

陈智文, 崔苗, 张广驰. 空中IRS辅助移动边缘计算的任务安全卸载研究[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(3): 111-122. doi: 10.12052/gdutxb.240077.
Chen Zhiwen, Cui Miao, Zhang Guangchi. A research on secure task offloading in MEC systems assisted by aerial IRS[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2025, 42(3): 111-122. doi: 10.12052/gdutxb.240077.

空中IRS辅助移动边缘计算的任务安全卸载研究

陈智文, 崔苗, 张广驰

(广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 空中智能反射面(Intelligent Reflecting Surfaces, IRS)结合了空中平台与IRS的优势, 具有灵活调控无线信道的能力。在移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)系统中, 物联网设备通过无线通信方式卸载计算任务。由于障碍物阻挡导致的信道衰减和无线信道的广播特性, MEC系统面临卸载速率受限和计算任务信息泄露的风险。本文提出利用空中IRS辅助MEC系统的任务安全卸载, 以解决上述问题。在该系统中, 物联网设备在分配的时隙内将计算任务卸载到MEC服务器进行计算, 空中IRS通过动态调整反射相移和位置, 为任务卸载创建安全的信道条件。本文提出一种系统资源联合优化策略, 在能量和计算需求约束下, 综合优化IRS相移、时隙分配、计算频率、发射功率和IRS位置, 以最大化物联网设备的最小安全计算速率。为解决该非凸优化问题, 本文采用块坐标下降法分解原问题, 并结合半正定松弛法和连续凸逼近法, 将非凸问题转化为可解的凸问题。仿真结果表明, 本文所提方案能有效提升MEC系统的安全计算能力。

关键词: 空中智能反射面; 移动边缘计算; 安全卸载; 智能反射面位置

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2025)03-0111-12

A Research on Secure Task Offloading in MEC Systems Assisted by Aerial IRS

Chen Zhiwen, Cui Miao, Zhang Guangchi

(School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aerial Intelligent Reflecting Surfaces (IRS) by combining the advantages of aerial platforms and IRS, have the ability to flexibly control wireless channels. In mobile edge computing (MEC) systems, Internet of Things (IoT) devices offload computational tasks via wireless communication. Due to channel attenuation caused by obstacles and the broadcast nature of wireless channels, MEC systems face the risks of limited offloading rates and information leakage. A secure task offloading scheme is proposed for MEC systems assisted by aerial IRS to address these issues. In this system, IoT devices offloaded computational tasks to the MEC server within allocated time slots, while an eavesdropper attempted to intercept the information. The aerial IRS dynamically adjusted its reflection phase shifts and position to create secure channel conditions for task offloading. A joint optimization strategy was developed to optimize IRS phase shifts, time slot allocation, computation frequency, transmit power, and IRS position under energy and computation constraints. The original non-convex problem was decomposed using the block coordinate descent method, and a combination of the semidefinite relaxation and successive convex approximation methods was applied to convert it into a solvable convex problem. Simulation results show that the proposed scheme effectively improves the secure computation capability of the system.

Key words: aerial IRS (Intelligent Reflecting Surfaces); mobile edge computing(MEC); secure offloading; IRS position

收稿日期: 2024-07-16 录用日期: 2024-09-19

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2023A1515011980, 2023A1515140003); 广东省科技计划项目(2022A0505050023, 2023A0505050127); 江西省军民融合研究院“北斗+”项目子课题资助项目(2024JXRH0Y02)

作者简介: 陈智文(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能反射面和移动边缘计算, E-mail: nanhuaczw@163.com

通信作者: 崔苗(1978-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电子信息与无线通信技术, E-mail: cuimiao@gdut.edu.cn

无线通信网络的广泛应用推动了诸多新兴智能业务场景的发展,如智能电网、无人驾驶汽车和增强现实等^[1],这对设备的计算能力和数据处理延迟提出了更高的要求。移动边缘计算(Mobile Edge Computation, MEC)作为下一代移动通信网络和物联网最有前途的技术之一,可以将云计算服务扩展到移动网络的边缘,使资源有限的物联网设备能通过无线通信的方式将部分或全部任务卸载到位于基站的MEC服务器进行计算,从而降低物联网设备的计算延迟,并节省其能耗^[2-3]。

然而,在MEC系统中,物联网设备通过无线通信方式进行任务卸载时会面临一些挑战。首先,卸载链路可能因障碍物阻挡而经历严重的信道衰减,导致卸载速率降低,从而引发计算任务的高延迟和能耗增加。其次,由于无线传输的广播特性,计算任务在卸载过程中容易被窃听^[4],存在信息泄露的风险。传统的信息加密技术虽然能够有效保障数据安全,但往往增加了计算复杂度,导致高资源消耗^[5]。对于资源受限的物联网设备而言,实施复杂的加密方案可能不可行。物理层安全技术作为一种更有效且轻量级的安全保障方案,越来越受到关注。

近年来,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)技术因其能够通过被动波束成形对无线传播环境进行智能重构^[6]而备受关注。IRS无需复杂的射频链路,具有低功耗、低成本和易于部署等优点,已成为下一代移动通信研究的热点之一。IRS通过调整其反射单元的相移,可以增强到合法接收端的信号强度,并削弱到非法窃听端的信号强度,从而有效提升通信系统的安全性能^[7]。在MEC系统中,结合IRS技术,可以使任务卸载更高效^[8-11]。文献[8]研究了IRS辅助移动设备的计算任务卸载,提出了多设备场景下的时延最小化问题。文献[9]研究了基于非正交多址的MEC系统的总能耗最小化问题。文献[10]优化了发射功率、CPU(Central Processing Unit)频率、时间分配和IRS相移,以最大化计算位数。文献[11]研究了双IRS技术和能量收集技术在MEC系统中的应用。

目前,已有一些工作研究利用IRS辅助MEC系统的安全卸载^[12-15]。文献[12]研究了利用IRS和人工噪声来提高MEC系统的安全性的问题。文献[13]利用IRS辅助MEC安全卸载,通过联合优化物联网设备的本地计算频率和发射功率、时隙分配和IRS相移,研究了安全计算速率要求下的最大最小计算效率问题。文献[14]研究了地面IRS用于无线供电移动边缘

计算系统的安全计算问题,IRS在下行链路中用于增强基站对物联网设备的无线供电,IRS在上行链路辅助任务从物联网设备到基站的安全卸载。文献[15]研究了地面IRS用于辅助区块链赋能的物联网的安全卸载,保证高要求的节点获得更强的计算资源的限制下,降低计算卸载过程的能耗。上述工作仅考虑了IRS部署在地面,然而地面IRS可能无法满足更高的安全卸载要求。因为地面IRS通常安装在建筑物的外墙上,仅对在其前半空间的设备有效^[16]。这种固定位置的IRS无法有效覆盖所有设备,设备位于IRS背面时,无法为其配置信道环境。对于远离固定位置IRS的物联网设备,无法保证其到基站的卸载速率。此外,由于复杂的城市环境,地面IRS可能难以与地面节点建立直射链路。

无人机搭载的IRS(空中IRS)凭借其灵活的机动性和广泛的覆盖范围,成为物理层安全研究的热点之一。空中IRS可以根据需求调整位置,优化信号反射路径,从而提高信号传输速率^[17]。此外,通过合理的IRS相移优化和路径规划,空中IRS能够增强通信的安全性^[18]。基于空中IRS的以上优点,本文采用空中IRS辅助物联网设备到基站的任务卸载,并防止窃听。

从地面IRS辅助MEC系统安全卸载的工作^[12-15]中可看出,IRS能显著提高MEC系统的安全性能。但是,空中IRS辅助MEC安全卸载时,空中IRS是动态的,如何优化动态IRS的位置和相移是个难题。特别是存在地面链路的情况下,无法使用常见的相位对齐法^[18]来处理IRS相移,这时需要综合考虑地面节点的位置、地面链路的相位关系。另外,在这种动态IRS辅助MEC安全卸载系统中,如何考虑满足计算需求的前提下,优化资源分配也是一个需要解决的难题。为解决上述问题,本文研究空中IRS辅助MEC系统的任务安全卸载,主要贡献如下:

(1) 在物联网设备能量有限的情况下,本文建模并研究了基于空中IRS辅助的MEC信息安全卸载系统。通过联合优化时隙分配、IRS相移、设备计算频率、发射功率和无人机轨迹(即IRS位置),旨在最大化设备最小安全计算速率。在实际应用的基础上,本文考虑了设备的计算任务需求。

(2) 为了有效求解所提出的问题,本文提出了一种基于块坐标下降(Block Coordinate Descent, BCD)的迭代算法,将原问题解耦为4个子问题,并基于连续凸逼近和半定松弛方法求解。在求解IRS位置子问题时,本文提出一种动态空中IRS位置优化方法。具

