



专题：6G 智能超表面

空中可重构智能表面辅助的全双工无人机安全通信

罗俊松¹, 黄平¹, 罗欣悦¹, 赖欢¹, 多滨¹, 袁晓军²

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059;

2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要: 针对传统的可重构智能表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS, 也称智能超表面) 在无人机辅助安全通信中存在的灵活性不足和系统安全保障能力不强的问题, 以及当前无人机半双工通信系统普遍面临的频谱利用率低和通信效率低的挑战, 提出了一种空中可重构智能表面 (aerial reconfigurable intelligent surface, ARIS) 与全双工无人机的双机协同解决方案, 旨在提升面对地面窃听者时的通信安全性和效率。联合优化用户通信调度、传输功率、无人机发送的干扰功率及其飞行轨迹, 以及 ARIS 的相移和轨迹, 设计了一个旨在最大化最小平均可达安全速率的优化问题, 并提出基于交替优化 (alternating optimization, AO)、半定松弛 (semi-definite relaxation, SDR) 技术和连续凸近似 (successive convex approximation, SCA) 的迭代算法, 以获得高质量的次优解。仿真结果验证了 ARIS 与全双工无人机结合的双机协作方案在提升通信质量和安全性方面的有效性, 展示了其在复杂安全通信环境下的优越性。

关键词: 无人机安全通信; 空中可重构智能表面; 轨迹优化; 全双工

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024181

Aerial reconfigurable intelligent surfaces-assisted full-duplex UAV secure communication

LUO Junsong¹, HUANG Ping¹, LUO Xinyue¹, LAI Huan¹, DUO Bin¹, YUAN Xiaojun²

1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: In response to the limitations of traditional reconfigurable intelligent surfaces (RIS) in UAV-assisted secure communications, such as insufficient flexibility and inadequate system security, as well as the challenges of low spectral efficiency and poor communication efficiency faced by current half-duplex UAV communication systems, a dual-

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-07-08

通信作者: 多滨, duobin@cdut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62071090); 四川省国际科技创新合作/港澳台科技创新合作项目 (No. 2023YFH0092)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62071090), Sichuan Province International Science and Technology Innovation Cooperation / Hong Kong, Macao, and Taiwan Science and Technology Innovation Cooperation Project (No. 2023YFH0092)

machine cooperative solution involving aerial reconfigurable intelligent surfaces (ARIS) and full-duplex UAV was proposed, aiming at enhancing communication security and efficiency against ground eavesdroppers. An optimization problem was designed to maximize the minimum average achievable security rate by jointly optimizing user communication scheduling, transmission power, the interference power sent by UAV, their flight trajectories, and the phase shifts and trajectories of ARIS. An iterative algorithm based on alternating optimization (AO), semi-definite relaxation (SDR) techniques, and successive convex approximation (SCA) was proposed to obtain high-quality suboptimal solutions. Simulation results demonstrate the effectiveness of the ARIS and full-duplex UAV combination in enhancing communication quality and security performance, showcasing its superiority in complex security communication environments.

Key words: UAV secure communication, aerial reconfigurable intelligent surface, trajectory optimization, full-duplex

0 引言

随着城市化进程的加速和物联网应用数量的爆炸式增长,城市环境中的无线网络面临着前所未有的数据传输需求和复杂多变的传播环境的挑战。可重构智能表面(reconfigurable intelligent surface, RIS, 也称智能超表面)技术通过对信号路径的高度可控制,能够优化复杂环境中的信号传播,有效管理多路径干扰和信号衰减问题。此外,随着 5G 及其后继技术的推进,端到端时延的进一步降低和更高的数据传输率成为可能,RIS 技术的应用将能够进一步支持实时数据处理和超高清视频流的无缝传输,这对于远程医疗、虚拟现实、增强现实和自动驾驶等时延敏感类应用至关重要,因为它们需要几乎实时的通信能力来确保用户体验和系统性能。RIS 技术不仅提高了通信网络的传输质量和安全性,还为现代城市提供了支持数字化转型的关键技术支撑。随着技术的成熟和应用的深入,RIS 技术将在 6G 时代扮演更加重要的角色,为全球无线通信网络的发展和优化提供强有力的技术保障。

随着无人机在无线通信领域的广泛应用,其高机动性、低成本和视距传输能力为进一步提高通信覆盖范围、吞吐量和平均保密率提供了可能。无人机辅助的无线通信,逐步演变为空地一体化网络,从而实现了无处不在的无线连接和网

