasingly severe eavesdropping risks, and the integration of RIS with UAV opens new solutions and possibilities for the future of wireless communications. Motivated by this opportunity, this paper proposes a secure wireless communication system based on RIS-UAV. The system leverages the flexibility of UAVs and the dynamic adjustment capabilities of RIS to effectively counter potential eavesdropping behavior. From the perspective of physical layer security, the system considers the phase shift of RIS and flight trajectory of UAVs, aiming to maximize the average security rate of the system. Because the problem is inherently nonconvex, the solution decomposes it into two sub-problems. First, a closed-form solution of the phase shift is derived from the unique structure of the system. Subsequently, the UAV flight trajectory is converted into a convex optimization problem via first-order Taylor expansion, and the iterative convex approximation method is used for the iterative solution. In simulations, the average secrecy rate of the proposed system increases by approximately 12.5% compared with the benchmark scheme. This performance is a significant improvement compared with those of the fixed RIS and no-RIS schemes. Additionally, this system demonstrates unique advantages in terms of security and computational complexity, with a computational complexity of $O(MN+KN^{3.5})$.

【Key words】 Reconfigurable Intelligence Surface (RIS); Unmanned Aerial Vehicle (UAV); trajectory optimization; passive beamforming; physical layer security

0 引言

随着科技不断进步,无线通信网络也随之日益成熟。然而,由于无线通信的开放性和广播性,

信号的安全传输问题越来越受到关注。智能反射面(RIS)具有低功耗、高能效以及能够重构传输环境等特点^[1],既能安置在室内,也能安置于室外,其原理是通过改变表面关键电磁特性来控制电磁

基金项目: 国家自然科学基金(62261048)。

作者简介: 郭宇新,女,硕士研究生,主研方向为无线通信、无人机辅助通信;贾向东(通信作者),教授、博士后;李月,硕士研究生。

收稿日期: 2024-12-17

修回日期: 2025-02-28

E-mail: jiaxd@nwnu.edu.cn

波传播,动态操控传播环境,从而提升无线通信质量。RIS 由众多独立可控的无源元件构成,重新发射入射波时不会产生额外噪声^[2]。因此,网络监测到窃听者(Eve)或非法用户时,RIS 能通过软件控制智能化地调节入射信号的幅度和相位,合理设计 RIS 相移可增强有用信号、消除干扰信号,且无需额外高功耗,提升通信系统的安全传输能力^[3-4]。为解决用户(User)信息传输的安全问题,将 RIS 融入环境成为了受欢迎的解决方案。文献[5]介绍了 RIS 辅助上行链路安全通信,通过联合功率控制和无源波束形成设计最大化系统安全保密速率。文献[6]阐述了如何通过交替优化算法和人工噪声辅助传输来提升保密性。文献[7]介绍了 RIS 部署策略,实现总速率最大化。目前,大多数研究中 RIS 主要固定在建筑物表面,导致服务范围存在盲区,限制了实际应用和无线通信系统性能。无人机(UAV)凭借其自身特性在航空摄影、灾害救援、巡检等多个军民领域迅速发展^[8]。近年来,UAV 利用其广泛的覆盖范围和视距(LoS)传输的优势,在移动通信领域扮演了重要角色^[9]。UAV 能够作为移动中继^[10],与地面 User 协同工作,提升网络吞吐量^[11];同时,UAV 也能充当移动基站(Alice)^[12-13],根据需求进行部署,支持快速通信。

然而,随着无线通信技术的快速发展,信息传输的安全性问题日益凸显。RIS 和 UAV 的结合为解决这一问题提供了新的思路。例如,文献[14]通过联合设计 RIS 相位偏移、UAV 飞行轨迹和发射功率,提升了系统的吞吐量。文献[15]通过对主被动波束成形技术的联合优化,实现了 User 传输速率的最大化。文献[16]提出一种 RIS 赋能的 UAV 边缘计算任务卸载方案,通过联合优化任务分配、User 发射功率、RIS 相移矩阵、UAV 计算资源分配以及 UAV 轨迹,最大化用户的最小平均数据吞吐量。文献[17]研究了空中 RIS 辅助边缘计算中的部分任务卸载方案,应用空中 RIS 来增强地面 User 卸载链路质量。为了最小化 User 的总能耗,提出一种基于近端策略优化与连续凸逼近 SCA 的任务卸载算法,用于联合优化 RIS 相移、传输功率、UAV 高度、任务卸载策略以及时隙分配策略。尽管 RIS 和 UAV 在无线通信中的应用已经得到了广泛的研究,但现有研究仍存在局限性。首先,在现有研究中,虽然涉及了空中 RIS,但其主要关注系统性能的提升,忽视了信息传输过程中的安全性问题,例如窃听攻击和数

据泄露风险;其次,即使现有研究对系统安全性进行研究,但 RIS 主要固定在建筑物表面,在复杂环境下仍难以应对动态变化的窃听威胁,未能充分挖掘 RIS 在动态环境中的潜力。

基于以上文献的启发,本文将进一步探讨 RIS-UAV 系统在安全通信中的应用,特别是在复杂的通信环境中,如何有效抵御潜在的窃听行为,确保信息传输的安全性,是一个亟待解决的关键问题。本文提出一种基于 RIS-UAV 的保密无线通信系统,旨在通过联合优化 RIS 相移和 UAV 飞行轨迹,最大化系统的平均保密速率。具体来说,本文的主要贡献如下:

1)提出一种 RIS-UAV 系统,其中 UAV 携带 RIS 在固定高度飞行,向 User 传输机密信息,同时避免 Eve 的窃听。为实现平均保密速率的最大化,本文对 RIS 相移矩阵和 UAV 飞行轨迹展开联合优化工作。