体而言,考虑了两路信号在基站和窃听者的实际相位关系,展开卸载信噪比和窃听信噪比表达式。通过引入二进制向量,确定卸载信噪比、窃听信噪比表达式各项的正负性,随后引入松弛变量并使用连续凸逼近法,将非凸的优化问题转换成凸问题。

(3) 与基准方案相比,所提方案能有效提高MEC系统的安全计算能力。此外,结果揭示了系统的安全计算能力和空中IRS的飞行时间与轨迹的折中关系。

1 系统模型

本文考虑一个空中IRS辅助MEC的任务安全卸载系统,如图1所示。它由一个集成MEC服务器的基站、一个窃听者、 K 个物联网设备(下文简称为设备)以及一个安装在无人机上的IRS(空中IRS)组成。其中基站、窃听者和设备均为单天线的地面节点,IRS由 M 个无源反射元件组成。窃听者是具备计算能力但不受信任的节点,无权访问设备与基站之间的计算任务。在本系统中,设备和基站、窃听者之间存在直射链路。设备通过上行链路将部分计算任务卸载到MEC服务器进行计算,由于无线信道的开放性,窃听者能窃取卸载的信息。为了保证卸载的安全性,本文通过无人机搭载IRS建立反射链路,利用物理层安全技术防止窃听。

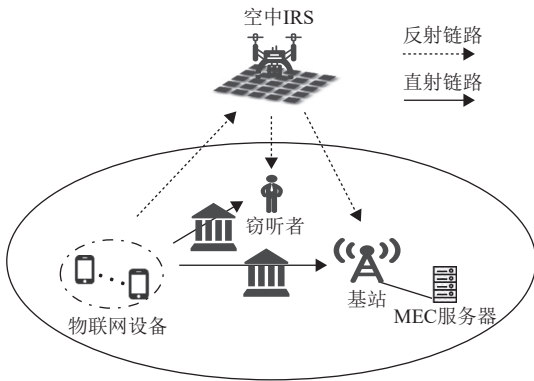


图1 系统模型图

Fig.1 System model diagram

将无人机的飞行时间 T 划分为 N 个等长的时隙,时隙长度为 $\delta=T/N$ 。为了便于表达和分析,定义时隙的集合为 $n \in \mathcal{N} \triangleq \{1, 2, \dots, N\}$,设备的集合为 $k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ 。采用三维笛卡尔坐标系,设备 k 、基站、窃听者和无人机的位置分别表示为 $[\mathbf{w}_k^T, 0]^T$ 、 $[\mathbf{w}_B^T, H_B]^T$ 、 $[\mathbf{w}_E^T, 0]^T$ 和 $[\mathbf{l}[n]^T, H_U]^T$ 。其中 H_B 为基站高度, H_U 为无人机飞行高度, $\mathbf{w}_i = [x_i, y_i]^T$, $i \in \{B, E, k\}$, $\mathbf{l}[n] = [x_U[n], y_U[n]]^T$ 。无人机的位置满足以下位移约束:

$$\|\mathbf{l}[n+1] - \mathbf{l}[n]\| \leq D, n = 1, 2, \dots, N-1$$

$$\mathbf{l}[1] = \mathbf{l}_0$$

$$\mathbf{l}[N] = \mathbf{l}_F$$

(1)

式中: $D = V_{\max} \delta$, $V_{\max}$ 为无人机的最大飞行速度, $\mathbf{l}_0$ 和 $\mathbf{l}_F$ 分别为无人机的飞行起点和终点。

IRS是由 $M = m_x m_y$ 反射元件组成的均匀平面阵列(Uniform Planar Array, UPA)。其中, m_x 和 m_y 分别为 x 轴和 y 轴方向上的元件数。在时隙 n ,假设IRS辅助设备 k 到基站的业务卸载,则IRS相移矩阵可表示为 $\boldsymbol{\Theta}_k[n] = \text{diag}(\mathbf{v}_k[n])$ 。其中 $\mathbf{v}_k[n] = [\psi_k^{(0,0)}[n], \dots, \psi_k^{(p,q)}[n], \dots, \psi_k^{(m_x-1, m_y-1)}[n]]$, $\psi_k^{(p,q)}[n] = \beta_k^{(p,q)}[n] e^{j\theta_k^{(p,q)}[n]}$; (p, q) 为元件在UPA阵列中的位置, $0 \leq p \leq m_x - 1$, $0 \leq q \leq m_y - 1$; $\beta_k^{(p,q)}[n] \in [0, 1]$ 为反射系数,为方便分析,本文中反射系数取值为1; $\theta_k^{(p,q)}[n] \in [0, 2\pi)$ 为IRS元件的相移。

定义 $P_k^{\max}$ 为设备 k 的最大发射功率,则设备 k 在时隙 n 的发射功率 $p_k[n]$ 应满足:

$$0 \leq p_k[n] \leq P_k^{\max}, \forall n, k$$

(2)

1.1 通信模型

空中IRS和地面节点之间主要以视距链路为主,作为对空中IRS辅助MEC的任务安全卸载的早期研究,为简单起见,空地信道采用视距信道模型^[19]。窃听者为被动窃听的情况,本文假设所有信道信息均已知。在时隙 n ,设备 k 到IRS的信道增益为

$$\mathbf{h}_{k,I}[n] = \sqrt{\rho d_{k,I}^{-2}[n]} \boldsymbol{\alpha}_k[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$$

(3)

式中: ρ 是单位距离的路径损耗; $d_{k,I}[n]$ 为时隙 n 设备 k 与IRS之间的距离;导向矢量 $\boldsymbol{\alpha}_k[n] = \{1, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{k,I}^{(p,q)}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{k,I}^{(m_x-1, m_y-1)}[n]}\}^T$, χ 和 λ 分别为天线间隔和载波波长; $a_{k,I}^{(p,q)}[n] = p \sin \phi_{k,I}[n] \sin \varphi_{k,I}[n] + q \cos \phi_{k,I}[n] \sin \varphi_{k,I}[n]$, $\phi_{k,I}[n]$ 和 $\varphi_{k,I}[n]$ 分别是设备 k 到IRS的到达方位角和仰角^[20]。

在时隙 n , IRS到基站、窃听者的信道增益为

$$\mathbf{h}_{I,B}[n] = \sqrt{\rho d_{I,B}^{-2}[n]} \boldsymbol{\alpha}_B[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$$

(4)

$$\mathbf{h}_{I,E}[n] = \sqrt{\rho d_{I,E}^{-2}[n]} \boldsymbol{\alpha}_E[n] \in \mathbb{C}^{M \times 1}$$

(5)

式中: $d_{I,B}[n]$ 和 $d_{I,E}[n]$ 分别为IRS到基站和窃听者的距离。导向矢量 $\boldsymbol{\alpha}_B[n]$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_E[n]$ 的表达式为

$$\boldsymbol{\alpha}_B[n] = \left\{ 1, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{I,B}^{(p,q)}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{I,B}^{(m_x-1, m_y-1)}[n]} \right\}^T$$

(6)

$$\boldsymbol{\alpha}_E[n] = \left\{ 1, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{I,E}^{(p,q)}[n]}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \chi a_{I,E}^{(m_x-1, m_y-1)}[n]} \right\}^T$$

(7)

式中: $a_{\text{I,B}}^{(p,q)}[n] = p \sin \phi_{\text{I,B}}[n] \sin \varphi_{\text{I,B}}[n] + q \cos \phi_{\text{I,B}}[n] \sin \varphi_{\text{I,B}}[n]$, $\phi_{\text{I,B}}[n]$ 和 $\varphi_{\text{I,B}}[n]$ 分别是IRS到基站的离开方位角和俯角^[20]; $a_{\text{I,E}}^{(p,q)}[n] = p \sin \phi_{\text{I,E}}[n] \sin \varphi_{\text{I,E}}[n] + q \cos \phi_{\text{I,E}}[n] \sin \varphi_{\text{I,E}}[n]$, $\phi_{\text{I,E}}[n]$ 和 $\varphi_{\text{I,E}}[n]$ 分别是IRS到窃听者的离开方位角和俯角^[20]。

假设设备与基站(窃听器)之间受到建筑物和树林的遮挡,路径衰减严重,本文采用瑞利衰落信道模型来描述地面信道。定义设备 k 到基站和到窃听者的信道增益分别为 $h_{k,B}$ 和 $h_{k,E}$,则

$$h_{k,B} = \sqrt{\rho d_{k,B}^{-\beta}} \tilde{h}_{k,B} \in \mathbb{C}^{1 \times 1} \quad (8)$$

$$h_{k,E} = \sqrt{\rho d_{k,E}^{-\beta}} \tilde{h}_{k,E} \in \mathbb{C}^{1 \times 1} \quad (9)$$

式中: $d_{k,B}$ 、 $d_{k,E}$ 分别为设备 k 到基站、窃听者的距离; β 为路径损失指数; $\tilde{h}_{k,B}$ 、 $\tilde{h}_{k,E}$ 服从均值为0、方差为1的复高斯分布。