络容量的升级。在此背景下,RIS 技术与无人机的结合引起了研究人员的关注,尤其是在城市复杂环境的应用场景中,如货物配送和交通监控等,无人机的通信链路经常受到高楼大厦的遮挡,通道质量下降。RIS 的低功耗和轻量化特性则允许其安装在适当位置以重新配置空地链路的传播环境,从而提高通信性能,这进一步体现了 RIS 技术在解决城市地区无人机通信障碍中的潜力^[4-7]。值得注意的是,在无人机辅助的安全通信场景中,当存在潜在的窃听者时,RIS 技术展现出了显著的优势。该技术利用可控的反射单元,通过调整每个单元的相位和角度,实现对无线信号传播路径的精确控制。这种精细的控制允许通过相位补偿和波束成形技术显著提升地面合法用户的通信效率,同时,利用相位扰动和波束偏移等策略有效降低窃听者的通信质量,从而增强通信的安全性。

文献[5]针对存在窃听者的场景,探讨了一个静止的 RIS 辅助的无人机安全通信系统。该系统在考虑窃听者的信道状态信息可能不完全已知的复杂环境下,通过对 RIS 的被动波束成形、合法发射端的发射功率和无人机的飞行轨迹进行联合鲁棒设计,旨在最大化最坏情况下的平均安全速率,不仅提高了通信的安全性,也强调了在动态环境中处理不确定性的重要性。现有的无人机辅助安全通信研究主要采用半双工通信技术,但该



技术常受到通信效率低和带宽利用率不高的限制，而全双工通信技术提供了一种理想的解决方案，理论上可以将频谱效率翻倍。尽管全双工技术面临自干扰问题，但根据文献[8]的研究，应用创新的天线设计、电子技术和通信策略，能够显著降低自干扰的影响。文献[9]将 RIS 技术与全双工无人机结合使用，在存在地面窃听者试图干扰和窃听传输敏感信息的场景中，智能控制固定在建筑物外部的 RIS 反射信号，以及优化全双工无人机的干扰功率，显著提高了信息传输的质量和通信的安全性。尽管固定 RIS 获得了通信质量的提升，但其部署的灵活性不足，容易在特定区域形成通信盲区，这限制了全双工无人机机密信息传输的有效性。空中可重构智能表面（aerial reconfigurable intelligent surface, ARIS）作为一种新兴的技术概念，其独特的可重构性和动态优化能力，使其能够随着无人机的移动实时调整信号路径和强度，从而克服静态 RIS 的局限性。因此，本文深入探讨 ARIS 与全双工无人机协作的潜力，旨在通过两者之间的紧密配合为无人机安全通信提供新的解决方案。

本文考虑了一个 ARIS 辅助的全双工无人机安全通信的典型应用场景。在该场景中，地面存在一名窃听者，ARIS 通过协助全双工无人机的信息转发来提高通信质量，并增强全双工无人机发送的干扰信号以保障地空信息传输的安全性。通过联合优化用户的通信调度、传输功率，全双工无人机的干扰功率、航迹以及 ARIS 相移、航迹，以最大化最小平均可达安全速率。尽管所构建的优化问题为复杂的非凸规划问题，但本文利用交替优化（alternating optimization, AO）算法、半定松弛（semi-definite relaxation, SDR）技术和连续凸近似（successive convex approximation, SCA）技术迭代优化每个子问题，获得高质量的次优解。仿真结果表明，采用灵活性更高的 ARIS 与全双工无人机结合的双机协作安全通

信方案，ARIS 能够更加灵活地覆盖全双工无人机的通信范围，以更好地保障地空通信的安全，并且能够显著提高信息的传输质量以及获得更高的安全速率增益。

1 系统模型与问题构建

1.1 系统模型

智能表面辅助的全双工无人机安全通信系统如图1所示。本文考虑了一个 ARIS 辅助的全双工无人机安全通信的典型应用场景，该场景包括多个地面用户（ground user, GU），它们将机密信息传送至飞行中的全双工无人机，无人机从指定起点沿固定高度飞往终点。在这一过程中，存在 1 名地面窃听者企图侦听并截获这些通信数据。地面用户的集合表示为 M ，其中， $|M|=M$ 。第 i 个地面用户的水平坐标表示为 $\mathbf{G}_i=[x_i, y_i]^T \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ ， $i \in M$ 。地面的窃听者 Eve 位于水平坐标 $\mathbf{s}_E=[x_E, y_E]^T$ 。全双工无人机在信息传输过程中发送干扰信号以干扰 Eve，并接收用户的敏感信息。同时，Eve 和每个地面用户分别配备接收和发送天线。因此，在这个系统中，所有通信链路都由直接链路和反射链路组成。假设全双工无人机为地面用户提供服务的总持续时间为 T ，并被分为 Ω 个相等的时隙。因此，有 $T=\delta_t \cdot \Omega$ ，其中， δ_t 表示每个时隙的持续时间。同时，在本系统中，假设无人机的高速飞行引起的多普勒效应通过先进的信号处理技术在地面用户的接收器上已得到有效的补偿和校正。这确保了无人机与用户之间的通信在接收端保持稳定，不受多普勒效应的负面影响^[10]。