2)由于所提出的问题是而非凸的,难以直接获得最优解。为解决此问题,本文把初始问题拆解为 RIS 相移优化以及 UAV 飞行轨迹优化这两个子问题。对于相移优化,本文通过计算得出闭式解。对于飞行轨迹优化,本文使用 SCA 来获取近似最优解,最终,设计一种低复杂度的迭代算法来达到收敛效果。

3)实验结果表明,本文所提出的方案在提升系统平均保密速率方面成效显著,展现出了出色的收敛特性。

1 系统模型

1.1 系统模型与假设

在城市复杂通信环境中,本文构建了一个 RIS-UAV 安全无线通信系统。该系统包括一个 Alice、一个配备 RIS 的 UAV、一个单天线合法 User 以及一个 Eve。Alice 利用 RIS-UAV 系统向合法 User 传输机密信息,同时防范 Eve 的持续窃听。如图 1 所示,Alice、User 和 Eve 位于地面,水平位置分别为 $q_a = \{x_a, y_a\}^T$, $q_u = \{x_u, y_u\}^T$ 和 $q_b = \{x_b, y_b\}^T$,其中 Alice 的高度设置为 H_a 。本文假设 UAV 在有限的飞行时间 T 内以固定高度 H_0 在水平面上飞行,飞行时间被划分为 N 个时隙,其中用 δ 表示时隙的宽度。由于 δ 较小,可以假设在每个时隙内 UAV 的位置和 RIS 的相位保持不变。在每个时隙开始时,系统会收集信道状态信息(CSI)、UAV 的当前位置、速度信息以及 RIS 相移。

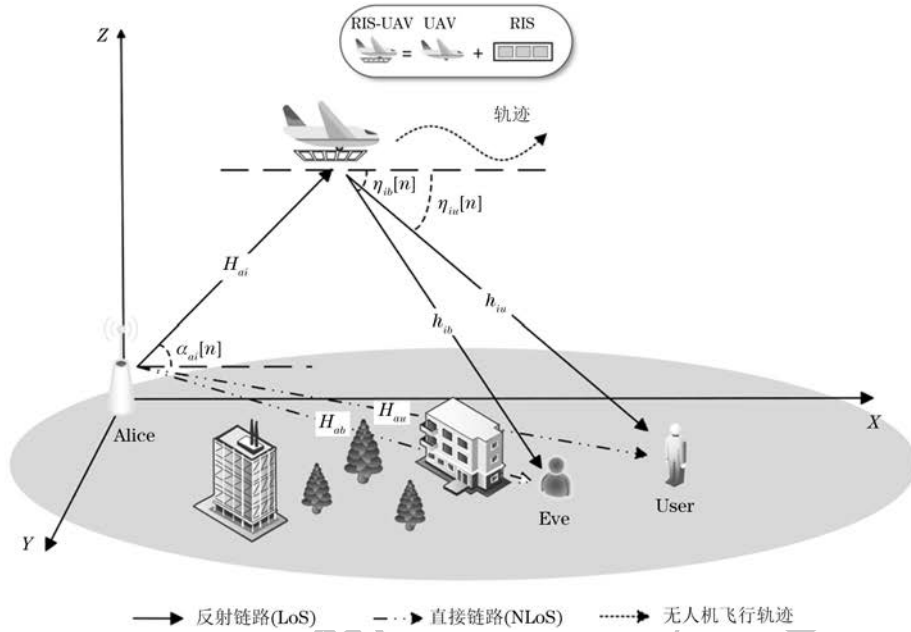


图 1 RIS-UAV 安全无线通信系统

Fig.1 RIS-UAV secure wireless communication system

在 N 个时隙内, UAV 的水平坐标定义为 $q[n] = \{x[n], y[n]\}^T, n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。则 $q[n]$ 应该满足:

$$\|q[n+1] - q[n]\| \leq D, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$\|q[1] - q_0\| \leq D \quad (2)$$

$$\|q_F - q[N]\| \leq D \quad (3)$$

式中: q_0 和 q_F 分别表示 RIS-UAV 的初始坐标和最终坐标; $D = v_{\max} \delta$ 表示在一个时隙内最大飞行距离, $v_{\max}$ 表示 UAV 的最大飞行速度。

假设 RIS 由 M 个无源反射元件构成, 这些元件排列成一个均匀的线性阵列。RIS 配备了一个控制器, 该控制器能够智能调节每个单元的相移, 以协调 Alice 和 RIS 进行信道采集和数据传输^[18]。那么, 第 n 个时隙中 RIS 的相移矩阵为:

$$\Theta[n] = \text{diag}(\gamma_1[n], \gamma_2[n], \dots, \gamma_M[n]) \quad (4)$$

式中: $\gamma_m[n] = \rho_m e^{j\theta_m[n]}, \forall m \in M = \{1, 2, \dots, M\}$ 是通过控制器控制的独立反射系数, $\theta_m[n] \in [0, 2\pi)$ 和 $\rho_m \in [0, 1]$ 分别表示第 n 个时隙中第 m 个单元的相移和振幅。为了实现最大反射功率收益, 本文假设 $\rho_m = 1, \forall m$, 且 Alice/RIS 对本文所涉及的全部信道的全局 CSI 完全已知^[15, 19]。

1.2 信道模型

鉴于实际通信场景的复杂性, 不同节点间的信道建模需符合其对应的通信环境特性。由于 Alice、User 和 Eve 都部署在地面, 那么直接通信时, Alice 发出的信号会被随机反射或散射, 通过多条路径到达 User。因此, 本文假设直接链路的信

道建模遵循瑞利衰落, 则 Alice 与 User 和 Eve 之间的信道增益 $h_{au} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}, h_{ab} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 分别可以表示为:

$$h_{au} = \sqrt{\rho d_{au}^{-k}} |\tilde{h}| \quad (5)$$

$$h_{ab} = \sqrt{\rho d_{ab}^{-k}} |\tilde{h}| \quad (6)$$

式中: ρ 表示 $D_0 = 1$ m 处的信道功率增益; k 表示路径损耗指数; $\tilde{h} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 表示瑞利衰落信道增益; $d_{au} = \sqrt{H_a^2 + \|q_u - q_a\|^2}, d_{ab} = \sqrt{H_a^2 + \|q_b - q_a\|^2}$ 分别表示 Alice 到 User 和 Eve 的距离。

