

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：面向窃听 CSI 不确定的 RIS 辅助 UAV-ISAC 鲁棒安全资源分配
作者：彭艺，何彦熹，杨青青，李辉，王健明
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0532
收稿日期：2026-07-25
网络首发日期：2026-11-13
引用格式：彭艺，何彦熹，杨青青，李辉，王健明．面向窃听 CSI 不确定的 RIS 辅助 UAV-ISAC 鲁棒安全资源分配[J/OL]．北京航空航天大学学报．https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0532



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向窃听 CSI 不确定的 RIS 辅助 UAV-ISAC 鲁棒安全资源分配

彭艺[1,2]，何彦熹[1,2]，杨青青[1,2,✉]，李辉[1]，王健明[1]

（1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院，昆明 650500；2. 昆明理工大学 云南省计算机重点实验室，昆明 650500）

*通信作者 E-mail：20232204030@stu.kust.edu.cn

摘要 针对窃听信道状态信息（CSI）不确定条件下可重构智能反射面（Reconfigurable Intelligent Surface，RIS）辅助无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）通信感知一体化（Integrated Sensing and Communication，ISAC）系统安全传输与感知性能难以协同保障的问题，本文以最大化平均最坏情况保密速率与平均归一化等效感知指标的加权和为目标，提出一种面向最坏情况保密性能的鲁棒联合资源分配方法。首先采用确定性有界误差模型刻画非合作窃听链路 CSI 不确定性，推导窃听接收功率保守上界并建立最坏情况保密速率下界；其次，在多约束条件下构建鲁棒联合优化问题；最后针对原问题的高复杂度与非凸特性，构建基于 AO 的鲁棒联合优化算法，将原问题分解为用户调度与发射协方差、UAV 轨迹和 RIS 相移三个子问题，并结合连续松弛与惩罚、SCA、SDR 及可行性回代检验完成迭代求解。仿真结果表明，所提算法能有效求解该鲁棒优化问题，相较于基准方案系统安全通信性能有所提升，同时兼顾感知性能保障。

关键词 通感一体化；可重构智能表面；无人机；CSI 不确定性；鲁棒优化；物理层安全

中图分类号 TN929.5 文献标识码：A DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0532

Robust secure resource allocation for RIS-assisted UAV-ISAC with uncertain eavesdropping channel state information

PENG Yi[1,2], HE Yanxi[1,2], YANG Qingqing[1,2,✉], LI Hui[1], WANG Jianming[1]

（1. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China；

2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Computer Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China；）

*E-mail: 20232204030@stu.kust.edu.cn

Abstract To address the challenge of jointly ensuring secure transmission and sensing performance in reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted unmanned aerial vehicle (UAV)-enabled integrated sensing and communication (ISAC) systems under uncertain eavesdropping channel state information (CSI), this paper proposes a robust joint resource allocation method that maximizes the weighted sum of the average worst-case secrecy rate and the average normalized equivalent sensing metric. First, a deterministic bounded error model is adopted to characterize the CSI uncertainty of non-cooperative eavesdropping links, based on which a conservative upper bound on the received eavesdropping power is derived to establish a lower bound on the worst-case secrecy rate. Then, a robust joint optimization problem is formulated under multiple constraints. Finally, to address the high computational complexity and non-convexity of the original problem, a robust joint optimization algorithm based on alternating optimization (AO) is developed. The original problem is decomposed into three

收稿日期：2026-07-25

基金项目：国家自然科学基金（61761025）；云南省基础研究计划重点项目（202401AS070105）

作者简介：彭艺 女，博士，教授。主要研究方向：无线通信。何彦熹 女，硕士研究生。主要研究方向：通信感知一体化。杨青青女，博士，副教授。主要研究方向：智能反射面。

Fund： National Natural Science Foundation of China (61761025); Key Program of the Yunnan Provincial Basic Research Plan(202401AS070105)

网络首发时间：2026-11-13 13:10:12 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20261113.1044.001

subproblems: user scheduling and transmit covariance optimization, UAV trajectory optimization, and RIS phase shift optimization. These subproblems are solved iteratively by incorporating continuous relaxation and penalty techniques, successive convex approximation (SCA), semidefinite relaxation (SDR), and feasibility verification through substitution into the original constraints. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm effectively solves the robust optimization problem and achieves improved secure communication performance compared with benchmark schemes while maintaining sensing performance.

Key words integrated sensing and communication; reconfigurable intelligent surface; unmanned aerial vehicle; channel state information uncertainty; robust optimization; physical layer security

低空无人机网络是 6G 立体无线通信的典型应用形态，凭借部署灵活、机动能力强、易构建视距传输链路等优势，无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）已广泛应用于应急通信、区域监测、安防巡检等场景。区别于传统固定地面基站，无人机可根据业务需求、用户分布与环境障碍物动态调整飞行位置与轨迹，从空间维度灵活优化网络覆盖与传输质量。在各类低空业务中，单一的数据传输功能已无法满足多元化需求，业务侧同时提出了信息传输与目标探测的复合诉求，这也推动通信感知一体化（Integrated Sensing and Communication，ISAC）技术与无人机平台深度结合[1-2]。

ISAC 作为 6G 核心使能技术通过频谱、硬件与信号处理资源共享，让同一套通信设备并行完成数据传输与雷达探测任务，能够在频谱、能量受限的低空场景下，兼顾通信服务与感知探测双重目标，有效提升整体资源利用率[3]。然而无线信道的随机性与传播损耗，会制约 UAV-ISAC 系统的通信速率与感知精度；同时传统无线环境无法人为调控，信号易向无关区域扩散，进一步加剧系统性能损耗。针对这一问题，可重构智能表面（Reconfigurable Intelligent Surface，RIS）成为有效的解决方案。RIS 由大量低成本无源反射单元组成，可通过动态调节反射相位主动重塑无线传播路径[4-7]，Fang[8]研究了 RIS 辅助安全双功能雷达通信系统，通过联合优化发射波束和 RIS 相移提升雷达的接收信干噪比。Zhang 等[9]考虑了具有恶意目标的 IRS 辅助安全雷达通信系统，联合设计发射波束、人工噪声协方差和 RIS 相移矩阵，以提高系统安全性能。Kong 等[10]研究了目标安装 RIS 的双基地 ISAC 系统，分析了 RIS 在信号增强和信号抑制中的作用。

依托无人机、RIS 与 ISAC 的技术组合，低空立体网络的综合性能得到显著提升，但物理层安全成为制约系统落地的关键瓶颈[11-12]。无线信号的广播特性，使得无人机下发的保密信息极易被周边非合作节点截获，甚至被探测的感知目标也可执行被动窃听。为抵御窃听威胁，现有研究提出了人工噪声、鲁棒波束成形、RIS 相位调控等多种安全增强方案[13-17]。Wu 等[18]研究了 RIS 辅助 UAV-ISAC 系统中的轨迹与资源分配问题，通过联合优化 UAV 轨迹、用户调度、波束形成和 RIS 相移，实现通信速率与感知信噪比之间的权衡，已有研究还从轨迹规划、资源分配以及计算通信感知协同等角度开展了相关优化设计[19-20]。Yu 等[21]进一步研究了 RIS-UAV 辅助安全 ISAC 系统，通过联合优化 UAV 部署、发射波束、人工噪声功率和被动波束形成提升保密性能。Hua 等[22]研究了 IRS 辅助安全 ISAC 系统中的联合波束形成与反射相位设计，通过限制窃听目标的信息泄露并优化目标感知性能，实现通信安全与感知性能之间的协同设计。但在实际场景中，窃听者属于非合作节点，不会配合信道估计工作，导致研究中普遍采用的理想窃听信道状态信息（Channel State Information,CSI）假设难以成立[19-20]。一旦窃听链路 CSI 存在未知误差，基于标称信道设计的安全策略会高估系统保密能力，在真实环境中出现安全失效问题，这也是当前安全 ISAC 设计面临的核心挑战。