为了避免设备间的相互干扰,采用时分多址技术进行任务卸载。在时隙 n ,设备 k 分配到的时间为 $a_k[n]\delta$,则时隙分配 $a_k[n]$ 应满足

$$\sum_{k=1}^K a_k[n] \leq 1, a_k[n] \in [0, 1], \forall k, n \quad (10)$$

假设系统带宽为 B ,在时隙 n ,设备 k 到基站的卸载速率为

$$R_{k,B}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{k,B} + \mathbf{h}_{\text{I,B}}^H[n] \boldsymbol{\Theta}_k[n] \mathbf{h}_{k,\text{I}}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \quad (11)$$

式中: σ^2 为噪声功率。设备 k 到窃听者的窃听速率为

$$R_{k,E}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{p_k[n] |h_{k,E} + \mathbf{h}_{\text{I,E}}^H[n] \boldsymbol{\Theta}_k[n] \mathbf{h}_{k,\text{I}}[n]|^2}{\sigma^2} \right) \quad (12)$$

在时隙 n ,设备 k 可实现的安全卸载速率为

$$R_k^{\text{sec}}[n] = \{R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n]\}^+, \forall k, n \quad (13)$$

式中: $\{x\}^+$ 表示 $x = \max\{0, x\}$ 。

1.2 计算模型

由于设备的计算能力和电池容量有限,它们采用部分卸载策略,将部分计算任务卸载到MEC服务器进行处理。定义 c_k 为设备 k 计算1位数据所需的CPU周期, f_k 为设备 k 的CPU计算频率。假设设备CPU采用动态电压和频率调节技术^[21],在时隙 n ,设备 k 的本地计算量为

$$l_k^{\text{loc}}[n] = \frac{f_k[n]\delta}{c_k}, \forall k, n \quad (14)$$

由于设备 k 的本地计算量受限于其最大计算能力, $f_k[n]$ 应满足以下约束:

$$0 \leq f_k[n] \leq f_k^{\text{max}}, \forall k, n \quad (15)$$

假设MEC服务器在收到每个比特数据后立即执行计算任务,并且在分配的数据上传时间 $a_k[n]\delta$ 内完成计算^[22]。由于计算结果的数据量通常远小于卸载的数据量^[23],结果回传时间省略不计。服务器的计算量不能超过其最大计算能力,因此需满足以下约束:

$$c_B a_k[n] \delta R_{k,B}[n] \leq a_k[n] \delta F_B^{\text{max}}, \forall k, n \quad (16)$$

式中: c_B 为MEC服务器计算1位数据所需的CPU周期, F_B^{max} 为服务器的最大CPU频率。

定义 Q_k 为设备 k 在每个时隙内的最低计算需求,为保证所有设备的计算需求都能得到满足,可得

$$l_k^{\text{loc}}[n] + a_k[n] \delta R_{k,B}[n] \geq Q_k, \forall k, n \quad (17)$$

设备 k 的本地计算总能耗^[24]为 $E_k^{\text{loc}} = \sum_{n=1}^N k_k f_k^3[n] \delta$,

卸载过程中的总能耗为 $E_k^{\text{off}} = \sum_{n=1}^N a_k[n] \delta p_k[n]$ 。式中: k_k 为设备 k 的有效电容系数,取决于其芯片架构^[25]。定义 E_k^{max} 为设备 k 的最大能耗预算,则本地计算和卸载的总能耗需满足:

$$\sum_{n=1}^N k_k f_k^3[n] \delta + \sum_{n=1}^N a_k[n] \delta p_k[n] \leq E_k^{\text{max}}, \forall k \quad (18)$$

1.3 问题制定

本文用安全计算速率^[22]来衡量设备的安全计算能力。定义 $\bar{R}_{k,\text{sec}}$ 为设备 k 的安全计算速率,其表达式如式(19)所示。 $\bar{R}_{k,\text{sec}}$ 越大,意味着设备 k 在计算时间 T 内平均可实现的安全计算位数越多,所以安全计算能力越好。

$$\bar{R}_{k,\text{sec}} = \frac{1}{T} \left(\sum_{n=1}^N a_k[n] \delta R_k^{\text{sec}}[n] + \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n] \right), \forall k \quad (19)$$

考虑到设备间的公平性,本文的优化目标是最大化设备最小安全计算速率,从而提高系统的整体安全计算能力。本文通过联合优化时隙分配、IRS相移、发射功率、设备计算频率和无人机轨迹来实现这一目标,优化问题表述为(P0)

$$(P0): \max_{a_k[n], p_k[n], f_k[n], \theta_k[n], l[n]} \min_k \bar{R}_{k,\text{sec}} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq p_k[n] \leq P_k^{\text{max}}, \forall k, n \quad (21)$$

$$\|I[n+1] - I[n]\|^2 \leq D,$$

$$I[1] = I_0, n = \{0, \dots, N-1\}$$

$$I_F = I[N] \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k[n] \leq 1, a_k[n] \in [0, 1], \forall k, n \quad (23)$$

$$\theta_k^{(p,q)}[n] \in [0, 2\pi), \forall k, n \quad (24)$$

$$0 \leq f_k[n] \leq f_k^{\max}, \forall k, n \quad (25)$$

$$c_B R_{k,B}[n] \leq F_B^{\max}, \forall k, n \quad (26)$$

$$\frac{f_k[n]\delta}{c_k} + a_k[n]\delta R_{k,B}[n] \geq Q_k, \forall k, n \quad (27)$$

$$E_k^{\max} \geq \sum_{n=1}^N k_k f_k^3[n]\delta + \sum_{n=1}^N a_k[n]\delta p_k[n], \forall k \quad (28)$$

在优化问题(P0)中,优化目标含有算子 $\{\cdot\}^+$,导致目标函数非连续。优化变量在优化目标(20)、约束(26)、约束(27)是高度耦合且是非线性的,难以处理。

2 问题求解

首先,解决目标函数非连续的问题。通过优化 $p_k[n]$,可以保证 $R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n] \geq 0$ 恒成立^[26]。因为当 $R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n] < 0$ 时,这里可以设置 $p_k[n] = 0$,使得 $R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n] = 0$ 。因此,可以省略目标函数中的算子 $\{\cdot\}^+$,而不影响优化结果。问题(P0)的优化目标是max-min的形式,为了方便后续处理,引入辅助变量 $R, R = \min_{\forall k} \bar{R}_{k,\text{sec}}$ 。问题(P0)可等价转换为

$$(P1): \max_{a_k[n], p_k[n], f_k[n], I[n], \theta_k[n], R} R \quad (29)$$

$$\text{s.t.} \quad (21), (22), (23), (24),$$

$$(25), (26), (27), (28)$$

$$R \leq \frac{1}{T} \left(\sum_{n=1}^N a_k[n]\delta (R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N p_k^{\text{loc}}[n] \right), \forall k \quad (30)$$

接着,为了处理优化变量耦合的问题,本文采用块坐标下降法将问题将(P1)分解为4个子问题:(1)给定 $\{a_k[n], p_k[n], f_k[n], I[n] | \forall k, n\}$,优化IRS相移;(2)给定 $\{\theta_k[n], p_k[n], f_k[n], I[n] | \forall k, n\}$,优化时隙分配;(3)给定 $\{\theta_k[n], a_k[n], I[n] | \forall k, n\}$,联合优化发射功率和设备计算频率(即资源分配);(4)给定 $\{\theta_k[n], a_k[n], p_k[n]$,

$f_k[n] | \forall k, n\}$,优化无人机轨迹(IRS位置)。将这4个子问题交替求解,直到目标优化值收敛。

2.1 优化IRS相移

首先,给定时隙分配、无人机轨迹、发射功率和设备计算频率,求解IRS相移优化子问题。在时隙 n ,每个设备都优化了一个对应的IRS相移。因为不同时隙、不同设备的IRS相移是彼此独立、互不影响的,优化IRS相移子问题可以重新表述为问题(P2):

$$(P2): \max_{\theta_k[n]} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n]) \quad (31)$$

$$\text{s.t.} \quad (24), (26), (27),$$

引入向量 $\mathbf{v}_k = \{\mathbf{v}_k[n], \forall n\}$,其中, $\mathbf{v}_k[n] = [e^{j\theta_k^{(0,0)}[n]}, \dots, e^{j\theta_k^{(p,q)}[n]}, \dots, e^{j\theta_k^{(m_k-1,my-1)}[n]}]^T$ 。定义 $\hat{\mathbf{v}}_k[n] = [\mathbf{v}_k[n]^T, 1]^T$, $\mathbf{h}_k[n] = [\mathbf{h}_{k,B}^H[n] \text{diag}(\mathbf{h}_{k,I}[n]), \mathbf{h}_{k,B}]$, $\mathbf{g}_k[n] = [\mathbf{h}_{k,E}^H[n] \text{diag}(\mathbf{h}_{k,I}[n]), \mathbf{h}_{k,E}]$,可得:

$$\begin{aligned} |\mathbf{h}_{k,B} + \mathbf{h}_{k,B}^H[n] \boldsymbol{\theta}_k[n] \mathbf{h}_{k,I}[n]|^2 &= |\mathbf{h}_k[n] \hat{\mathbf{v}}_k[n]|^2 \\ &= \text{Tr}(\mathbf{H}_k[n] \hat{\mathbf{V}}_k[n]) \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{h}_{k,E} + \mathbf{h}_{k,E}^H[n] \boldsymbol{\theta}_k[n] \mathbf{h}_{k,I}[n]|^2 &= |\mathbf{g}_k[n] \hat{\mathbf{v}}_k[n]|^2 \\ &= \text{Tr}(\mathbf{G}_k[n] \hat{\mathbf{V}}_k[n]) \end{aligned} \quad (33)$$