当 UAV 飞行至一定高度时, 由于在信号传播路径上缺乏障碍物的遮挡, 因此 UAV 与地面节点之间的通信链路可以被视为 LoS 链路^[20-21]。那么, Alice 与 RIS 之间的信道增益 $H_{ai}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 可以表示为:

$$H_{ai}[n] = \sqrt{\rho d_{ai}^{-2}} [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{a1}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d_{aM}[n]}] \quad (7)$$

式中: d 表示天线间隔; λ 表示载波波长; $\alpha_{ai}[n] = \frac{y[n] - y_a}{d_{ai}[n]}$ 表示第 n 个时隙中从 Alice 向 RIS 发送信号的到达角 (AoA) 余弦; $d_{ai} = \sqrt{(H_0 - H_a)^2 + \|q[u] - q_a\|^2}$, 表示第 n 个时隙 Alice 到 RIS 之间的距离。

类似地, 由于 RIS 到 User 和 Eve 的信号传播同样不受障碍物遮挡, 这些链路也主要表现为 LoS 链路。因此, RIS 到 User 和 Eve 的信道增益 $h_{iu}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}, h_{ib}[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 可以分别表示为:

$$h_{iu}[n] = \sqrt{\rho d_{iu}^{-\mu}[n]} \{1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\eta^{iu}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\eta^{iu}[n]}\}^T \quad (8)$$

$$h_{ib}[n] = \sqrt{\rho d_{ib}^{-\mu}[n]} \{1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\eta^{ib}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\eta^{ib}[n]}\}^T \quad (9)$$

式中: $\eta^{iu}[n] = \frac{y_u - y[n]}{d_{iu}[n]}$, $\eta^{ib}[n] = \frac{y_b - y[n]}{d_{ib}[n]}$ 分别表示从 RIS 向 User 和 Eve 发送信号的出射角 (AoD) 的余弦; $d_{iu}[n] = \sqrt{H_0^2 + \|q_u - q[n]\|^2}$, $d_{ib}[n] = \sqrt{H_0^2 + \|q_b - q[n]\|^2}$ 分别表示第 n 个时隙时 RIS 到 User 和 RIS 到 Eve 的距离。

1.3 信号模型

由于存在较为严重的路径损耗与信号衰落, 因此本文仅考虑 Alice-User 和 Alice-Eve 的直接链路以及 RIS-UAV 的反射链路。假设 Alice 采用线性传输预编码技术, User 端对应的波束形成矢量表示为 $w^{[22]}$, 则 $s = wx$ 表示 Alice 的发送信号, 其中 $x \sim \mathcal{CN}(0, 1)^{[23]}$ 。因此, 在 User 和 Eve 处接收到的信号分别表示为:

$$y_u = (h_{au} + h_{iu}^H[n]\Theta[n]H_{ai}[n])s + n_u \quad (10)$$

$$y_b = (h_{ab} + h_{ib}^H[n]\Theta[n]H_{bi}[n])s + n_b \quad (11)$$

式中: n_u 和 n_b 分别表示 User 和 Eve 处均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

在第 n 个时隙中, User 和 Eve 的可达到速率分别表示为:

$$R_u[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P |h_{au} + h_{iu}^H[n]\Theta[n]H_{ai}[n]|^2}{\sigma^2}\right) \quad (12)$$

$$R_b[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P |h_{ab} + h_{ib}^H[n]\Theta[n]H_{bi}[n]|^2}{\sigma^2}\right) \quad (13)$$

2 问题表述

本研究旨在通过联合优化 RIS 相移矩阵 $\Phi \triangleq \{\Theta[n], n \in N\}$ 和 UAV 飞行轨迹 $Q \triangleq \{q[n], n \in N\}$, 在 N 个时隙内最大化平均保密速率 $\bar{R}_{\text{sec}}[n]$, 同时需考虑 UAV 的动态特性和 RIS 的相位调整限制。因此, 问题可以表述为:

$$\text{P1: } \max_{\Phi, Q} \bar{R}_{\text{sec}}[n] = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [R_u[n] - R_b[n]]^+ \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & 0 \leq \theta_i[n] \leq 2\pi, \forall n, i \\ & \|q[n+1] - q[n]\| \leq D, n = 1, 2, \dots, N-1 \\ & \|q[1] - q_0\| \leq D \\ & \|q_F - q[n]\| \leq D \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $[z]^+ \triangleq \max(z, 0)$ 。需要注意的是, 本文目标是在确保最优性能的前提下, 省略了目标函数 P1 中的非负性约束, 因为该问题的最优解必须是非负的。尽管如此, 直接求解问题 P1 的最优解仍然是一个挑战。

3 本文算法

本文针对问题 P1 提出一种创新且高效的解决方案。首先, 考虑到问题 P1 中的非负性约束, 本文可以简化问题表述, 将其重构为以下形式:

$$\text{P2: } \max_{\Phi, Q} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_u[n] - R_b[n])$$

s. t. 式(14)、式(15)

3.1 优化 RIS 相移矩阵 Φ

首先, 本文用给定的飞行轨迹 Q 优化 RIS 相移矩阵 Φ 。如上所述, RIS 无法获得其自身与被动 Eve 之间的小规模衰落^[24]。因此, RIS 相移矩阵的优化是最大化 User 处的接收速率式(12), 那么只需最大化