现有 RIS 辅助 UAV-ISAC 研究主要关注通信与感知性能的协同优化，但通常假设窃听链路 CSI 已知；考虑窃听 CSI 不确定性的鲁棒安全研究则较少涉及多用户跨时隙调度、UAV 轨迹、发射协方差与 RIS 相移的联合优化。因此，在窃听 CSI 不确定条件下，如何实现多用户 RIS 辅助 UAV-ISAC 系统的鲁棒安全资源分配，仍有进一步研究的必要。

针对上述问题，本文突破理想 CSI 假设的局限，将最坏情况保密速率约束、多用户调度、无人机轨迹与 RIS 相位调控纳入统一鲁棒优化框架。本文主要研究内容如下：1）建立窃听 CSI 不确定下 RIS 辅助 UAV-ISAC 鲁棒安全传输模型，推导窃听功率保守上界及最坏情况保密速率下界；2）构建基于 AO 的鲁棒联合优化算法，将原问题分解为调度与发射协方差、UAV 轨迹和 RIS 相移三个变量

块，并分别结合连续松弛与惩罚、SCA 及 SDR 处理各子问题的非凸约束；3）设置多维度仿真实验，从发射功率、RIS 单元数量、感知门限、CSI 误差半径、用户规模等角度，验证本文鲁棒性设计与联合优化策略的有效性。

1 系统模型与问题表述

1.1 系统架构

本文考虑可重构智能表面(RIS)辅助无人机(UAV)——通信感知一体化(ISAC)安全系统。UAV 搭载 V 根双功能发射天线在固定高度 H 处飞行，通过下行传输通信信号并利用其兼作感知照射信号，实现通信服务与目标感知任务。由 M 个无源反射单元组成的 RIS，部署于固定三维位置 $\mathrm{u}_R=[x_R,y_R,H_R]^T$，用于主动重塑无线传播信道；系统中还包含 K 个单天线合法用户、1个地面感知目标以及1个非合作窃听用户。UAV 到 RIS、合法用户以及感知目标的链路，采用 LoS 主导模型刻画；RIS 到合法用户、感知目标以及窃听用户的地面反射链路，采用 Rician 衰落模型。

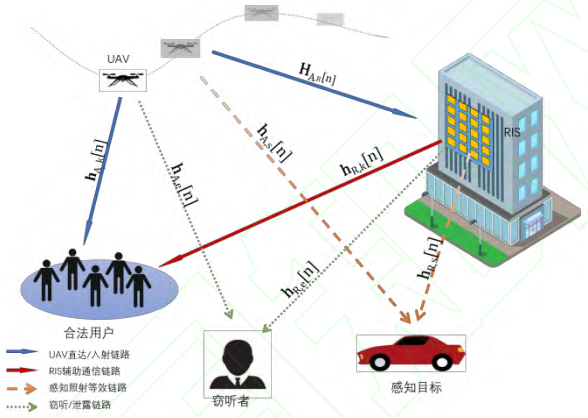

图 1 系统模型图
Figure 1 System model diagram

总任务时长 T 被划分为个等长时隙，每个时隙长度为 $\tau=T/N$。由于 τ 足够小，假设每个时隙内 UAV 位置与信道近似保持不变，在第 n 个时隙，UAV 的三维位置为 $\boldsymbol{q}[n]=[x[n],y[n],H]^T,n=1,\ldots,N$，$x[n]$ 和 $y[n]$ 分别表示 UAV 在水平平面上的坐标。

定义 UAV 在第 n 时隙的全局发射信号为

$$\boldsymbol{x}[n]=\sum_{k=1}^{K}s_k[n]\boldsymbol{w}_k[n]c_k[n]. \tag{1}$$

式中，$s_k[n]\in\{0,1\}$ 是用户调度二元变量，$\boldsymbol{w}_k[n]\in\mathbb{C}^{V\times 1}$ 是面向用户 k 的发射波束向量，归一化信息符号 $c_k[n]\sim\mathcal{CN}(0,1)$。

1）合法用户 k 接收信号

$$y_k[n]=(L_{\mathrm{A},k}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{A},k}^{\mathrm{H}}[n]+L_{\mathrm{R},k}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{R},k}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}[n])x[n]+z_k[n]. \tag{2}$$

2）窃听者标称接收信号

$$y_{\mathrm{e}}[n]=(L_{\mathrm{A,e}}[n]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}^{\mathrm{H}}[n]+L_{\mathrm{R},e}[n]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,e}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}[n])x[n]+z_{\mathrm{e}}[n]. \tag{3}$$

3）感知目标处等效照射信号

$$y_{\mathrm{s}}[n]=(L_{\mathrm{A,s}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,s}}^{\mathrm{H}}[n]+L_{\mathrm{R,s}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,s}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}[n])x[n]+z_{\mathrm{s}}[n]. \tag{4}$$

式中，$L_{\mathrm{A},j}[n]$和$L_{R,j}[n]$分别为 UAV—用户及 RIS—用户链路的幅度路径增益；UAV—RIS 链路的大尺度衰减及阵列响应包含在$\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}[n]\in\mathbb{C}^{M\times V}$中；$\boldsymbol{h}_{\mathrm{A},j}[n]\in\mathbb{C}^{V\times 1}$和$\boldsymbol{h}_{\mathrm{R},j}[n]\in\mathbb{C}^{M\times 1}$分别表示对应链路的归一化小尺度信道向量。$z_j[n]\sim\mathcal{CN}(0,\sigma_j^2)$表示节点 j 处的加性高斯白噪声。RIS 相移矩阵$\boldsymbol{\Phi}[n]=\mathrm{diag}\left(e^{j\varphi_1[n]},...,e^{j\varphi_M[n]}\right),\left|e^{j\varphi_m[n]}\right|=1$。

1.2 通信模型

定义$D_{ij}[n]=d_{ij}^2[n]$为时隙 n 内节点 i 与节点 j 之间的三维距离的平方。对应链路的功率路径增益为$G_{ij}[n]=\beta_0 D_{ij}^{-\alpha_{ij}/2}[n]$，幅度路径增益为$L_{ij}[n]=\sqrt{G_{ij}[n]}$。其中，参考功率增益对应 1m 参考距离，路径损耗指数α用于描述传播损耗。由式(2)，合法用户 k 的全局等效信道表示为

$$\boldsymbol{h}_k[n]=L_{\mathrm{A},k}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{A},k}[n]+L_{\mathrm{R},k}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{R},k}[n]. \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{A},k}[n]\in\mathbb{C}^{V\times 1}$，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{R},k}[n]\in\mathbb{C}^{M\times 1}$。

根据用户调度约束，每个时隙至多调度一个合法用户，未调度用户的发射协方差由调度—功率耦合约束限制为零，因此，原始传输模型不存在合法用户间的同频干扰，式(6)采用信号功率与噪声功率之比定义被调度用户的接收 SNR。则时隙 n 内，合法用户 k 的合法接收 SNR 和对应可达通信速率为

$$\gamma_k[n]=\frac{\mathrm{Tr}\left(\boldsymbol{H}_k[n]\boldsymbol{W}_k[n]\right)}{\sigma_k^2}. \tag{6}$$

$$R_k[n]=log_2\left(1+\gamma_k[n]\right). \tag{7}$$

式中，信道外积矩阵$\boldsymbol{H}_k[n]=\boldsymbol{h}_k[n]\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}[n]$，$\boldsymbol{W}_k[n]=\boldsymbol{w}_k[n]\boldsymbol{w}_k^H[n]$是第 n 个时隙面向用户 k 的发射协方差。

1.3 感知模型

本文采用目标处等效照射功率评价感知侧资源配置，并以固定噪声参考功率构造等效感知 SNR 指标，不显式建立完整双程回波及接收处理模型。当目标散射特性、返回链路增益及接收处理增益固定或变化可忽略时，目标照射功率与实际回波接收 SNR 具有单调对应关系；否则，本文指标仅作为目标照射资源配置的代理指标。定义感知目标的全局等效信道为

$$\boldsymbol{h}_{\mathrm{s}}[n]=L_{\mathrm{A,s}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,s}}[n]+L_{\mathrm{R,s}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,s}}[n]. \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,s}}[n]\in\mathbb{C}^{V\times 1}$，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,s}}[n]\in\mathbb{C}^{M\times 1}$。