式中: $\hat{\mathbf{V}}_k[n] = \hat{\mathbf{v}}_k[n] \hat{\mathbf{v}}_k^H[n]$, $\mathbf{H}_k[n] = \mathbf{h}_k^H[n] \mathbf{h}_k[n]$, $\mathbf{G}_k[n] = \mathbf{g}_k^H[n] \mathbf{g}_k[n]$ 。引入松弛变量 $s_{1,k} = \{s_{1,k}[n], \forall n\}$, $s_{2,k} = \{s_{2,k}[n], \forall n\}$,优化问题(P2)可重写成半正定规划问题(P2.1):

$$(P2.1): \max_{\hat{\mathbf{V}}_k[n], s_{1,k}[n], s_{2,k}[n]} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (\log_2(1 + s_{1,k}[n]) - \log_2(1 + s_{2,k}[n])) \quad (34)$$

$$\text{s.t.} \quad s_{1,k}[n] \leq \frac{p_k[n]}{\sigma^2} \text{Tr}(\mathbf{H}_k[n] \hat{\mathbf{V}}_k[n]), \forall k, n \quad (35)$$

$$s_{2,k}[n] \geq \frac{p_k[n]}{\sigma^2} \text{Tr}(\mathbf{G}_k[n] \hat{\mathbf{V}}_k[n]), \forall k, n \quad (36)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_k[n] \geq 0, \forall k, n \quad (37)$$

$$\text{rank}(\hat{\mathbf{V}}_k[n]) = 1, \forall k, n \quad (38)$$

$$[\hat{\mathbf{V}}_k[n]]_{m,m} = 1, \forall k, n, \forall m \in \{1, \dots, M+1\} \quad (39)$$

$$s_{1,k}[n] \leq 2 \frac{F_B^{\max}}{c_B B} - 1, \forall k, n \quad (40)$$

$$\frac{f_k[n]\delta}{c_k} + B a_k[n] \delta \log_2(1 + s_{1,k}[n]) \geq Q_k, \forall k, n \quad (41)$$

问题(P2.1)的优化目标(34)是凹函数减凹函数的形式,这是非凸的,使用连续凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)对式(34)进行近似处理。应用凸函数在任意点的一阶泰勒展开是其原函数的全局下界估计的特性,可得

$$-\log_2(1+s_{2,k}[n]) \geq -\log_2(1+s_{2,k}^r[n]) - \frac{1}{\ln 2(1+s_{2,k}^r[n])} (s_{2,k}[n] - s_{2,k}^r[n]) \quad (42)$$

式中: r 为迭代次数。

根据SCA,采用式(42)的下界逼近原函数,式(34)可重写为

$$S = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (\log_2(1+s_{1,k}[n]) - \log_2(1+s_{2,k}^r[n]) - \frac{1}{\ln 2(1+s_{2,k}^r[n])} (s_{2,k}[n] - s_{2,k}^r[n])) \quad (43)$$

由于秩一约束式(38)难以处理,这里暂时忽略秩一约束(38),优化问题最终可松弛为问题(P2.2):

$$(P2.2): \max_{\hat{V}_k[n], s_{1,k}[n], s_{2,k}[n]} S \quad \text{s.t.} \quad (35), (36), (37), (39), (40), (41) \quad (44)$$

上述问题的优化目标和约束条件均为标准凸形式,可使用内点法求解。

最后,重新考虑秩一约束(38),采用高斯随机化方法对(P2.2)的解进行处理,从而获得满足秩一约束(38)的解,细节与文献[27]相似。

2.2 优化时隙分配

给定IRS相移、发射功率、设备计算频率和无人机轨迹,优化时隙分配的子问题可表述为

$$(P3): \max_{a_k[n], R} \quad (45)$$

$$\text{s.t.} \quad (23), (27), (28)$$

$$R \leq \frac{1}{T} \left(\delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N \frac{f_k[n]\delta}{c_k} \right), \forall k \quad (46)$$

易知,问题(P3)是一个标准的线性规划问题,可使用内点法求解。

2.3 联合优化发射功率和设备计算频率

定义 $x_k[n] = \frac{|h_{k,B} + \mathbf{h}_{I,B}[n]\boldsymbol{\Theta}_k[n]\mathbf{h}_{k,I}[n]|^2}{\sigma^2}$, $y_k[n] = \frac{|h_{k,E} + \mathbf{h}_{I,E}[n]\boldsymbol{\Theta}_k[n]\mathbf{h}_{k,I}[n]|^2}{\sigma^2}$ 。给定IRS相移、时隙分配和无人机轨迹,联合优化发射功率和设备计算频率的子问题可表述为

$$(P4): \max_{f_k[n], p_k[n], R} \quad (47)$$

$$\text{s.t.} \quad (21), (25), (28)$$

$$R \leq \frac{1}{T} \left(\delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (\dot{R}_{k,B}[n] - \dot{R}_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N \frac{f_k[n]\delta}{c_k} \right), \forall k \quad (48)$$

$$p_k[n]x[n] \leq 2^{\frac{F_B^{\max}}{c_k B}} - 1, \forall k, n \quad (49)$$

$$\frac{f_k[n]\delta}{c_k} + a_k[n]\delta\dot{R}_{k,B}[n] \geq Q_k, \forall k, n \quad (50)$$

式中, $\dot{R}_{k,B}[n] = B\log_2(1+x_k[n]p_k[n])$, $\dot{R}_{k,E}[n] = B\log_2(1+y_k[n]p_k[n])$ 。

由于约束(48)的非凸性,问题(P4)是非凸优化问题。使用SCA,对 $\dot{R}_{k,E}[n]$ 进行一阶泰勒展开可得

$$\log_2(1+y_k[n]p_k[n]) \leq \log_2(1+y_k[n]p_k^r[n]) + \frac{y[n]}{\ln 2(1+y[n]p_k^r[n])} (p_k[n] - p_k^r[n]), \forall k, n \quad (51)$$

式中: r 为迭代次数。

定义 $\tilde{R}_{k,E}[n] = B\log_2(1+y_k[n]p_k^r[n]) + \frac{By[n]}{\ln 2(1+y[n]p_k^r[n])} \times (p_k[n] - p_k^r[n])$, 问题(P4)可转换为

$$(P4.1): \max_{f_k[n], p_k[n], R} \quad (52)$$

$$\text{s.t.} \quad (21), (25), (28), (49), (50)$$

$$RT \leq \delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (\dot{R}_{k,B}[n] - \tilde{R}_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N \frac{f_k[n]\delta}{c_k}, \forall k \quad (53)$$

上述问题的优化目标与约束条件均为标准凸形式,可使用内点法求解。

2.4 优化无人机轨迹(IRS位置)

给定IRS相移、发射功率、设备计算频率和时隙分配,优化无人机轨迹子问题可以表述为问题(P5):

$$(P5): \max_{l[n], R} \quad (54)$$

$$\text{s.t.} \quad (22), (26), (27)$$

$$R \leq \frac{1}{T} \left(\delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (R_{k,B}[n] - R_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N \frac{f_k[n]\delta}{c_k} \right), \forall k \quad (55)$$

导向矢量 $\alpha_k[n]$ 、 $\alpha_B[n]$ 、 $\alpha_E[n]$ 与位置是复杂耦合且是非线性的,这是难以处理的。参考文献[28]对导向矢量的处理,本文使用第 r 次迭代的值 $\alpha_k^r[n]$ 、 $\alpha_B^r[n]$ 、 $\alpha_E^r[n]$ 近似。