$\rho \sum_{m=1}^M e^{j[\theta_m[n] - \frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)(\alpha[n] + \eta[n])]} / d_{iu}^{\mu/2}[n] d_{ai}[n]$ 。令 $f_u[n] = \sum_{m=1}^M e^{j[\theta_m[n] - \frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)(\alpha[n] + \eta[n])]}$ 是 M 个复数值之和, 因此, 当每个复值的相移等于 0 时可以最大化, 第 n 个时隙中第 m 个元素的最佳相移如式(16)所示。

$$\theta_m^*[n] = \frac{2\pi}{\lambda} d(m-1)(\alpha[n] + \eta[n]) \quad (16)$$

因此, 利用 RIS 的最佳相移, User 和 Eve 可实现的速率表示为:

$$R_u^*[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| \frac{\sqrt{\rho} |\tilde{h}|}{d_{au}^{\frac{k}{2}}} + \frac{\rho M}{d_{iu}^{\frac{\mu}{2}}[n] d_{ai}[n]} \right|^2 \right) \quad (17)$$

$$R_b^*[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| \frac{\sqrt{\rho} |\tilde{h}|}{d_{ab}^{\frac{k}{2}}} + \frac{\rho |f_b^*[n]|}{d_{ib}^{\frac{\mu}{2}}[n] d_{bi}[n]} \right|^2 \right) \quad (18)$$

式中: $f_b^*[n] = \frac{2\pi}{\lambda} d(m-1)(\eta[n] - \beta[n])$ 。

3.2 优化 UAV 飞行轨迹 Q

利用获得的最佳相移, User 和 Eve 可达到的速率可以分别重写为:

$$R_u^*[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| A + \frac{B}{d_{iu}^{\frac{\mu}{2}}[n] d_{ai}[n]} \right|^2 \right) \quad (19)$$

$$R_b^*[n] = \text{lb}\left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| C + \frac{D}{d_{ib}^{\frac{\mu}{2}}[n] d_{bi}[n]} \right|^2 \right) \quad (20)$$

式中: $A = \frac{\sqrt{\rho} |\tilde{h}|}{d_{au}^{\frac{k}{2}}}$; $B = \rho M$; $C = \frac{\sqrt{\rho} |\tilde{h}|}{d_{ab}^{\frac{k}{2}}}$; $D = \rho |f_b^*[n]|$ 。

则 UAV 轨迹设计子问题表示为:

$$\text{P3: } \max_Q \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_u^*[n] - R_b^*[n])$$

$$\text{s. t. } \|q[n+1] - q[n]\| \leq D, n=1, 2, \dots, N-1$$

$$\text{P4: } \max_{Q, u, b, s} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| A + \frac{B}{u^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} \right|^2 \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| C + \frac{D}{b^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} \right|^2 \right) \right]$$

$$\text{s. t. } d_{iu}[n] \leq u[n], \forall n$$

$$d_{ib}[n] \leq b[n], \forall n$$

$$d_{ai}[n] \leq s[n], \forall n$$

$$\|q[n+1] - q[n]\| \leq D, n=1, 2, \dots, N-1$$

$$\|q[1] - q_0\| \leq D$$

$$\|q_F - q[N]\| \leq D$$

(22)

(23)

SCA 方法^[25]作为解决非凸问题并将其转化为凸问题的有效手段,可以用来获取原问题的近似解。该方法通过迭代更新,从当前迭代点和获得的代理函数的解导出下一个迭代点。特别是,在点 $u_0 =$

$$R_u^*[n] = \text{lb} \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left(A^2 + \frac{2AB}{u^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} + \frac{B^2}{u^{\mu}[n] s^2[n]} \right) \right) \geq \text{lb} A_0[n] + \frac{B_0[n]}{A_0[n] \ln 2} (u[n] - u_0[n]) +$$

$$\frac{C_0[n]}{A_0[n] \ln 2} (s[n] - s_0[n]) - u^2[n] \leq u_0^2[n] - 2u_0[n]u[n] - s^2[n] \leq s_0^2[n] - 2s_0[n]s[n]$$

式中:

$$A_0[n] =$$

$$1 + \frac{P}{\sigma^2} \left(A^2 + \frac{2AB}{u^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} + \frac{B^2}{u^{\mu}[n] s^2[n]} \right)$$

$$B_0[n] =$$

$$-\frac{P}{\sigma^2} \left(\frac{\mu AB}{u^{\frac{\mu}{2}+1}[n] s[n]} + \frac{\mu B^2}{u^{\mu+1}[n] s^2[n]} \right)$$

$$C_0[n] = -\frac{P}{\sigma^2} \left(\frac{2AB}{u^{\frac{\mu}{2}}[n] s^2[n]} + \frac{2B^2}{u^{\mu}[n] s^3[n]} \right)$$

$$\text{因此, } \text{lb} \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| C + \frac{D}{b^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} \right|^2 \right) \text{ 的下界可}$$

以为 $\frac{B_1[n]}{A_1[n] \ln 2} b[n] + \frac{C_1[n]}{A_1[n] \ln 2} s[n]$, 且 A_1, B_1, C_1 与 A_0, B_0, C_0 具有相似的形式。

那么,问题 P4 就转化为:

$$\text{P5: } \max_{Q, u, b, s} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{B_0[n]}{A_0[n] \ln 2} u[n] + \frac{C_0[n]}{A_0[n] \ln 2} s[n] - D_0[n] \right]$$

$$\|q[1] - q_0\| \leq D$$

$$\|q_F - q[N]\| \leq D$$

(21)

然而,问题 P3 仍然难以解决,因为目标函数对于变量 Q 来说是非凸的。因此,一些松弛变量 $u = \{u[n]\}_{n=1}^N, b = \{b[n]\}_{n=1}^N, s = \{s[n]\}_{n=1}^N$ 用于近似 $d_{iu}[n], d_{ib}[n], d_{ai}[n]$ 。因此,得到如下问题:

$\{u_0[n]\}_{n=1}^N, b_0 = \{b_0[n]\}_{n=1}^N, s_0 = \{s_0[n]\}_{n=1}^N$ 对问题 P4 可行时, $\text{lb} \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \left| A + \frac{B}{u^{\frac{\mu}{2}}[n] s[n]} \right|^2 \right), u^2[n], b^2[n], s^2[n]$ 的一阶泰勒展开式分别为:

$$\text{s. t. } D_0[n] \geq \frac{B_1[n]}{A_1[n] \ln 2} b[n] +$$

$$\frac{C_1[n]}{A_1[n] \ln 2} s[n]$$

$$(d_{iu}[n])^2 + u_0^2[n] - 2u_0[n]u[n] \leq 0$$

$$(d_{ib}[n])^2 + b_0^2[n] - 2b_0[n]b[n] \leq 0$$

$$(d_{ai}[n])^2 + s_0^2[n] - 2s_0[n]s[n] \leq 0$$

经过上述一系列变换,子问题(P5)已呈现为具有线性目标函数及仿射约束的形式,因此,该问题被归类为一个凸优化问题。在当前的情境下,本文可以利用诸如 CVX 凸优化工具箱^[26]这样的标准凸优化求解器对其进行有效求解。

基于上述描述,采用交替优化算法,如算法 1 所示。为了进一步评估本算法的性能,本文对比了本算法与其他常见算法(固定 RIS 方案和无 RIS 方案)的计算复杂度。固定 RIS 方案的计算复杂度主要集中在 RIS 相移的优化上,时间复杂度为 $\mathcal{O}(M^3)$ 。在无 RIS 方案中,系统仅依赖 UAV 的飞行轨迹优化来提升性能,时间复杂度为 $\mathcal{O}(N^{3.5})$ 。而本文方案将 RIS 和 UAV 相结合,优化 RIS 相移

和 UAV 轨迹的复杂度都不可忽视,那么本文总计计算复杂度为 $\mathcal{O}(NM^3 + KN^{3.5})$ 。交替优化算法框架如图 2 所示。

算法 1 求解的交替迭代算法(P2)

输入 初始化 $Q_0, \Phi_0, u_0, b_0, s_0$ 。

输出 $R_u[n], R_b[n]$ 。

Step 1 设置 $k=0$,通过使用 P2 和给定的 (Q_0, Φ_0) 设置

$\bar{R}_{\text{sec}}$;

Step 2 重复;

Step 2.1 设置 $k \leftarrow k+1$;

Step 2.2 通过求解问题 P5 更新 (Q_k, u_k, b_k, s_k) ;

Step 2.3 给定 Q_k ,通过使用获得的 Q_k 应用式(17)来更新 Φ_k ;

Step 2.4 给定 Q_k, Φ_k ,通过求解 P2 来更新 $\bar{R}_{\text{sec}_k}$;

Step 3 直到满足 $\frac{\bar{R}_{\text{sec}_k} - \bar{R}_{\text{sec}_{k-1}}}{\bar{R}_{\text{sec}_k}} \leq \epsilon$ 。

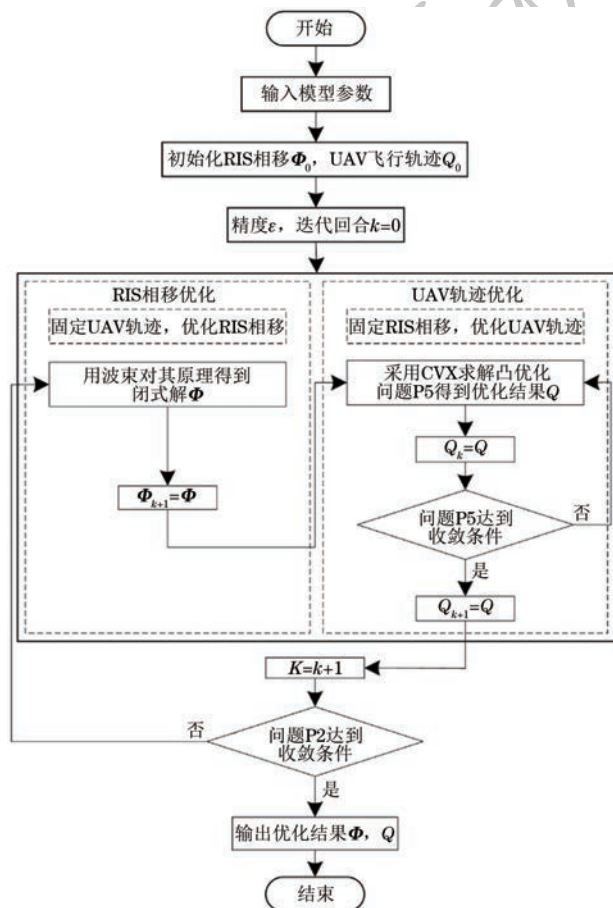


图 2 交替优化算法框架

Fig.2 Alternating optimization algorithm framework

4 仿真及数值结果

在本节中基于上述的推导分析,选取单一优化 UAV 轨迹(随机 RIS 相移)、单一优化 RIS 相移(初始 UAV 轨迹)以及固定 RIS、无 RIS 与本文方案进行对比。仿真结果和数值分析证明了所提方案的性

能。除了另有说明以外,其他关键参数如表 1 所示^[21,23,27]。

表 1 系统仿真参数及其取值

Table 1 System simulation parameters and their values

参数	取值
Alice 水平位置 q_a	(0,0)
User 水平位置 q_u	(200,0)
Eve 水平位置 q_b	(200,100)
UAV 飞行初始位置 q_0	(-500,20)
UAV 飞行终止位置 q_F	(500,20)
Alice 高度 H_a/m	20
UAV 飞行的固定高度 H_0/m	100
UAV 的最大飞行速度 $v_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	25
$D_0=1\text{ m}$ 时的信道功率增益 ρ/dB	-20
路径损耗指数 k	3.5
天线间隔 d	$\lambda/2$
方差 σ^2/dBm	-80
时隙 δ/s	1
迭代过程精度 ϵ	10^{-4}