UAV 发射信号照射感知目标后，第 n 时隙的目标处等效总接收功率为

$$P_{\mathrm{s}}[n]=\sum_{k=1}^{K}\mathrm{Tr}\left(\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}[n]\boldsymbol{W}_k[n]\right). \tag{9}$$

式中，感知信道外积矩阵$\boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}[n]=\boldsymbol{h}_{\mathrm{s}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{H}}[n]$。

第 n 时隙的等效感知 SNR 指标定义为

$$\gamma_{\mathrm{s}}[n]=\frac{\left(P_{\mathrm{s}}[n]\right)}{\sigma_{\mathrm{s}}^2}. \tag{10}$$

式中，σ_{s}^2为预先设定的固定噪声参考功率，用于构造等效感知 SNR 指标。

为调节感知项的数值尺度，便于构造通信—感知加权目标，引入归一化感知指标$\gamma_s^{\max}$,则

$$\eta_{\mathrm{s}}[n]=\min\left\{\frac{\gamma_{\mathrm{s}}[\mathrm{n}]}{\gamma_{\mathrm{s}}^{\max}},1\right\}. \tag{11}$$

式中，$\eta_{\mathrm{s}}[n]\in[0,1]$，用于表征感知服务质量；$\gamma_s^{\max}>0$ 为预先设定的固定归一化参考值。该映射在未饱和区间保持等效感知指标的大小关系，超过参考值后饱和，不再区分该区间内的照射功率差异。本文采用该指标表征目标照射资源的满足程度，适用于以照射能量保障为主要需求的通信—感知资源分配研究，不进一步评价目标检测概率或参数估计精度。

1.4CSI 不确定性模型

由于窃听者的非合作属性，UAV 无法获得精确的 CSI。本文假设 UAV 仅掌握窃听链路的标称 CSI，并采用确定性有界误差模型描述其不确定性。UAV 到窃听者的直达信道和 RIS 到窃听者的反射链路分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]=\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n],\\ \left\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]\right\|_2\le\xi_{\mathrm{A,e}}\left\|\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}[n]\right\|.\\ \boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]=\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,e}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n],\\ \left\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]\right\|_2\le\xi_{\mathrm{R,e}}\left\|\bar{\boldsymbol{h}}_{R,e}[n]\right\|.\end{cases} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]\in\mathbb{C}^{V\times1}$，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]\in\mathbb{C}^{M\times1}$，其中 $\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}[n]$ 和 $\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,e}}[n]$ 为对应链路的标称 CSI，$\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]$ 和 $\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]$ 为 CSI 估计误差，$\xi_{\mathrm{A,e}}$ 和 $\xi_{\mathrm{R,e}}$ 表示相对于标称信道尺度的归一化 CSI 不确定性半径。

窃听用户的等效信道为

$$\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]=\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]. \tag{13}$$

$$\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]\triangleq(L_{\mathrm{A,e}}[n]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}[n]+L_{\mathrm{R,e}}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,e}}[n]. \tag{14}$$

$$\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]=L_{\mathrm{A,e}}[n]\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]+L_{\mathrm{R,e}}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]. \tag{15}$$

由三角不等式与矩阵-向量范数相容性质 $\|\boldsymbol{A}x\|_2\le\|\boldsymbol{A}\|_2\|x\|_2$ 得

$$\left\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\right\|_2\le L_{\mathrm{A,e}}[n]\xi_{\mathrm{A,e}}\left\|\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{A,e}}[n]\right\|_2+L_{\mathrm{R,e}}[n]\left\|\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\right\|_2\xi_{\mathrm{R,e}}\left\|\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,e}}[n]\right\|_2\triangleq\xi_{\mathrm{e}}[n]. \tag{16}$$

式中 $\xi_{\mathrm{e}}[n]$ 为等效不确定性半径。

因此，原始直达链路与 RIS 反射链路的不确定性可由如下等效范数球进行保守包络

$$\Omega_{\mathrm{e}}[n]=\left\{\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\mid\left\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\right\|_2\le\xi_{\mathrm{e}}[n]\right\}. \tag{17}$$

该集合是对式(12)原始 CSI 不确定性的保守包络，若某一资源分配方案在 $\Omega_{\mathrm{e}}[n]$ 下满足鲁棒保密约束，则其对于原始 CSI 不确定性模型同样满足保密要求。

1.5 鲁棒保密速率建模

为应对 CSI 不确定性，基于等效不确定集 $\Omega_{\mathrm{e}}[n]$ 构造保守上界矩阵。对任意 $\Delta h_{\mathrm{e}}[n]\in\Omega_{\mathrm{e}}[n]$ 有

$$\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]=\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]+\left(2\xi_{\mathrm{e}}[n]\left\|\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]\right\|_2+\xi_{\mathrm{e}}^2[n]\right)\boldsymbol{I}_{\mathrm{V}}. \tag{18}$$

$$\left(\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\right)^H\boldsymbol{W}_k[n]\left(\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{e}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\right)\le\mathrm{Tr}\left(\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{W}_k[n]\right). \tag{19}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]$是窃听接收功率的保守上界矩阵。基于该上界满足保密约束，可保证原始 CSI 不确定集下相应保密要求成立。

根据等效不确定集的定义及矩阵范数性质，可得 $\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]\le\xi_{\mathrm{e}}^2[n]\boldsymbol{I}_{\mathrm{V}}$，且 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]+\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]\le 2\xi_{\mathrm{e}}[n]\|\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\|_2\,\boldsymbol{I}_{\mathrm{V}}$。因而 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]\le\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]$。进一步利用 $\boldsymbol{W}_k[n]\ge 0$，有 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{W}_k[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\le\mathrm{Tr}\left(\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{W}_k[n]\right)$，因此，所构造的窃听功率、SNR 及速率上界均适用于原始 CSI 不确定集。对于通过原问题约束检验的最终资源方案，其实际保密速率不低于相应的保守下界。

得到最坏情况窃听信噪比上界和窃听速率上界为

$$\gamma_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]=\frac{\mathrm{Tr}(\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{W}_k[n])}{\sigma_{\mathrm{e}}^2}. \tag{20}$$

$$R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]=log_2(1+\gamma_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]). \tag{21}$$

设辅助变量 $r_k[n]$表示用户 k 在第 n 个时隙可保障的最坏情况保密速率下界

$$0\le r_k[n]\le R_k[n]-\hat{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n],\forall k,n. \tag{22}$$

1.6 问题表述

定义平均最坏情况保密速率和平均归一化感知性能为

$$\bar{R}_{\mathrm{sec}}=(\frac{1}{KN})\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}r_k[n]. \tag{23}$$

$$\bar{\eta}_{\mathrm{s}}=(\frac{1}{N})\sum_{n=1}^{N}\eta_{\mathrm{s}}[n]. \tag{24}$$