为了处理 $R_{k,B}[n]$ 和 $R_{k,E}[n]$ 复杂的表达式。首先,定义 $D_k[n]$ 为设备 k 到基站的信噪比, $E_k[n]$ 为设备 k 到窃听者的信噪比,引入辅助变量 $w_{1,k}[n] = \rho(\alpha_B^r[n])^H \Theta_k[n] \alpha_B^r[n] \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$, $w_{2,k}[n] = \rho(\alpha_E^r[n])^H \Theta_k[n] \alpha_E^r[n] \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$,可得

$$D_k[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |h_{k,B} + \mathbf{h}_{1,B}^H[n] \Theta_k[n] \mathbf{h}_{k,I}[n]|^2 = A_{1,k}[n] + B_{1,k}[n] d_{1,B}^{-1}[n] d_{k,I}^{-1}[n] + C_{1,k}[n] d_{1,B}^{-2}[n] d_{k,I}^{-2}[n] \quad (56)$$

$$E_k[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |h_{k,E} + \mathbf{h}_{1,E}^H[n] \Theta_k[n] \mathbf{h}_{k,I}[n]|^2 = A_{2,k}[n] + B_{2,k}[n] d_{1,E}^{-1}[n] d_{k,I}^{-1}[n] + C_{2,k}[n] d_{1,E}^{-2}[n] d_{k,I}^{-2}[n] \quad (57)$$

式中:系数 $A_{j,k}[n]$ 、 $B_{j,k}[n]$ 和 $C_{j,k}[n]$ 的表达式为式(58)、(59)和(60), $j \in \{1, 2\}$ 。由式(58)、(60)可得, $A_{j,k}[n] \geq 0$, $C_{j,k}[n] \geq 0$ 。由式(59)可知, $B_{j,k}[n]$ 是可正可负的,必须根据实际的 $h_{k,B}$ 、 $h_{k,E}$ 、 $s_{1,k}[n]$ 、 $s_{2,k}[n]$ 判断其正负。

$$A_{1,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} h_{k,B}^H h_{k,B} = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |h_{k,B}|^2, \quad A_{2,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} h_{k,E}^H h_{k,E} = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |h_{k,E}|^2 \quad (58)$$

$$B_{1,k}[n] = 2 \frac{p_k[n]}{\sigma^2} \text{Re}\{h_{k,B}^H w_{1,k}[n]\}, \quad B_{2,k}[n] = 2 \frac{p_k[n]}{\sigma^2} \text{Re}\{h_{k,E}^H w_{2,k}[n]\} \quad (59)$$

$$C_{1,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} w_{1,k}^H[n] w_{1,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |w_{1,k}[n]|^2, \quad C_{2,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} w_{2,k}^H[n] w_{2,k}[n] = \frac{p_k[n]}{\sigma^2} |w_{2,k}[n]|^2 \quad (60)$$

接着,通过引入松弛变量 $\mathbf{u}_{1,k} = \{u_{1,k}[n], \forall n\}$ 、 $\mathbf{u}_{2,k} = \{u_{2,k}[n], \forall n\}$,问题(P5)可转换为问题(P5.1):

$$(P5.1): \max_{\mathbf{I}[n], R, \mathbf{u}_{1,k}[n], \mathbf{u}_{2,k}[n]} R \quad (61)$$

$$R \leq \frac{1}{T} \left(\delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (\ddot{R}_{k,B}[n] - \ddot{R}_{k,E}[n]) + \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n] \right), \forall k \quad (62)$$

$$u_{1,k}[n] \leq D_k[n], \forall k, n \quad (63)$$

$$u_{2,k}[n] \geq E_k[n], \forall k, n \quad (64)$$

$$\|I[n+1] - I[n]\|^2 \leq D, n = \{0, \dots, N-1\}$$

$$I[1] = I_0, I_F = I[N] \quad (65)$$

$$\frac{f_k[n]\delta}{c_k} + Ba_k[n]\delta \log_2(1 + u_{1,k}[n]) \geq Q_k, \forall k, n \quad (66)$$

$$u_{1,k}[n] \leq 2^{\frac{F_B^{\max}}{c_B B}} - 1, \forall k, n \quad (67)$$

式中: $\ddot{R}_{k,B}[n] = B \log_2(1 + u_{1,k}[n])$ 、 $\ddot{R}_{k,E}[n] = B \log_2(1 + u_{2,k}[n])$ 。

在问题(P5.1)中,由于约束(62)、(63)、(64)的非凸性,(P5.1)是一个非凸优化问题。

1) 处理约束(62)。

应用凸函数的一阶泰勒展开是其全局下界的特性,本文对 $-\log_2(1 + u_{2,k}[n])$ 进行一阶泰勒展开,可得

$$-\log_2(1 + u_{2,k}[n]) \geq -\log_2(1 + u_{2,k}^r[n]) - \frac{1}{\ln 2(1 + u_{2,k}^r[n])} \times (u_{2,k}[n] - u_{2,k}^r[n]) \quad (68)$$

使用SCA,约束(62)可转换为

$$RT \leq B\delta \sum_{n=1}^N a_k[n] (\log_2(1 + u_{1,k}[n]) - \log_2(1 + u_{2,k}^r[n]) - (u_{2,k}[n] - u_{2,k}^r[n]) / (\ln 2(1 + u_{2,k}^r[n]))) + \sum_{n=1}^N l_k^{\text{loc}}[n], \forall k \quad (69)$$

2) 处理约束(63)。

在优化轨迹时,大多数类似工作通常直接假设直射链路的信号和反射链路的信号在基站处相互叠加,在窃听器处相互抵消,这是不合理的。由上文对 $B_{j,k}[n]$ 分析可知, $B_{j,k}[n]$ 是可正可负的, $j = \{1, 2\}$ 。当 $B_{j,k}[n] \geq 0$ 时,意味着两路信号在接收端是叠加的;当 $B_{j,k}[n] < 0$ 时,意味着两路信号在接收端是抵消的。

在这里,本文引入二进制向量 $\mathbf{I}_k = \{I_k[n], \forall n\}$ 。当 $B_{1,k}[n] \geq 0$ 时, $I_k[n] = 0$;当 $B_{1,k}[n] < 0$ 时, $I_k[n] = 1$ 。可得

$$D_k[n] = A_{1,k}[n] + B_{1,k}[n] d_{1,B}^{-1}[n] d_{k,I}^{-1}[n] + C_{1,k}[n] d_{1,B}^{-2}[n] d_{k,I}^{-2}[n] = A_{1,k}[n] + (1 - I_k[n]) |B_{1,k}[n]| d_{1,B}^{-1}[n] d_{k,I}^{-1}[n] - I_k[n] |B_{1,k}[n]| d_{1,B}^{-1}[n] d_{k,I}^{-1}[n] + C_{1,k}[n] d_{1,B}^{-2}[n] d_{k,I}^{-2}[n] \quad (70)$$

为了处理约束(63),引入松弛变量 $\mathbf{v}_1 = \{v_1[n], \forall n\}$ 、 $\mathbf{v}_{2,k} = \{v_{2,k}[n], \forall n\}$ 、 $\bar{\mathbf{v}}_1 = \{\bar{v}_1[n], \forall n\}$ 、 $\bar{\mathbf{v}}_{2,k} = \{\bar{v}_{2,k}[n], \forall n\}$, $\forall k$ 。约束(63)可松弛为

$$u_{1,k}[n] \leq A_{1,k}[n] + (1 - I_k[n]) |B_{1,k}[n]| e^{v_1[n] + v_{2,k}[n]} - I_k[n] |B_{1,k}[n]| e^{\bar{v}_1[n] + \bar{v}_{2,k}[n]} + C_{1,k}[n] e^{2v_1[n] + 2v_{2,k}[n]}, \forall k, n \quad (71)$$

$$e^{v_1[n]} \leq d_{1,B}^{-1}[n], \forall k, n \quad (72)$$

$$e^{v_{2,k}[n]} \leq d_{k,1}^{-1}[n], \forall k, n \quad (73)$$

$$e^{\bar{v}_1[n]} \geq d_{1,B}^{-1}[n], \forall k, n \quad (74)$$

$$e^{\bar{v}_{2,k}[n]} \geq d_{k,1}^{-1}[n], \forall k, n \quad (75)$$

式(71) 不等号右边的第1项和第3项是凹的,第2项和第4项是凸的。为了把式(71) 转换成凸的形式,使用SCA技术,对第2项和第4项进行一阶泰勒展开,可得

$$u_{1,k}[n] \leq \tilde{D}_k[n] \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \tilde{D}_k[n] = & A_{1,k}[n] + (1 - I_k[n]) |B_{1,k}[n]| e^{v_1^r[n] + v_{2,k}^r[n]} + \\ & (1 - I_k[n]) |B_{1,k}[n]| e^{v_1^r[n] + v_{2,k}^r[n]} (v_1[n] - v_1^r[n]) + \\ & (1 - I_k[n]) |B_{1,k}[n]| e^{v_1^r[n] + v_{2,k}^r[n]} (v_{2,k}[n] - v_{2,k}^r[n]) - \\ & I_k[n] |B_{1,k}[n]| e^{\bar{v}_1[n] + \bar{v}_{2,k}[n]} + C_{1,k}[n] e^{2v_1^r[n] + 2v_{2,k}^r[n]} + \\ & C_{1,k}[n] e^{2v_1^r[n] + 2v_{2,k}^r[n]} (2(v_1[n] - v_1^r[n])) + \\ & C_{1,k}[n] e^{2v_1^r[n] + 2v_{2,k}^r[n]} (2(v_{2,k}[n] - v_{2,k}^r[n])) \end{aligned} \quad (77)$$