此外,为了确保实时优化的效率,本文采取多项措施来降低计算复杂度和提高算法的收敛速度。这些措施包括选择合适的初始参数、固定 UAV 的飞行高度及引入并行计算等。实验结果表明,本文所提出的实时优化算法计算复杂度低,收敛速度快,能够满足实际 UAV 系统的实时性需求。

图 3 展示了在不同情况下 UAV 的最优飞行轨迹。在设定初始和最终位置的前提下,本方案中 UAV 在 Alice 和 User 之间往返飞行,相比没有 RIS 辅助的情况下,确保了信息传输尽可能避开窃听,从而增强了通信的安全性。实验结果表明, UAV 轨迹的选择反映了所提算法在确保通信安全方面的有效性,同时也展示了 RIS 在提升系统安全性中的重要作用。

图 4 比较了本文方案在不同 RIS 反射元件数量 M 下,发射功率与平均保密速率的关系。结果表明,系统发射功率一旦增加,平均保密速率便会随之提高。这是因为更多的发射功率可以增强合法用户的信号强度,从而提高信号与噪声比。另外,在发射功率不变的情况下,随着反射元件数量的增加,平均保密速率也会相应提升。这是因为增加反射元件数量可以增加相移矩阵的机密性,从而提高系统的保密性能。因此,当 RIS 靠近 Alice 或 User 时,可以实现最大信道增益,进一步提升保密速率。

通过调整图 5 中的 d_{AU} 展示不同方案下的平均保密速率性能。从图 5 可以观察到,随着 Alice 和 User 之间的水平距离增加,平均保密速率呈现下降

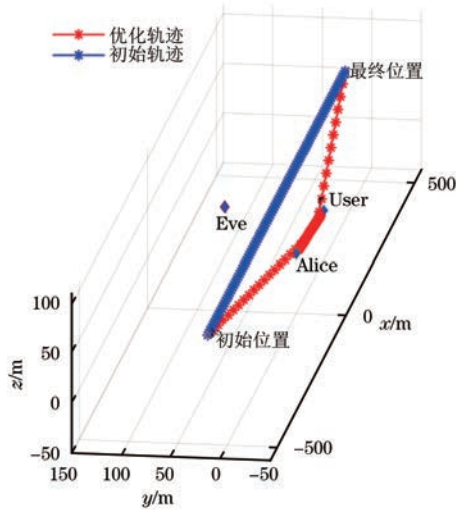


图 3 UAV 轨迹

Fig.3 UAV trajectory

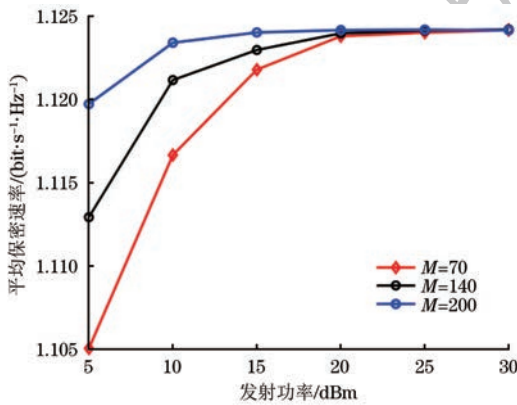


图 4 发射功率与平均保密速率关系

Fig.4 The relationship between transmission power and average secrecy rate

趋势。这一现象的原因是,随着距离的增加,UAV 在空中的飞行时间变长,从而增加了信息在传输过程中被窃听的风险。尽管如此,本文提出的方案相较于其他两种方案,仍然展现出更高的保密速率。这表明本文方案在保护信息传输安全方面更为有效,即使在较大的水平距离下也能保持较高的保密性能。

图 6 展示了不同方案下路径损耗指数对系统保密性能的影响。实验结果表明,随着路径损耗指数的增加,平均保密速率呈现出明显的下降趋势。这是因为从 UAV 到地面节点的信道增益随着路径损耗指数的增加而单调递减。较高的路径损耗指数会削弱 RIS 反射链路的信号功率,使得合法信道更容易受到窃听,进而降低系统的保密性能。此外,随着路径损耗指数的增大,相较于本文提出的方案,其他两种方案的平均保密速率下降得更快且更加不稳定。这表明在面对较高的路径损耗时,本文提出的方案具有更好的保密性能和稳定性,能够更有效地抵抗窃听。

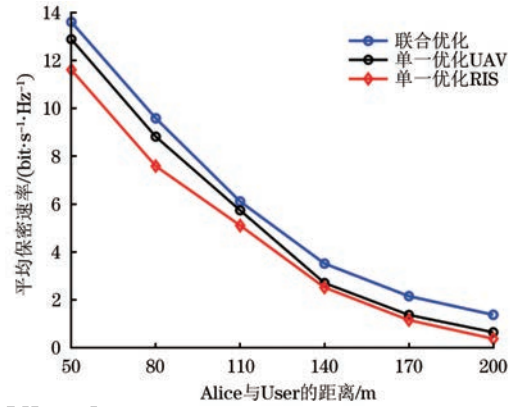


图 5 Alice 和 User 之间的水平距离与平均保密速率关系
Fig.5 The relationship between horizontal distance between Alice and User and average secrecy rate