下文所述平均最坏情况保密速率均指由上述窃听功率保守上界构造的平均保密速率下界。

本文联合优化用户调度 $\boldsymbol{S}$、发射协方差 $\boldsymbol{W}$、UAV 轨迹 $\boldsymbol{Q}$、RIS 相移 $\boldsymbol{\Phi}$ 以及辅助变量 r 和 η_{s}，实现平均最坏情况保密速率与平均归一化等效感知性能之间的权衡。本文考虑如下鲁棒联合优化问题 F1：

$$
\begin{aligned}
\text{F1:}\quad & \max_{\boldsymbol{S},\boldsymbol{W},\boldsymbol{Q},\boldsymbol{\Phi},r,\eta} \ \beta_{\mathrm{C}}\bar{R}_{\mathrm{sec}}+\left(1-\beta_{\mathrm{C}}\right)\bar{\eta}_{\mathrm{s}}. \\
\text{s.t}\quad & \text{C1}: s_k[n]\in\{0,1\}, \sum_{k=1}^{K} s_k[n]\le 1 \forall k,n; \\
& \text{C2}: \sum_{k=1}^{K}\mathrm{Tr}\left(\boldsymbol{W}_k[n]\right)\le P_{\mathrm{UAV}}, \\
& \quad \mathrm{Tr}\left(\boldsymbol{W}_k[n]\right)\le s_k[n]P_{\mathrm{UAV}}, \\
& \quad \boldsymbol{W}_k[n]\ge 0, \mathrm{rank}\left(\boldsymbol{W}_k[n]\right)\le 1; \\
& \text{C3}: \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{\mathrm{n}=1}^{N}\gamma_{\mathrm{s}}[n]\ge \Gamma_{\mathrm{SNR}}, \\
& \text{C4}: \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} r_k[n]\ge R_{\min k}, \forall k; \\
& \text{C5}: \left\|\boldsymbol{q}[n+1]-\boldsymbol{q}[n]\right\|_2\le V_{\max\tau}, \\
& \quad \boldsymbol{q}[1]=\boldsymbol{q}_0, \boldsymbol{q}[N]=\boldsymbol{q}_{\mathrm{F}}, \\
& \quad \boldsymbol{q}_{\min}\le \boldsymbol{q}[n]\le \boldsymbol{q}_{\max}; \\
& \text{C6}: \left|e^{j\varphi_m[n]}\right|=1, \forall m,n; \\
& \text{C7}: \eta_{\mathrm{s}}[n]\le \frac{\gamma_{\mathrm{s}}[\mathrm{n}]}{\gamma_{\mathrm{s}}^{\max}}, 0\le\eta_{\mathrm{s}}[n]\le 1\forall n; \\
& \text{C8}: 0\le r_k[n]\le R_k[n]-\hat{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n], \forall k,n.
\end{aligned}
\tag{25}
$$

式中，$\beta_{\mathrm{C}}\in[0,1]$ 和 $1-\beta_{\mathrm{C}}$ 分别为通信与感知权重；Γ_{SNR} 和 $R_{\min,k}$ 分别为感知门限及用户最低平均保密速率要求；P_{UAV} 和 $V_{\max\tau}$ 分别为 UAV 最大发射功率及最大飞行速度；$\boldsymbol{q}_{\min}$、$\boldsymbol{q}_{\max}$ 为空域边界。C1-C8 分别对应用户调度、发射功率及协方差、感知 QoS、平均保密速率、UAV 运动学与飞行区域、RIS 单位模以及辅助变量约束。

2 优化设计

问题 F1 包含二元调度变量、秩一协方差约束、保密速率差分结构及 RIS 单位模约束，属于非凸混合优化问题。本文采用基于 AO 的鲁棒联合优化求解框架，将调度与发射协方差、UAV 轨迹和 RIS 相移划分为三个变量块，分别结合连续松弛与惩罚、SCA 及 SDR 进行求解。

具体地，每轮迭代依次更新调度与发射协方差、UAV 轨迹和 RIS 相移三个变量块。算法初始化时，UAV 轨迹采用起终点线性插值，用户调度采用轮转方式，RIS 各反射单元的初始相位在 $[0,2\pi)$ 内随机生成，发射协方差根据通信与感知等效信道方向加权构造为秩一矩阵。计算辅助变量后，对初始点进行 C1-C8 原始约束检查，仅以通过检查的可行初值启动 AO 迭代；若未获得可行初值，则终止本次求解。

迭代过程中，各子问题的松弛或恢复结果均作为候选解。恢复至原变量域后，重新计算原始目标函数并检验 C1-C8，仅接受满足原始约束且目标值不低于当前可行解的候选方案，否则保留当前解。算法流程如下。

算法	鲁棒交替优化算法
	输入：系统参数，初始候选点 $(\boldsymbol{S}^0,\boldsymbol{W}^0,\boldsymbol{Q}^0,\boldsymbol{\Phi}^0)$，最大迭代次数 I_{AO}，收敛阈值 ε。
	输出：用户调度 $\boldsymbol{S}^\star$，发射协方差 $\boldsymbol{W}^\star$，UAV 轨迹 $\boldsymbol{Q}^\star$，RIS 相移 $\boldsymbol{\Phi}^\star$。
	初始化迭代索引 $i=0$，根据初始候选点计算相应辅助变量；
	检查初始候选点是否满足原问题约束 C1—C8；若未通过检查，则终止本次求解；否则，计算初始目标函数值 F^0；
	固定 $\boldsymbol{Q}^i$ 和 $\boldsymbol{\Phi}^i$，求解调度与发射协方差子问题，得到 $\boldsymbol{S}^{i+1}$、$\boldsymbol{W}^{i+1}$ 和 r^{i+1}；
	固定 $\boldsymbol{S}^{i+1}$、$\boldsymbol{W}^{i+1}$ 和 $\boldsymbol{\Phi}^i$，求解 UAV 轨迹子问题，得到 $\boldsymbol{Q}^{i+1}$；
	固定 $\boldsymbol{S}^{i+1}$、$\boldsymbol{W}^{i+1}$ 和 $\boldsymbol{Q}^{i+1}$，求解 RIS 相移子问题，得到 $\boldsymbol{\Phi}^{i+1}$；
	回代计算原始目标函数值 F^{i+1}，并检查约束 C1 - C8 的可行性；
	若候选解不可行或 $F^{i+1}<F^i$，则保留上一轮可行解；
	更新迭代索引 $i=i+1$；
	当迭代次数达到 50，或至少完成 10 轮且连续 5 轮原始目标相对变化均不超过 10^{-3} 时停止。
0	输出 $\boldsymbol{S}^\star=\boldsymbol{S}^i$、$\boldsymbol{W}^\star=\boldsymbol{W}^i$、$\boldsymbol{Q}^\star=\boldsymbol{Q}^i$、$\boldsymbol{\Phi}^\star=\boldsymbol{\Phi}^i$。

2.1 子问题 1：调度与发射协方差优化

固定 UAV 轨迹 $\boldsymbol{Q}$ 和 RIS 相移 $\boldsymbol{\Phi}$ 时，信道 $\boldsymbol{H}_k[n]$ 和感知链路矩阵 $\boldsymbol{A}_s[n]$ 以及窃听上界矩阵 $\hat{\boldsymbol{H}}_e[n]$ 为已知量。该子问题的非凸性来自二元调度变量、秩一协方差约束以及保密速率差分结构。

首先将二元调度变量松弛为 $0\le s_k[n]\le 1$，用于二元调度子问题的数值求解，最终调度结果仍需恢复至 $s_k[n]\in\{0,1\}$，并满足 $\sum_k s_k[n]\le 1$，系统性能按恢复后的原始调度变量计算。定义二元性惩罚项

$$P_{\text{bin}}(\boldsymbol{S})=\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}(s_k[n]-s_k^2[n]). \tag{26}$$

在第 i 次迭代点 $s_k^i[n]$ 处进行一阶上界近似，从而得到可处理的凸化调度子问题：

$$\begin{aligned} &s_k[n]-s_k^2[n]\le s_k[n]-(s_k^i[n])^2-\\ &2s_k^i[n](s_k[n]-s_k^i[n])\triangleq p_k^i[n]. \end{aligned} \tag{27}$$

在目标函数中加入 $-\rho_{k,n}\hat{p}_k^i[n]$ 作为惩罚项，其中 $\rho>0$ 为惩罚因子，定义二元性残差为

$$\varepsilon_{\text{bin}}^{(i)}=\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}s_k^{(i)}[n](1-s_k^{(i)}[n]). \tag{28}$$

惩罚因子采用自适应递增策略，其迭代更新规则可表示为

$$\rho^{(i+1)}=\begin{cases}\min\{\mu\rho^{(i)},\rho_{\max}\}, & \varepsilon_{\text{bin}}^{(i)}>\varepsilon_{\text{bin}}\\ \rho^{(i)}, & \varepsilon_{\text{bin}}^{(i)}\le\varepsilon_{\text{bin}}\end{cases} \tag{29}$$