式中: $v_1^r[n]$ 、 $v_{2,k}^r[n]$ 为第 r 次迭代的值。

对式(72)~(75)不等号两边取平方,可得

$$\|I[n] - \mathbf{w}_B\|^2 + (H_U - H_B)^2 \leq e^{-2v_1[n]}, \forall k, n \quad (78)$$

$$\|I[n] - \mathbf{w}_k\|^2 + (H_U - 0)^2 \leq e^{-2v_{2,k}[n]}, \forall k, n \quad (79)$$

$$\|I[n] - \mathbf{w}_B\|^2 + (H_U - H_B)^2 \geq e^{-2\bar{v}_1[n]}, \forall k, n \quad (80)$$

$$\|I[n] - \mathbf{w}_k\|^2 + (H_U - 0)^2 \geq e^{-2\bar{v}_{2,k}[n]}, \forall k, n \quad (81)$$

表达式 $\|I[n] - \mathbf{w}\|^2$ 、 $e^{-2v[n]}$ 是凸的,其中 $\mathbf{w} \in \{\mathbf{w}_B, \mathbf{w}_k\}$, $v \in \{v_1, v_{2,k}, \bar{v}_1, \bar{v}_{2,k}\}$ 。式(78)、(79) 是凸函数小于等于凸函数的形式,使用SCA,对不等号右边进行一阶泰勒展开;式(80)、(81) 是凸函数大于等于凸函数的形式,使用SCA,对不等号左边进行一阶泰勒展开。可得

$$\begin{aligned} \|I[n] - \mathbf{w}_B\|^2 + (H_U - H_B)^2 & \leq e^{-2v_1^r[n]} - \\ & 2e^{-2v_1^r[n]}(v_1[n] - v_1^r[n]), \forall k, n \end{aligned} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} \|I[n] - \mathbf{w}_k\|^2 + H_U^2 & \leq e^{-2v_{2,k}^r[n]} - \\ & 2e^{-2v_{2,k}^r[n]}(v_{2,k}[n] - v_{2,k}^r[n]), \forall k, n \end{aligned} \quad (83)$$

$$\begin{aligned} e^{-2\bar{v}_1[n]} & \leq \|I^r[n] - \mathbf{w}_B\|^2 + 2(I^r[n] - \mathbf{w}_B)^T(I[n] - I^r[n]) + \\ & (H_U - H_B)^2, \forall k, n \end{aligned} \quad (84)$$

$$\begin{aligned} e^{-2\bar{v}_{2,k}[n]} & \leq \|I^r[n] - \mathbf{w}_k\|^2 + 2(I^r[n] - \mathbf{w}_k)^T(I[n] - I^r[n]) + \\ & H_U^2, \forall k, n \end{aligned} \quad (85)$$

3) 处理约束(64)。

类似对约束(63) 的处理。引入二进制向量 $L_k = \{L_k[n], \forall n\}$, 当 $B_{2,k}[n] \geq 0$ 时, $L_k[n] = 0$; 当 $B_{2,k}[n] < 0$ 时, $L_k[n] = 1$ 。可得

$$\begin{aligned} E_k[n] = & A_{2,k}[n] + (1 - L_k[n]) |B_{2,k}[n]| d_{1,E}^{-1}[n] d_{k,1}^{-1}[n] - \\ & L_k[n] |B_{2,k}[n]| d_{1,E}^{-1}[n] d_{k,1}^{-1}[n] + C_{2,k}[n] d_{1,E}^{-2}[n] d_{k,1}^{-2}[n] \end{aligned} \quad (86)$$

为了处理约束(64), 引入松弛变量 $\mathbf{v}_3 = \{v_3[n], \forall n\}$ 、 $\bar{\mathbf{v}}_3 = \{\bar{v}_3[n], \forall n\}$ 。约束(64) 可松弛为

$$\begin{aligned} u_{2,k}[n] \geq & A_{2,k}[n] + (1 - L_k[n]) |B_{2,k}[n]| e^{\bar{v}_3[n] + \bar{v}_{2,k}[n]} - \\ & L_k[n] |B_{2,k}[n]| e^{v_3[n] + v_{2,k}[n]} + C_{2,k}[n] e^{2\bar{v}_3[n] + 2\bar{v}_{2,k}[n]} \end{aligned} \quad (87)$$

$$e^{v_3[n]} \leq d_{1,E}^{-1}[n], \forall k, n \quad (88)$$

$$e^{\bar{v}_3[n]} \geq d_{1,E}^{-1}[n], \forall k, n \quad (89)$$

式(87)、(88)、(89) 是非凸的,使用SCA,可得

$$u_{2,k}[n] \geq \tilde{E}_k[n] \quad (90)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_k[n] = & A_{2,k}[n] + (1 - L_k[n]) |B_{2,k}[n]| e^{\bar{v}_3[n] + \bar{v}_{2,k}[n]} - \\ & L_k[n] |B_{2,k}[n]| e^{v_3^r[n] + v_{2,k}^r[n]} - \\ & L_k[n] |B_{2,k}[n]| e^{v_3^r[n] + v_{2,k}^r[n]} (v_3[n] - v_3^r[n]) - \\ & L_k[n] |B_{2,k}[n]| e^{v_3^r[n] + v_{2,k}^r[n]} (v_{2,k}[n] - v_{2,k}^r[n]) + \\ & C_{2,k}[n] e^{2\bar{v}_3[n] + 2\bar{v}_{2,k}[n]} \end{aligned} \quad (91)$$

$$\|I[n] - \mathbf{w}_E\|^2 + H_U^2 \leq e^{-2v_3^r[n]} (1 - 2(v_3[n] - v_3^r[n])) \quad (92)$$

$$e^{-2\bar{v}_3[n]} \leq \|I^r[n] - \mathbf{w}_E\|^2 + 2(I^r[n] - \mathbf{w}_E)^T(I[n] - I^r[n]) + H_U^2 \quad (93)$$

经过上述处理,问题(P5.1) 可转换为问题(P5.2):

$$(P5.2): \max_{I[n], R, u_{1,k}[n], u_{2,k}[n]} R \quad (94)$$

s.t. (65), (66), (67), (69)

(76), (82), (83), (84), (85)

(90), (92), (93)

问题(P5.2) 的优化目标与约束条件均为标准凸形式,可使用内点法求解。

2.5 所提完整算法

本文中,通过联合优化IRS相移、时隙分配、发射

功率、设备计算频率和无人机轨迹,以最大化设备最小安全计算速率。综合前面的理论分析和对4个子问题的处理,提出的完整迭代算法的具体步骤为:

(1) 设置系统参数。如无人机飞行时间 T ,时隙数量 N ,设备能耗预算 $E_k^{\max}$,系统带宽 B 、收敛精度 ε 等参数。

(2) 令 $r=0$,初始化优化目标 $R^{(r)}$ 、时隙分配 $a_k^{(r)}[n]$ 、设备计算频率 $f_k^{(r)}[n]$ 、发送功率 $p_k^{(r)}[n]$ 和无人机轨迹 $l^{(r)}[n]$ 。

(3) 代入 $\{a_k^{(r)}[n], f_k^{(r)}[n], p_k^{(r)}[n], l^{(r)}[n] | \forall k, n\}$,求解问题(P2.2),得到局部最优解 $\theta_k^{(r+1)}[n]$ 。

(4) 代入 $\{\theta_k^{(r+1)}[n], f_k^{(r)}[n], p_k^{(r)}[n], l^{(r)}[n] | \forall k, n\}$,求解问题(P3),得到最优解 $a_k^{(r+1)}[n]$ 。

(5) 代入 $\{\theta_k^{(r+1)}[n], a_k^{(r+1)}[n], l^{(r)}[n] | \forall k, n\}$,求解问题(P4.1),得到局部最优解 $f_k^{(r+1)}[n]$ 、 $p_k^{(r+1)}[n]$ 。

(6) 计算 $R^{(r+1)} = \min_{\forall k} \bar{R}_{k, \text{sec}}$ 。若 $|R^{(r+1)} - R^{(r)}| / R^{(r)} \leq \varepsilon$,即结果收敛到预设的阈值范围,算法求解完成。否则执行步骤(7)。

(7) 代入 $\{\theta_k^{(r+1)}[n], a_k^{(r+1)}[n], f_k^{(r+1)}[n], p_k^{(r+1)}[n] | \forall k, n\}$,求解问题(P5.2),得到局部最优解 $l^{(r+1)}[n]$ 。更新 $r=r+1$,重复步骤(3)~(6)。