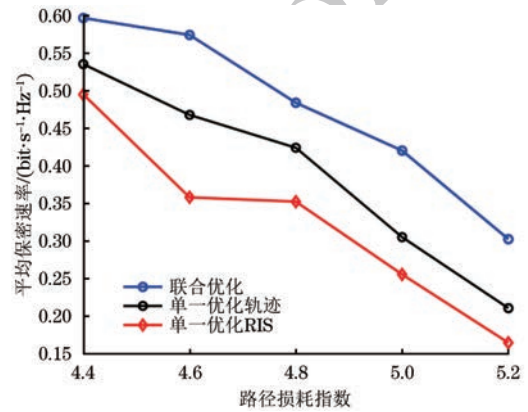


图 6 路径损耗指数与平均保密速率关系

Fig.6 The relationship between path loss index and average secrecy rate

UAV 飞行高度与平均保密速率的关系如图 7 所示。通过图 7 中 UAV 飞行高度与平均保密速率的关系,可以明显发现,存在一个最优的飞行高度范围,使得系统的平均保密速率达到最大值。具体来说,当飞行高度从 50 m 增加到 150 m 时,系统的平均保密速率显著提高,然后开始呈现下降趋势。这是因为在较低高度时,由于信号传播受到地面障碍物的影响较大,因此增加高度有助于减少遮挡,提高信道质量,从而提升平均保密速率。然而,当高度超过某一阈值后,信号传播的路径损耗随距离增加的影响逐渐占据主导地位,导致平均保密速率开始下降。这表明选择合适的飞行高度对于系统的性能至关重要。

图 8 展现了在不同优化方案下,平均保密速率随迭代次数变化的趋势。其中,固定 RIS 表示将 RIS 固定在建筑物表面,UAV 作为移动 BS;无 RIS 表示将 UAV 作为移动基站,没有 RIS。从图 8 可以看出,所有方案在经历了一定次数的迭代之后,均呈现出趋于稳定的状态,这充分证明了所提的优化算法具有优良的收敛性能。特别地,本方案在平均保密速率上明显超过了其他方案。这一优势主要归因于 RIS 的动态

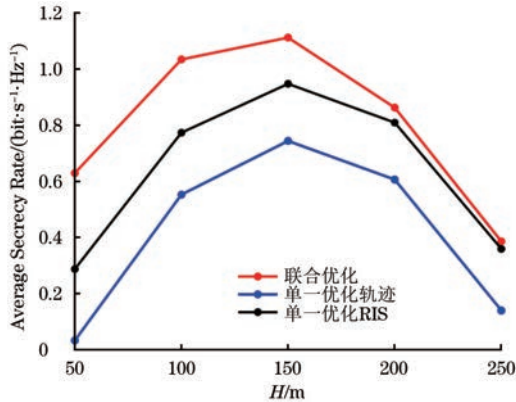


图 7 UAV 飞行高度与平均保密速率的关系

Fig. 7 The relationship between UAV flight altitude and average secrecy rate

调整能力,能有效减少由于路径损耗导致的信号衰减。同时,RIS-UAV 引入的反射信道显著提升了信道质量,从而进一步提高系统的平均保密速率。实验结果表明,通过控制 RIS 的相移和 UAV 的飞行轨迹,可以显著优化无线通信系统的性能。

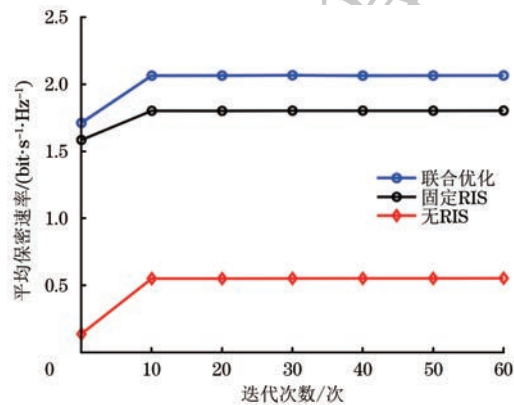


图 8 不同优化方案下的平均保密速率

Fig. 8 Average secrecy rate under different optimization schemes

图 9 呈现出了在不同优化方案下,随着发射功率的增加,平均保密速率呈现出上升趋势,这主要是因为发射功率的提升增强了系统的传输能力。本文方案的平均保密速率显著高于其他两种方案。这一现象的原因包括:固定的 RIS 无法调整其与 Alice 之间的距离,因此仅通过增加发射功率来提升性能是有限制的;在不使用 RIS 的情况下,信号会遭受大规模的路径损耗,这对信号传输质量产生了严重影响,因此即使增加发射功率,其提升效果也是有限。

图 10 展示了在不同优化方案下,系统保密速率与用户距离 d_{AU} 之间的关系。随着用户距离的增加,平均保密速率呈现出下降趋势。然而,与另外两种方案相比,本文方案的平均保密速率明显更高。这主要是因为固定 RIS 随着用户距离的增加,其反射能力会减弱;而在没有 RIS 的情况下,由于信号

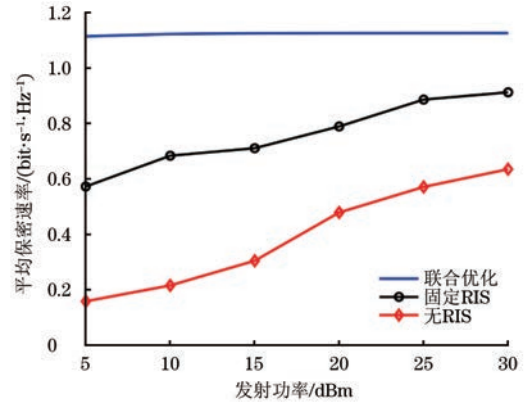


图 9 不同优化方案下发射功率与平均保密速率的关系

Fig. 9 The relationship between transmission power and average secrecy rate under different optimization schemes

本身存在较大的衰减,再加上距离增大,因此信号变得更弱,导致保密速率进一步降低。

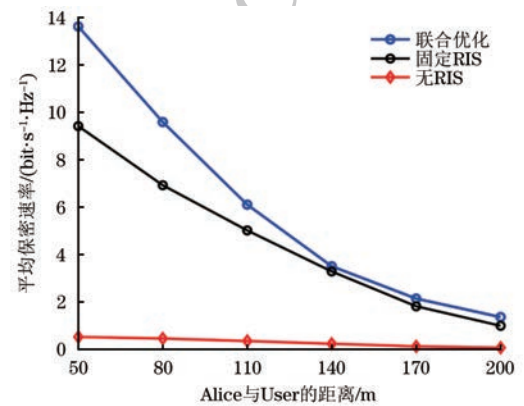


图 10 不同优化方案下 Alice 和 User 之间的水平距离与平均保密速率关系

Fig. 10 The relationship between horizontal distance between Alice and User and average secrecy rate under different optimization schemes