式中，$\mu>1$ 为惩罚放大系数，$\rho_{\max}$ 为惩罚因子预设上限。惩罚项仅用于推动松弛调度变量接近二元值，最终性能评价仍基于不含惩罚项的原始目标函数。

因此子问题 1 可写为

$$\begin{aligned}\text{F2:}\max_{\boldsymbol{S},\boldsymbol{W},r,\eta}\ & \beta_C\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}r_k[n]+(1-\beta_C)\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\eta_s[n]- \\ & \rho\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}\hat{p}_k^{(i)}[n].\end{aligned}$$

s.t C3、C4、C7，

$$\begin{aligned}&\text{C1a: } 0\le s_k[n]\le 1,\quad \sum_{k=1}^{K}s_k[n]\le 1,\quad \forall k,n \\ &\text{C2a: } \sum_{k=1}^{K}\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_k[n])\le P_{\mathrm{UAV}},\quad \forall n \\ &\quad \mathrm{Tr}(\boldsymbol{W}_k[n])\le s_k[n]P_{\mathrm{UAV}},\boldsymbol{W}_k[n]\ge 0,\ \forall k,n \\ &\text{C8a}:\quad 0\le r_k[n]\le R_k[n]-\tilde{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n],\quad \forall k,n \\ &\text{C9: } \hat{p}_k^{(i)}[n]=s_k[n]+\left(s_k^{(i)}[n]\right)^2-2s_k^{(i)}[n]s_k[n],\quad \forall k,n\end{aligned} \tag{30}$$

式中，$\tilde{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]$是对窃听速率上界在当前迭代点的一阶近似。

具体的，令 $x_k[n]=\mathrm{Tr}(\hat{\boldsymbol{H}}_e[n]\boldsymbol{W}_k[n])$，并在 $\boldsymbol{W}_k^i[n]$ 处对窃听速率上界进行一阶展开为

$$\tilde{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]=R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub},i}[n]+\frac{\mathrm{Tr}(\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n](\boldsymbol{W}_k[n]-\boldsymbol{W}_k^i[n]))}{ln2\cdot\left(\sigma_{\mathrm{e}}^2+\mathrm{Tr}(\hat{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}[n]\boldsymbol{W}_k^i[n])\right)}. \tag{31}$$

由于 $\log_2(1+x)$ 为凹函数，上式为 $R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]$ 的全局一阶上界，并在当前迭代点函数值与梯度一致。因此约束 $r_k[n]+R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}[n]\le R_k[n]$ 是原保密约束的保守凸近似。

在该子问题中，忽略秩一约束并采用上述近似后，可转化为含半正定约束的凸优化问题，并通过 CVX 求解。求解后恢复整数调度，对发射协方差进行秩一恢复，并通过原问题约束及原始目标函数回代检验；仅接受可行且不降低目标值的候选解。

2.2 子问题 2：UAV 轨迹优化

轨迹子问题主要考虑 UAV 位置对大尺度路径损耗的影响，小尺度衰落及阵列方向响应在每轮迭代点处更新，并在当前 SCA 子问题中视为给定参数。固定其他变量后，UAV 轨迹通过距离相关路径损耗影响合法用户、感知目标及窃听链路增益。定义 UAV 与各节点之间的三维欧氏距离平方为 $D_{\mathrm{R}}[n]=\|\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{u}_{\mathrm{R}}\|_2^2$、$D_k[n]=\|\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{u}_k\|_2^2$、$D_{\mathrm{s}}[n]=\|\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}}\|_2^2$、$D_{\mathrm{e}}[n]=\|\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{u}_{\mathrm{e}}\|_2^2$。

对于 LoS 主导链路，路径增益函数 $g(D)=\beta_0 D^{-\frac{\alpha}{2}}$ 在 $D>0$ 上为凸函数，因此在当前点 D^i 处一阶泰勒展开得到其全局下界：

$$g(D)\ge g(D^i)+g'(D^i)(D-D^i). \tag{32}$$

$$g'(D^i)=-(\frac{\alpha}{2})\beta_0(D^i)^{-\frac{\alpha}{2}-1}. \tag{33}$$

在第 i 次迭代中，令 $\Delta\boldsymbol{q}[n]=\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{q}^{(i)}[n]$，则合法用户速率采用如下二次代理

$$\hat{R}_k^{(i)}[n]=R_k\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)+\nabla R_k^T\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)\Delta\boldsymbol{q}[n]-\frac{L_k^{(i)}}{2}\|\Delta\boldsymbol{q}[n]\|^2$$

窃听速率上界采用如下二次代理

$$\hat{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub},(i)}[n]=R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)+\nabla R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}\,T}\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)\Delta\boldsymbol{q}[n]+\frac{L_{\mathrm{e},k}^{(i)}}{2}\|\Delta\boldsymbol{q}[n]\|^2$$

等效感知 SNR 指标采用如下二次代理

$$\hat{\gamma}_{\mathrm{s}}^{(i)}[n]=\gamma_{\mathrm{s}}\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)+\nabla\gamma_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}}\left(\boldsymbol{q}^{(i)}[n]\right)\Delta\boldsymbol{q}[n]-\frac{L_{\mathrm{s}}^{(i)}}{2}\|\Delta\boldsymbol{q}[n]\|^2$$

式中，$L_k^{(i)}$、$L_{\mathrm{e},k}^{(i)}$ 和 $L_{\mathrm{s}}^{(i)}$ 为正的曲率调节参数，结合信任域控制候选轨迹的更新幅度。候选轨迹是否接受，由原问题回代检验确定。

因此 UAV 轨迹子问题可写为

$$\begin{aligned}
&\mathrm{F3}:\max_{\boldsymbol{Q},r,\eta}\ \beta_C\frac{1}{KN}\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}r_k[n]+(1-\beta_C)\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\eta_{\mathrm{s}}[n].\\
&s.t.\ \ \mathrm{C4,C5}\\
&\quad \mathrm{C3b}:\ \ \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\hat{\gamma}_{\mathrm{s}}^{(i)}[n]\geq\Gamma_{\mathrm{SNR}}\\
&\quad \mathrm{C7b}:\ \ 0\leq\eta_{\mathrm{s}}[n]\leq 1,\quad \eta_{\mathrm{s}}[n]\leq\frac{\hat{\gamma}_{\mathrm{s}}^{(i)}[n]}{\gamma_{\mathrm{s}}^{\max}},\quad \forall n\\
&\quad \mathrm{C8b}:\ \ 0\leq r_k[n]\leq\hat{R}_k^{(i)}[n]-\hat{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub},(i)}[n],\quad \forall k,n\\
&\quad \mathrm{C10}:\|\boldsymbol{q}[n]-\boldsymbol{q}^{i}[n]\|_2\leq\Delta_q,\forall n.
\end{aligned}\tag{34}$$

式中，C10 为信任域约束，用于保证局部线性化在可信邻域内有效；$\hat{R}_k^{(i)}[n]$、$\hat{R}_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub},(i)}[n]$ 和 $\hat{\gamma}_{\mathrm{s}}^{(i)}[n]$ 分别表示在当前轨迹点处构造的合法用户速率、窃听速率上界及等效感知 SNR 指标的二次代理函数。

求得候选轨迹后，利用原始等效信道重新计算保密速率下界、感知约束及目标函数。仅接受满足原始约束且目标值不下降的候选轨迹，否则缩小信任域重新求解或保留上一轮轨迹。该子问题经凸化后可转化为带二阶锥约束的凸优化问题，最终可行性由原问题回代检验确定。

2.3 子问题 3：RIS 相移优化

由于窃听等效信道中包含 RIS 反射链路，需要进一步说明前述等效不确定集在 RIS 相移更新过程中仍然有效。由式(15)可知，窃听 CSI 误差由直达链路误差和 RIS 反射链路误差叠加构成。结合三角不等式、矩阵范数相容性及式(16)，有

$$\begin{aligned}
&\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}[n]\|_2\leq L_{\mathrm{A,e}}[n]\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{A,e}}[n]\|_2+\\
&L_{\mathrm{R,e}}\|\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\|_2\|\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{H}}[n]\|_2\|\Delta\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,e}}[n]\|_2\leq\xi_{\mathrm{e}}[n].
\end{aligned}\tag{35}$$