所提算法的复杂度主要取决于IRS相移优化子问题和无人机轨迹优化子问题。IRS相移优化的复杂度为 $O_1(KN(M+1+2)^{3.5})$,轨迹优化的复杂度为 $O_2((5N)^{3.5})$ 。因此,所提算法的整体复杂度为 $O(I_0 O_1 + (I_0 - 1) O_2)$,其中 I_0 为迭代次数^[29]。

3 仿真分析

本节通过计算机仿真验证所提系统的性能,并且与以下5种基准方案对比。

方案1 固定轨迹方案。无人机轨迹固定为初始轨迹,即无人机从起点直线飞往终点,联合优化 $\theta_k[n]$ 、 $a_k[n]$ 、 $p_k[n]$ 、 $f_k[n]$ 。方案1可以从文献[12]的算法中通过变换优化目标和安全卸载速率约束为本文的优化目标和约束得到。

方案2 固定时隙分配方案。时隙分配固定为初始值,联合优化 $\theta_k[n]$ 、 $p_k[n]$ 、 $f_k[n]$ 、 $l[n]$ 。

方案3 固定发送功率方案。发送功率固定为初始值,联合优化 $\theta_k[n]$ 、 $a_k[n]$ 、 $f_k[n]$ 、 $l[n]$ 。

方案4 固定计算频率方案。计算频率固定为初始值,联合优化 $\theta_k[n]$ 、 $a_k[n]$ 、 $p_k[n]$ 、 $l[n]$ 。

方案5 没有IRS方案。系统没有IRS,只考虑从设备到基站(窃听器)的直接传输。联合优化 $a_k[n]$ 、 $f_k[n]$ 、 $p_k[n]$ 。方案5基于文献[11-12]中对比方案的设

置,对没有IRS辅助的MEC系统进行仿真。

系统仿真参数设置:设备数 $K=3$,设备的位置分别为(160,60,0) m、(160,0,0) m、(160,-60,0) m,无人机飞行高度 $H_U=50$ m,最大飞行速度 $v_{\max}=15$ m·s⁻¹,基站的位置(0,0,10) m,窃听者的位置(10,0,0) m;时隙数 $N=20$,时隙持续时间 $\delta=1$ s;IRS元件数 $M=8 \times 8$;路径损失指数 $\beta=3.5$,路径损耗 $\rho=-30$ dB;系统带宽 $B=2$ MHz,噪声功率谱密度为 -150 dBm·Hz⁻¹^[30],噪声功率 $\sigma^2=2 \times 10^{-9}$;设备最大发射功率 $P_k^{\max}=20$ dBm,设备最大计算频率 $f_k^{\max}=1$ GHz,服务器最大计算频率 $F_B^{\max}=20$ GHz,时隙计算需求 $Q_k=0.3$ Mbits,最大能耗预算 $E_k^{\max}=0.5T=10$ J, $c_B=c_k=1$ 000 cycle·bit⁻¹,有效电容系数 $k_k=10^{-27}$ 。不失一般性, $P_k^{\max}[n]=P_{\max}=20$ dBm, $a_k[n]=1/K, \forall k$ 。除非特别说明,否则在以下仿真中均采用上述所有参数。

图2展示了所提算法在交替迭代过程中的收敛情况。由图中可以看出,在不同最大发射功率下,所提算法均收敛。在前3次迭代中,目标函数值快速增加。在3次迭代之后,目标函数值的增长变得越来越平缓。在进行到第8次迭代后,目标函数值趋于收敛。这表明所提出的算法在较少的迭代次数内能够达到收敛。

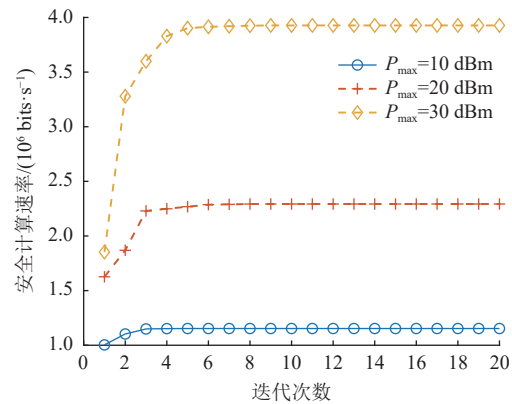


图2 目标函数值的收敛情况

Fig.2 Convergence of the objective function value

图3展示了无人机的轨迹优化图,无人机从初始位置(80,80,50)飞行至终点位置(80,-80,50)。从图中可以看出,无人机的轨迹首先靠近基站飞行,然后悬停在基站附近,最后飞回终点。当飞行时间增大时,这种飞行趋势更加明显。此外,图中显示了无人机在3个不同位置悬停,表明由于设备位置的不同,IRS为其配置最佳信道环境的位置也不同。这说明无人机的轨迹不仅与飞行时间有关,还取决于设备的位置。

为了反映时隙计算需求 Q_k 对系统性能的影响,图4展示了最大-最小安全计算速率(目标函数值)随

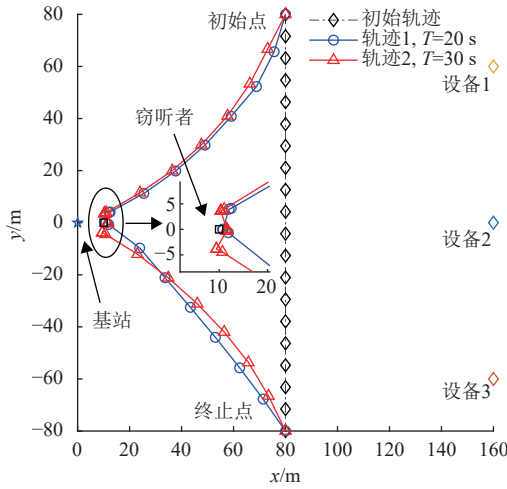


图3 无人机轨迹
Fig.3 UAV trajectory

Q_k 的变化情况。从图4可以看出,目标函数值随着 $Q_{\max}$ 增大先缓慢下降。当 Q_k 进一步增大,特别是 $Q_k \geq 0.9$ Mbits时,目标值快速下降。这是因为,能耗预算全用于本地计算时每个时隙的平均计算量为 $\frac{\delta}{c_k} \sqrt{\frac{3E_k^{\max}}{k_k T}} \approx 0.793$ Mbits。当 Q_k 小于0.793 Mbits时,可以在本地完成时隙计算需求。当 Q_k 大于0.793 Mbits时,设备需要将更多的计算任务卸载到服务器,增加了被窃听的风险,导致目标值迅速下降。

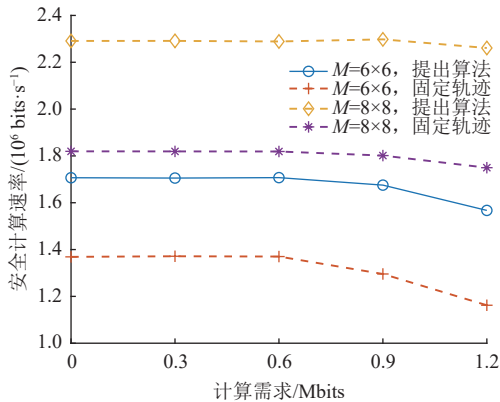


图4 目标函数值随 Q_k 的变化情况
Fig.4 Variation of the objective function value with Q_k

图4还展示了所提方案与固定轨迹方案,在不同IRS元件数($M=36$ 、 $M=64$)下,目标函数值随计算需求 Q_k 的变化情况。由图4可以看出,与固定轨迹方案相比,所提方案性能更优。在同一计算需求下,所提方案的目标函数值至少比固定轨迹方案高出0.3 Mbits/s。此外,当IRS元件数为 $M=8 \times 8$ 时,无论是所提方案还是固定轨迹方案,其性能均优于元件数 $M=6 \times 6$ 的情况。这表明,增加IRS元件数有助于提升系统

的安全计算能力。

图5展示了目标函数值随飞行时间 T 变化的情况,针对不同的最大发射功率 $P_{\max}$ 进行了比较。考虑到不同时间的公平性,功耗预算设定为 $E_k^{\max} = 0.5T$ 。可以观察到,随着 T 增加,目标函数值逐渐增加,这是因为更长的飞行时间允许空中IRS有更多时间停留在最优位置辅助卸载,从而提高系统的安全计算速率。图中还显示,随着 $P_{\max}$ 的增加,目标函数值也相应增加。这是因为更大的 $P_{\max}$ 允许设备分配到更多的能量用于任务卸载,从而提升系统性能。