5 结束语

针对存在 Eve 威胁的无线地面通信网络,本文深入探讨了信息传输安全问题,并重点分析了 RIS-UAV 系统在安全性能方面的表现。通过构建 RIS 相移和 UAV 轨迹的联合优化模型,本文旨在最大化系统的平均保密速率。仿真结果表明,在相同的发射功率条件下,RIS-UAV 方案的保密速率明显优于其他对比方案。具体来说,与固定 RIS 和无 RIS 方案相比,本方案的性能优化提升了约 37.5%。从安全性指标来看,RIS-UAV 通信系统的相移设计方案能有效降低信息被窃听的风险,显著增强了系统的安全性。在计算复杂度方面,经过精心设计的算法有效控制了计算复杂度,相较于其他方案展现出更高的计算效率。这些结果证明了 RIS-UAV 系统在提升无线通信网络安全性方面的潜力和优势。

参考文献

- [1] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [2] SIDDIQI M Z, MIR T. Reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications: an overview [J]. Intelligent and Converged Networks, 2022, 3(1): 33-63.
- [3] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1838-1851.
- [4] 徐勇军, 高正念, 王茜竹, 等. 基于智能反射面辅助的无线供电通信网络鲁棒能效最大化算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2317-2324.
XU Y J, GAO Z N, WANG Q Z, et al. Robust energy efficiency maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided wireless powered-communication networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(7): 2317-2324. (in Chinese)
- [5] DONG X Q, FEI Z S, WANG X Y, et al. Joint power control and passive beamforming design for RIS-assisted secure communication systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(7): 1274-1278.
- [6] DONG L M, WANG H M. Enhancing secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7543-7556.
- [7] ZHANG S W, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multiple access: capacity region and deployment strategy [C] // Proceedings of the IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [8] LU W D, DING Y, GAO Y, et al. Resource and trajectory optimization for secure communications in dual unmanned aerial vehicle mobile edge computing systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(4): 2704-2713.
- [9] XU Y J, GUI G, GACANIN H, et al. A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: current research, future trends, and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 668-695.
- [10] TRAN D H, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Throughput maximization for backscatter- and cache-assisted wireless powered UAV technology [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 5187-5202.
- [11] 林绍福, 陈盈盈, 李硕朋. 基于深度强化学习的多无人机能量传输与边缘计算联合优化方法 [J]. 计算机工程, 2025, 51(3): 144-154.
LIN S F, CHEN Y Y, LI S P. Method of joint optimization for multi-uav energy transfer and edge computing based on deep reinforcement learning [J]. Computer Engineering, 2025, 51(3): 144-154. (in Chinese)
- [12] NIKOOROO M, BECVAR Z. Optimization of total power consumed by flying base station serving mobile users [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2022, 9(4): 2815-2832.
- [13] ZHAO Z L, PACHECO L, SANTOS H, et al. Predictive UAV base station deployment and service offloading with distributed edge learning [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(4): 3955-3972.
- [14] LIU X, YU Y F, LI F, et al. Throughput maximization for RIS-UAV relaying communications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 19569-19574.
- [15] LI S X, DUO B, YUAN X J, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: joint trajectory design and passive beamforming [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 716-720.
- [16] 李斌, 刘文帅, 谢万城, 等. 智能反射面赋能无人机边缘网络计算卸载方案 [J]. 通信学报, 2022, 43(10): 223-233.
LI B, LIU W S, XIE W C, et al. Computation offloading scheme for RIS-empowered UAV edge network [J]. Journal on Communications, 2022, 43(10): 223-233. (in Chinese)
- [17] 谢万城, 李斌, 代玥玥. 空中智能反射面辅助边缘计算中基于 PPO 的任务卸载方案 [J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 3-11.
XIE W C, LI B, DAI Y Y. PPO based task offloading scheme in aerial reconfigurable intelligent surface-assisted edge computing [J]. Computer Science, 2022, 49(6): 3-11. (in Chinese)
- [18] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [19] 周毅, 晋占齐, 石华光, 等. 空中智能反射面辅助的无线供电通信网络轨迹优化研究 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46(7): 2812-2820.
ZHOU Y, JIN Z Q, SHI H G, et al. Trajectory optimization research of wireless power communication networks assisted by aerial intelligent reflecting surface [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(7): 2812-2820. (in Chinese)
- [20] LI A, WU Q Q, ZHANG R. UAV-enabled cooperative jamming for improving secrecy of ground wiretap channel [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 181-184.
- [21] SU Y H, PANG X W, CHEN S Z, et al. IRS-UAV relaying networks for spectrum and energy efficiency maximization [C] // Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Washington D.C., USA: IEEE Press, 2022: 2834-2839.
- [22] KUMAR V, ZHANG R, DI RENZO M, et al. A novel SCA-based method for beamforming optimization in IRS/RIS-assisted MU-MISO downlink [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023, 12(2): 297-301.
- [23] HUANG C, CHEN G J, GONG Y, et al. Deep reinforcement learning-based relay selection in intelligent reflecting surface assisted cooperative networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(5): 1036-1040.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] GRANT M, BOYD S P. CVX: MATLAB Software for Disciplined Convex Programming. [EB/OL]. [2024-11-11]. <https://www.scienceopen.com/document?vid=7c23c2e6-c035-47c1-bf89-b7905c4804ce>.
- [27] CHEN X Y, CHANG Z, ZHAO N, et al. IRS-based secure UAV-assisted transmission with location and phase shifting optimization [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Washington D.C., USA: IEEE Press, 2023: 1672-1677.

文字编辑 薛晋栋
栏目编辑 宋 圆