由于 RIS 相移矩阵满足单位模约束，其相位变化不改变等效误差半径，因此式（17）的等效不确定集仍适用于 RIS 相移优化，但标称复合窃听信道及其功率、范数项需随相位同步更新。

由于单位模约束 $|e^{j\varphi_{m[n]}}|=1$ 非凸，令

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{v}[n]=[e^{-j\varphi_1[n]},...,e^{-j\varphi_M[n]}]^T,\\
&\bar{\boldsymbol{v}}[n]=[\boldsymbol{v}^T[n],1]^T,\\
&\boldsymbol{U}[n]=\bar{\boldsymbol{v}}[n]\bar{\boldsymbol{v}}^H[n].
\end{aligned}\tag{36}$$

此时单位模约束可等价表示为

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{U}[n]\geq 0,\quad \forall n,\\
&[\boldsymbol{U}[n]]_{m,m}=1,m=1,\ldots,M+1,\ \forall n,\\
&\mathrm{rank}(\boldsymbol{U}[n])=1\ \ \forall n,.
\end{aligned}\tag{37}$$

在固定 $\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{Q}$ 后，各复合链路功率可写为关于 $\boldsymbol{U}[n]$ 的迹函数。对任一合法用户、感知目标或窃听节点 x，其复合列信道表示为 $\boldsymbol{h}_x[n]=\boldsymbol{B}_x[n]\boldsymbol{v}[n]+\boldsymbol{d}_x[n]$。其中，$\boldsymbol{B}_x[n]=L_{\mathrm{R},x}[n]\boldsymbol{H}_{\mathrm{AR}}^{\mathrm{H}}[n]\mathrm{diag}(\boldsymbol{h}_{\mathrm{R},x}[n])$，$\boldsymbol{d}_x[n]=L_{\mathrm{A},x}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{A},x}[n]$，其中，迹函数中的窃听复合信道基准项由标称 CSI 构造，CSI 不确定性仍由式(20) ～ 式(21)给出的最坏情况窃听上界处理。于是，对用户 k 的发射协方差，有 $\boldsymbol{h}_x^{\mathrm{H}}[n]\boldsymbol{W}_k[n]\boldsymbol{h}_x[n]=\mathrm{Tr}\left(\boldsymbol{A}_{x,k}[n]\boldsymbol{U}[n]\right)$，其中

$$\boldsymbol{A}_{x,k}[n]=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_x^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{B}_x & \boldsymbol{B}_x^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{d}_x\\ \boldsymbol{d}_x^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{B}_x & \boldsymbol{d}_x^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}_k\boldsymbol{d}_x\end{bmatrix} \tag{38}$$

矩阵中各项均对应时隙 n。

相应的合法、感知和窃听链路应分别为 $\boldsymbol{A}_{k,j}[n]$、$\boldsymbol{A}_{\mathrm{s},j}[n]$ 和 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{e},j}[n]$，$\boldsymbol{U}[n]\in\mathbb{C}^{(M+1)\times(M+1)}$。

因此 RIS 相移子问题 3 可重构为

$$\begin{aligned}&\mathrm{F4}:\max_{\boldsymbol{U}[n],r,\eta}\ \beta_C\frac{1}{KN}\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}r_k[n]+(1-\beta_C)\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\eta_{\mathrm{s}}[n]\\ &\text{s.t. C4}\\ &\quad\text{C6c: }\boldsymbol{U}[n]\succeq 0,\quad \forall n,\\ &\qquad[\boldsymbol{U}[n]]_{m,m}=1,m=1,\ldots,M+1,\ \forall n,\\ &\qquad\mathrm{rank}(\boldsymbol{U}[n])=1\ \ \forall n,\\ &\quad\text{C3c}:\ \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\hat{\gamma}_{\mathrm{s},\boldsymbol{\Phi}}^{(i)}[n]\ge\Gamma_{\mathrm{SNR}}\\ &\quad\text{C7c}:\ 0\le\eta_s[n]\le 1,\quad \eta_s[n]\le\frac{\hat{\gamma}_{\mathrm{s},\boldsymbol{\Phi}}^{(i)}[n]}{\gamma_{\mathrm{s}}^{\max}},\quad\forall n\\ &\quad\text{C8c}:\ 0\le r_k[n]\le\hat{R}_{k,\boldsymbol{\Phi}}^{(i)}[n]-\hat{R}_{\mathrm{e},k,\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{ub},(i)}[n],\quad\forall k,n.\end{aligned} \tag{39}$$

式中，$\hat{R}_{k,\boldsymbol{\Phi}}^{(i)}[n]$、$\hat{R}_{\mathrm{e},k,\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{ub},(i)}[n]$ 和 $\hat{\gamma}_{\mathrm{s},\boldsymbol{\Phi}}^{(i)}[n]$ 分别表示合法速率、窃听速率上界及等效感知 SNR 指标的相应表达。合法用户速率保留对数形式，等效感知 SNR 指标由照射功率的仿射表达得到，窃听速率上界采用下述一阶切线上界。固定发射协方差和 UAV 轨迹后，标称窃听功率及标称信道范数平方均为提升变量的仿射函数，因此式(20)～式(21)中的窃听速率上界关于提升变量为凹函数。采用其在当前点处的一阶切线上界，构造保密约束的保守凸近似。其中，

$$\hat{R}_{\mathrm{e},k,\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{ub},(i)}[n]=R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}\left(\boldsymbol{U}^{(i)}[n]\right)+\left\langle\nabla_{\boldsymbol{U}}R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}\left(\boldsymbol{U}^{(i)}[n]\right),\boldsymbol{U}[n]-\boldsymbol{U}^{(i)}[n]\right\rangle$$

上式在当前标称复合窃听信道范数为正时成立，并满足 $\hat{R}_{\mathrm{e},k,\boldsymbol{\Phi}}^{\mathrm{ub},(i)}[n]\ge R_{\mathrm{e},k}^{\mathrm{ub}}(\boldsymbol{U}[n])$。

忽略 $\mathrm{rank}\left(\boldsymbol{U}[n]\right)=1$ 后，RIS 相移子问题转化为半正定松弛问题，$\boldsymbol{U}[n]\succeq 0,\ [\boldsymbol{U}[n]]_{m,m}=1$。若 SDP 解满足近似秩一条件，则采用主特征向量恢复；否则采用高斯随机化生成候选向量。对所得增广候选向量，先除以其非零的最后一个分量，再对前 M 个分量进行单位模投影。$\theta_m[n]=e^{j\arg(\tilde{\theta}_m[n])}$，$m=1,\ldots,M$。对每个候选相移，重新计算合法速率、等效感知 SNR 指标、窃听上界和保密速率下界，仅接受同时满足约束且不降低原始目标函数的候选相移。若所有候选均不可行或不改善目标，则保留上一轮相移。

忽略秩一约束后，RIS 相移子问题转化为半正定松弛问题。若所得解满足近似秩一条件，则采用主特征向量恢复；否则通过高斯随机化生成候选向量，并经归一化及单位模投影恢复 RIS 相移。对各候选方案重新计算原始保密速率下界、感知指标及目标函数，仅接受满足原始约束且不降低目标值的方案，否则保留上一轮相移。

2.4 目标序列收敛性说明

设算法从满足原问题约束的可行初值出发。每轮迭代均通过原始约束及目标函数回代检验，仅接受可行且目标值 $\mathrm{F}^{(i+1)}\ge\mathrm{F}^{(i)}$ 的候选解，因此接受后的目标值序列单调非减。又由于发射功率受限、飞行区域有界、噪声功率为正且归一化感知指标不超过 1，原始加权目标存在有限上界，故该目标值序列收敛。需要指出的是，该结论仅针对接受后的目标值序列，不代表原混合非凸问题必然收敛至局部最优解或 KKT 点。