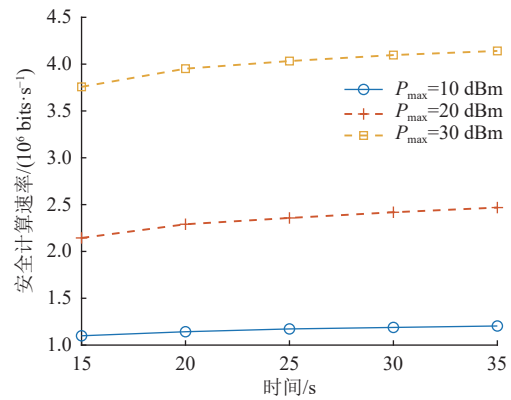


图5 目标函数值随 T 的变化情况
Fig.5 Variation of the objective function value with T

图6展示了在不同方案下,目标函数值与最大发射功率 $P_{\max}$ 的变化关系。结果显示,随着 $P_{\max}$ 增加,目标函数值逐渐增大,并且所提方案均优于所有基准方案。其中,没有IRS方案的目标函数值最小,这表明空中IRS能有效提升系统的安全计算能力;固定无人机轨迹(IRS位置)方案与所提方案相比,性能差距较大。当 $P_{\max} = 20$ dBm,优化IRS位置与没优化位置相比,能带来26%的性能提升。即使 $P_{\max}$ 取最小值(10 dBm),也有13.4%的性能提升。这表明IRS位置优

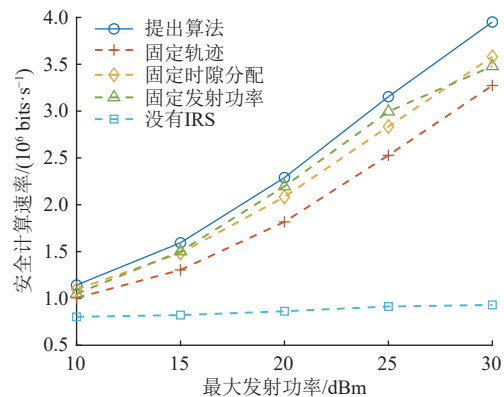


图6 不同最大发射功率的性能对比图
Fig.6 Performance comparison for different maximum transmission powers

化在提高系统性能方面起着关键作用;当最大发射功率较小时,所提方案与固定时隙分配、固定计算频率方案相近,但所提的方案仍优于基准方案。

图7展示了在不同方案下,目标函数值与飞行时间 T 的变化关系。结果显示,所提方案均优于所有的基准方案。从图7中可以观察到,固定轨迹方案的目标函数值不随时间 T 的增加而改变。这表明,在固定无人机轨迹的情况下,系统性能与飞行时间 T 无关。飞行时间 T 通过影响无人机轨迹(IRS位置),间接影响系统性能。

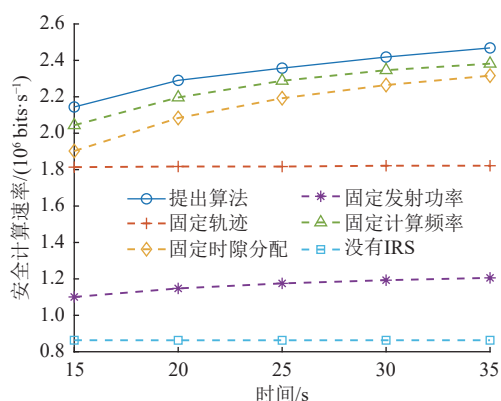


图7 不同飞行时间的性能对比图

Fig.7 Performance comparison for different flight durations

4 结论

本文研究了基于空中IRS辅助MEC的任务安全卸载系统,采用IRS增强合法传输并防止窃听。考虑了设备的能耗预算和计算量约束,通过优化时隙分配、资源分配(发射功率、设备计算频率)、IRS的相移以及无人机的飞行轨迹(IRS位置),以最大化设备最小安全计算速率。为有效求解这一优化变量耦合的非凸问题,基于BCD原理,将原非凸问题分解成4个子问题,并采用SCA和SDR优化方法进行求解。仿真验证了所提迭代算法的收敛性与有效性。仿真结果表明,所提方案能够有效提高系统的安全计算能力。作为对空中IRS辅助MEC的任务安全卸载的早期研究,本文为了简化模型并专注于研究空中IRS位置、时隙分配等对系统安全性能的影响,初步考虑空中信道为视距信道。我们计划在后续研究中进一步探讨莱斯衰落信道模型,以提供更全面的系统性能评估。

参考文献:

- [1] SU R, ZHANG D, VENKATESAN R, *et al.* Resource allocation for network slicing in 5G telecommunication networks: a survey of principles and models[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(6): 172-179.
- [2] ABBAS N, ZHANG Y, TAHERKORDI A, *et al.* Mobile edge computing: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 5(1): 450-465.
- [3] 张依琳, 梁玉珠, 尹沐君, 等. 移动边缘计算中计算卸载方案研究综述[J]. *计算机学报*, 2021, 44(12): 2406-2430.
- [4] ZHANG Y L, LIANG Y Z, YIN M J, *et al.* Survey on the methods of computation offloading in mobile edge computing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(12): 2406-2430.
- [5] WU M, SONG Q, GUO L, *et al.* Energy-efficient secure computation offloading in wireless powered mobile edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(5): 6907-6912.
- [6] 马方舒, 王岩, 张国威, 等. 天地一体化信息网络中物理层安全方案[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(2): 73-80.
- [7] MA F S, WANG Y, ZHANG G W, *et al.* Physical layer security schemes in space-integrated-ground information network[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(2): 73-80.
- [8] WU Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 58(1): 106-112.
- [9] CUI M, ZHANG G, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410-1414.
- [10] BAI T, PAN C, DENG Y, *et al.* Latency minimization for intelligent reflecting surface aided mobile edge computing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2666-2682.
- [11] XU Z, LIU J, ZOU J, *et al.* Energy-efficient design for IRS-assisted NOMA-based mobile edge computing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(7): 1618-1622.
- [12] CHU Z, XIAO P, SHOJAFAR M, *et al.* Intelligent reflecting surface assisted mobile edge computing for Internet of things[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 10(3): 619-623.
- [13] 陈彦龙, 曾祥, 李宇龙, 等. 双智能反射面辅助的绿色物联网边缘计算吞吐量研究[J]. *广东工业大学学报*, 2024, 41(3): 110-118.
- [14] CHEN Y L, ZENG X, LI Y L, *et al.* Double reconfigurable intelligent surface-aided green internet of things edge computing for research on computation capacity[J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2024, 41(3): 110-118.
- [15] LI B, WU W, LI Y, *et al.* Intelligent reflecting surface and artificial-noise-assisted secure transmission of MEC system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 9(13): 11477-11488.

- [13] MAO S, LIU L, ZHANG N, *et al.* Reconfigurable intelligent surface-assisted secure mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(6): 6647-6660.
- [14] LI B, LIAO J, WU W, *et al.* Intelligent reflecting surface assisted secure computation of wireless powered MEC system[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 23(4): 3048-3059.
- [15] LIU Y, SU Z, WANG Y. Energy-efficient and physical-layer secure computation offloading in blockchain-empowered internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 10(8): 6598-6610.
- [16] WU Q, ZHOU X, CHEN W, *et al.* IRS-aided WPCNs: a new optimization framework for dynamic IRS beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(7): 4725-4739.
- [17] NGUYEN-KHA H, NGUYEN H V, LE M T P, *et al.* Joint UAV placement and IRS phase shift optimization in downlink networks[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 111221-111231.
- [18] JIANG H, BAO Z, WANG M, *et al.* Aerial IRS-enabled secure mobile communications: joint 3D trajectory and beamforming design[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023
- [19] LIU X, YU Y, LI F, *et al.* Throughput maximization for RIS-UAV relaying communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 19569-19574.
- [20] LU H, ZENG Y, JIN S, *et al.* Aerial intelligent reflecting surface: joint placement and passive beamforming design with 3D beam flattening[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4128-4143.
- [21] WANG F, XU J, CUI S. Optimal energy allocation and task offloading policy for wireless powered mobile edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(4): 2443-2459.
- [22] XU Y, ZHANG T, YANG D, *et al.* Joint resource and trajectory optimization for security in UAV-assisted MEC systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 69(1): 573-588.
- [23] ZHANG T, 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*, 2019, 16(8): 5505-5516.
- [24] TUN Y K, PARK Y M, TRAN N H, *et al.* Energy-efficient resource management in UAV-assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 25(1): 249-253.
- [25] BURD T D, BRODERSEN R W. Processor design for portable systems[J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 1996, 13(2): 203-221.
- [26] ZHANG G, WU 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.
- [27] WU 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.
- [28] LI S, DUO B, DI RENZO M, *et al.* Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(10): 6402-6417.
- [29] CHENG T, WANG B, CAO K, *et al.* IRS-assisted secure UAV communication system for multiuser with hardware impairments[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(3): 4946-4957.
- [30] WU Q, ZHANG R. Joint active and passive beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted SWIPT under QoS constraints[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1735-1748.
- (责任编辑: 杨耀辉 英文审核: 熊荣斌)