2.5 算法复杂度分析

设 AO 实际迭代次数为 I_{AO}，调度与发射协方差、UAV 轨迹和 RIS 相移三个子问题的单次计算复杂度分别为 C_{SW}、C_{Q} 和 $C_{\boldsymbol{\Phi}}$，则总体主要计算复杂度为

$$\mathrm{O}\left(I_{\mathrm{AO}}\left(C_{\mathrm{SW}}+C_{\mathrm{Q}}+C_{\Phi}\right)\right). \tag{40}$$

三个子问题经凸化后分别涉及半正定规划和二阶锥规划。设其标准锥规划形式的标量决策变量维数为 d_i，约束数量为 m_i，障碍参数为 ν_i，其中 $\left(i\in SW,Q,\Phi\right)$。采用稠密内点法并忽略低阶运算项时，三个子问题的单次求解复杂度可保守估计为

$$\begin{aligned} C_{SW}&=O\left(\sqrt{\nu_{SW}}\left(d_{SW}+m_{SW}\right)^3 L_\varepsilon\right)\\ C_{Q}&=O\left(\sqrt{\nu_{Q}}\left(d_{Q}+m_{Q}\right)^3 L_\varepsilon\right)\\ C_{\Phi}&=O\left(\sqrt{\nu_{\Phi}}\left(d_{\Phi}+m_{\Phi}\right)^3 L_\varepsilon\right) \end{aligned} \tag{41}$$

式中，$L_\varepsilon=\log(1/\varepsilon)$，$\varepsilon$ 为求解精度。按主要优化变量统计，三个子问题的规模分别为 $O(KNV^2+KN)$、$O\left(KN+N\right)$ 和 $O(N(M+1)^2+KN)$，实际求解开销还受到约束数量及锥结构的影响。用户数量 K 和时隙数量 N 主要影响调度、轨迹及相关约束规模，发射天线数量 V 主要影响发射协方差子问题，而 RIS 反射单元数量 M 主要影响 RIS 相移子问题的半正定规划规模。此外，RIS 相移恢复中的 40 组高斯随机化候选及轨迹更新中的最多 5 次信任域回溯会增加相应计算开销。

3 数值仿真与结果分析

为了验证所提鲁棒联合优化算法的有效性，对 RIS 辅助 UAV-ISAC 安全通信系统的保密性能和感知约束适应能力进行仿真分析。除特别说明外，仿真采用同一基准场景：$P=32$ dBm，$M=24$，$\beta_C=0.5$，$\xi=0.0035$，$K=2$。AO 最大迭代次数设为 50，相对停止阈值设为 10^{-3}，至少执行 10 轮，并以连续 5 轮目标函数相对变化均满足停止阈值作为数值停止判据。UAV 轨迹初始及最小信任域半径分别设为 16m 和 1.5m，缩减系数为 0.90，单次更新最多回溯 5 次，可行性容差设为 10^{-6}。对于 SDR 恢复，发射协方差采用主特征向量恢复，RIS 采用 40 组高斯随机化候选，并通过原始约束及目标函数回代筛选。各对比方案采用相同的初始轨迹、信道参数和感知归一化参考量。图 3（a）采用代表性几何部署展示通信权重对轨迹的影响。非鲁棒 AO 在设计阶段令 $\xi=0$，但评价时仍采用给定不确定性半径下的保守保密速率；固定轨迹、随机 RIS 相位及无 RIS 方案分别固定对应变量，其余变量保持优化。所有方案均采用相同的基准参数和停止准则。

图 2 给出了不同方案下平均保守保密速率随 AO 迭代次数的变化。所提方案在迭代初期提升较快，随后逐渐趋于稳定。固定轨迹和随机 RIS 相位方案由于部分变量受限，最终保密性能低于所提方案。非鲁棒 AO 由于设计目标与鲁棒评价指标不一致，迭代曲线出现一定波动。

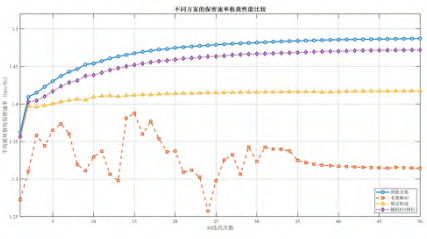

图 2 算法收敛性能图
Figure 2 Shows the convergence performance of the algorithm

图 3 展示了不同通信权重下的 UAV 轨迹及通信—感知性能权衡。由图 3(a)可见，随着通信权重

增大，UAV 轨迹更倾向于靠近合法用户区域；通信权重较小时，轨迹则相对兼顾感知目标区域。图 3(b)以平均归一化等效感知指标和归一化平均保守保密速率为横、纵坐标，各点对应不同通信权重，展示两类性能之间的权衡关系。随着通信权重增大，通信性能总体提高，感知指标相应下降，体现了两类任务之间的资源分配权衡。其中，通信指标仅在绘图时以同一场景下 $\beta_C = 0.5$ 时的平均保守保密速率为固定参考值进行归一化，感知指标采用第 2.3 节的定义。

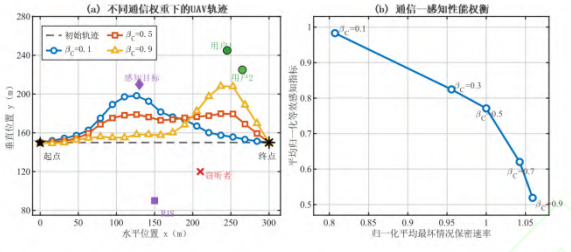

图 3 不同通信权重下的 UAV 轨迹与通信-感知性能权衡

Figure 3 Shows the trade-off between UAV trajectory and communication-sensing performance under different communication weights

图 4 给出了不同发射功率和 RIS 单元数下的平均最坏情况保密速率。两幅子图采用各自图例所列基线，评价口径与本节前述定义一致。图 4(a)中，随着 UAV 发射功率增加，各方案的保密速率逐渐提高，所提鲁棒联合优化方案始终取得较高性能，说明联合优化能够更充分地利用功率资源。图 4(b)中，随着 RIS 单元数增加，所提方案的保密速率持续提升，但增益逐渐减缓，因为更多 RIS 单元能够提供更高的相位调控自由度，从而增强反射链路增益；但当 RIS 规模继续增大时，系统性能逐渐受限于功率约束、轨迹约束以及感知约束，新增反射单元带来的收益趋于平缓。

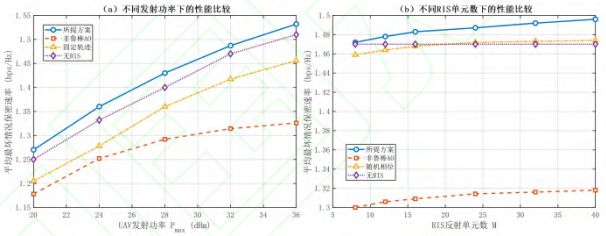

图 4 不同方案下的平均最坏情况保密速率变化情况

Figure 4 Shows the variation of the average worst-case confidentiality rate under different schemes

图 5 给出了固定场景下不同方案的性能对比。在该仿真场景下,所提方案获得最高保密速率，非鲁棒 AO 方案最低，说明忽略窃听 CSI 不确定性会导致最坏情况性能明显下降。随机 RIS 相位方案与无 RIS 方案的性能较为接近，由于在当前部署和 RIS 规模下，未经协调的反射相位难以形成显著的相干增益。相比之下，优化 RIS 相位并与其他资源协同设计能够获得更高的保密速率。

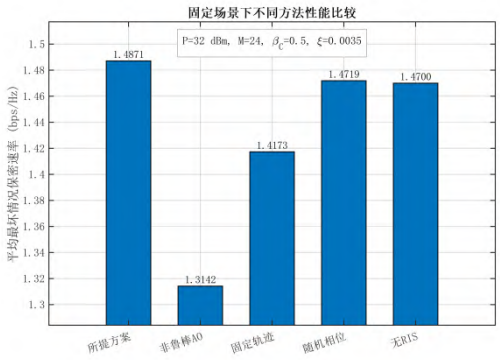

图 5 固定场景下不同方法比较
Figure 5 Comparison of different methods in a fixed scene

图 6 展示了不同感知 QoS 门限下的平均最坏情况保密速率。随着等效感知 SNR 指标门限提高，各率线均呈下降趋势。这是因为更严格的感知 QoS 约束会占用更多系统自由度，使发射功率、无人机位置以及 RIS 反射方向需要更多地服务于目标感知任务，从而压缩用于提升安全通信性能的优化空间。同时，在相同感知门限下，较大发射功率和较多 RIS 单元数均能够获得更高的保密速率，说明功率资源和 RIS 空间自由度可以在一定程度上补偿感知约束增强带来的性能损失。

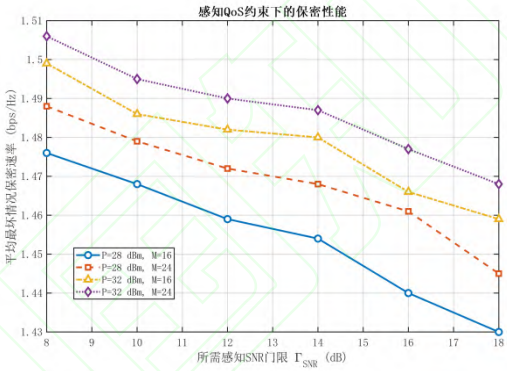

图 6 感知 QoS 约束下的保密性能
Figure 6 Confidentiality performance under perceptual QoS constraints

图 7 展示了 CSI 不确定性半径对平均保守保密速率的影响。随着 ξ 增大，各方案的保密速率总体下降，这是因为更大的 CSI 误差范围提高了窃听功率的保守上界，从而降低了保密速率下界。不同方案呈现相近的下降趋势，所提鲁棒方案在所考察的不确定性半径范围内保持较高的保密速率。其次，图 7 展示了保守平均保密速率随 CSI 不确定性半径的变化，其与原始误差模型下实际保密速率之间的下界关系由前述鲁棒窃听功率上界保证。

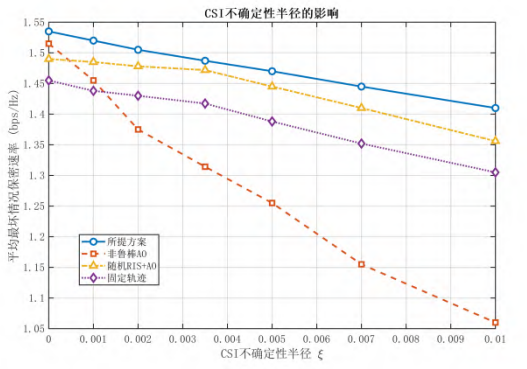

图 7 归一化 CSI 不确定性半径对安全速率的影响
Figure 7 The influence of the normalized CSI uncertainty radius on the safety rate

图 8 展示了合法用户数量对平均最坏情况保密速率的影响。随着用户数量增加，有限时隙及系统资源需要在更多用户之间分配，导致平均保密速率下降。所提方案能够在一定程度上缓解多用户负载增加带来的性能损失。

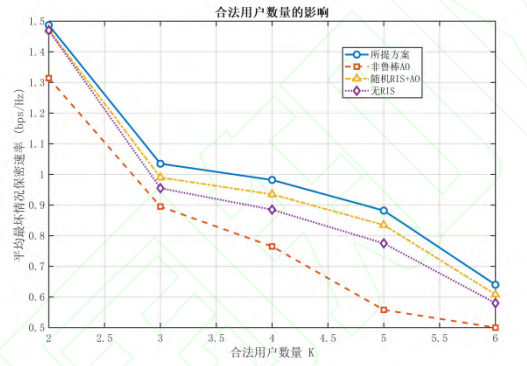

图 8 合法用户数量对系统性能的影响
Figure 8 The impact of the number of legitimate users on system performance

4 结论

1）所构造的保守保密速率下界适用于原始两段 CSI 有界误差模型，对于通过原问题约束检验的资源方案，能够保障实际保密速率不低于相应的保守下界。

2）在获得可行初值的条件下，所提算法能够保持已接受方案的可行性及原始目标函数值的单调非减性，且目标值序列有界收敛。

3）仿真结果表明，所提方案在所考察场景下具有较好的平均最坏情况保密性能。增加发射功率和 RIS 单元数量有利于提升保密性能，但收益逐渐减缓；提高感知门限、增大 CSI 不确定性半径及增加用户数量则会降低保密速率，体现了通信与感知之间的资源分配权衡。

后续可进一步研究随机 CSI 误差模型下的保密中断概率及低复杂度实时实现，以提升算法的实际应用能力。

参考文献（References）

[1] .Mu J, Zhang R, Cui Y, et al. UAV meets integrated sensing and communication: Challenges and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 62-67.

[2] .Meng K, Wu Q, Xu J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: Opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 31(2): 97-104.

[3] .Cui Z, Hu J, Cheng J, et al. Multi-domain NOMA for ISAC: Utilizing the DOF in the delay-doppler domain[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 27(2): 726-730.

[4] ．虞湘宾，于凯，钱盼盼．面向 6G 移动通信的可重构智能反射表面技术研究综述[J]．Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics/Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao，2023，55（5）：745.

[5] .Wu Q, Zhang R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. IEEE transactions on communications, 2019, 68(3): 1838-1851.
[6] .Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE access, 2019, 7: 116753-116773.
[7] .Pan C, Ren H, Wang K, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(6): 14-20.
[8] .Fang S, Chen G, Xu P, et al. SINR maximization for RIS-assisted secure dual-function radar communication systems[C]//2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2021: 01-06.
[9] .Zhang H, Zheng J. IRS-assisted secure radar communication systems with malicious target[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 73(1): 591-604.
[10] .Kong L, Pang X, Tang J, et al. Signal enhancement and suppression schemes for bi-static ISAC with IRS-mounted target[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 73(5): 3718-3732.
[11] .Sánchez J D V, Urquiza-Aguiar L, Paredes M C P. Physical layer security for 5G wireless networks: A comprehensive survey[C]//2019 3rd cyber security in networking conference (CSNet). IEEE, 2019: 122-129.
[12] .Yu X, Xu D, Sun Y, et al. Robust and secure wireless communications via intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2637-2652.
[13] .Meng K, Masouros C, Petropulu A P, et al. Cooperative ISAC networks: Opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 32(3): 212-219.
[14] .Zhu X, Liu J, Lu L, et al. Enabling intelligent connectivity: A survey of secure ISAC in 6G networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 27(2): 748-781.
[15] .Meng K, Masouros C, Petropulu A P, et al. Cooperative ISAC networks: Performance analysis, scaling laws, and optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 24(2): 877-892.
[16] .Wu Z, Zhou C, Xue X, et al. Robust Secure Beamforming Design for Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communication Systems with Imperfect CSI[C]// 2025 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2025: 4589-4594.
[17] .Chen X, Zheng T X, Wang X, et al. Intelligent reflecting surface aided robust secure integrated sensing and communication systems[C]//2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2023: 1-6.
[18] .Wu Z, Li X, Cai Y, et al. Joint trajectory and resource allocation design for RIS-assisted UAV-enabled ISAC systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(5): 1384-1388.
[19] .Zhao H, Luan M, Liyanage M, et al. Joint optimization of sensing, communication, computing for collaborative multi-UAV edge computing system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025.
[20] .Liu X, Liu Y, Liu Z, et al. Fair integrated sensing and communication for multi-UAV-enabled Internet of Things: Joint 3-D trajectory and resource optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(18): 29546-29556.
[21] .Yu X, Xu J, Zhao N, et al. Security enhancement of ISAC via IRS-UAV[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 15601-15612.
[22] .Hua M, Wu Q, Chen W, et al. Secure intelligent reflecting surface-aided integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 23(1): 575-591.