为了保护数据传输，将 RIS 安装到另一个无人机构成 ARIS，用于有效地反射来自每个用户和全双工无人机的入射信号。本系统考虑空中只有 AIRS 和全双工无人机，不存在其他空中障碍物和高空建筑，因此，本文假设 ARIS 和全双工

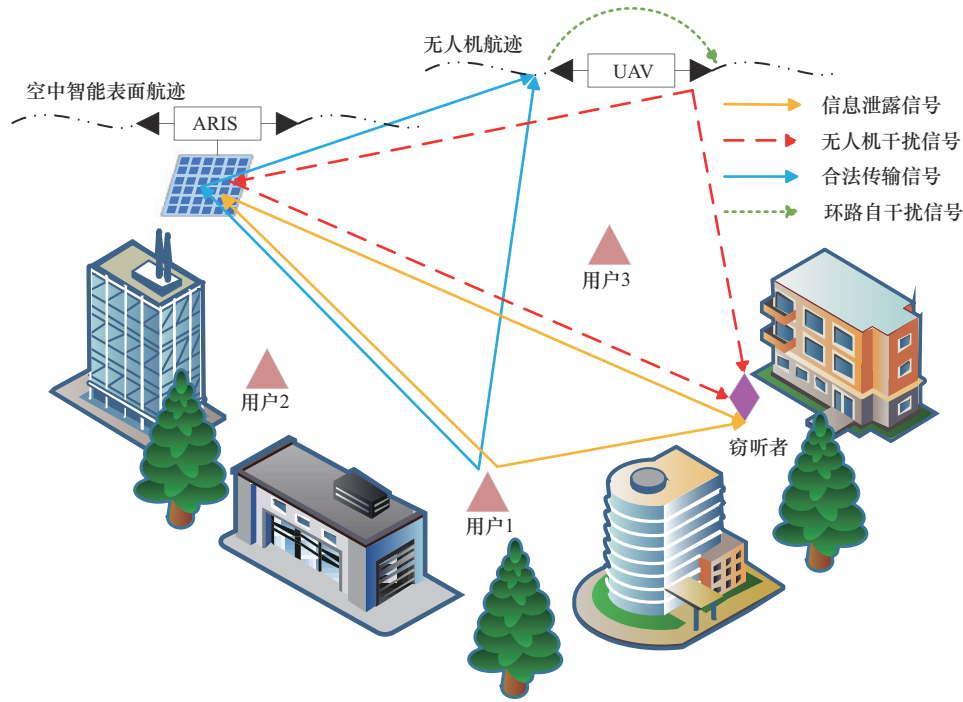


图1 智能表面辅助的全双工无人机安全通信系统

无人机在飞行过程中是不存在障碍物遮挡的，使用视距传输链路^[11]。其中，ARIS由 $N=N_x \times N_z$ 个反射元素组成，采用尺寸为 $N_x \times N_z$ 的均匀矩形阵列。在飞行持续时间内，ARIS以指定的常数高度 z_R 从起点飞往终点。水平轨迹可以由离散的一系列点表示，即 $\mathbf{t}_R = \{\mathbf{t}_R[\omega] \triangleq [x_R[\omega], y_R[\omega]]^T\}$ ，其中 $\omega \in \{0, \dots, \Omega\}$ 。无人机轨迹必须受到以下限制的约束。

$$\mathbf{t}_R[0] = \mathbf{t}_{0,R}, \mathbf{t}_R[\Omega] = \mathbf{t}_{F,R} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{t}_{0,R} = [x_{0,R}, y_{0,R}]^T$ 是ARIS起飞的水平坐标， $\mathbf{t}_{F,R} = [x_{F,R}, y_{F,R}]^T$ 是ARIS最终的水平坐标。假设无人机最大速度为 $V_{\max,R}$ （单位：m/s），在每个时隙内，无人机能够飞行的最远水平距离是 $\Psi_R = V_{\max,R} \delta_t$ ，满足以下条件。

$$\|\mathbf{t}_R[\omega+1] - \mathbf{t}_R[\omega]\|^2 \leq \Psi_R^2, \omega = 0, \dots, \Omega-1 \quad (2)$$

在物理层安全中，合理的路径规划，可以设计无人机轨迹，实现在特定区域内的最佳通信和干扰策略。在飞行持续时间内，全双工无人机以指定的常数高度 z_U 从起点飞往终点。

水平轨迹可以粗略地由一系列点表示，即 $\mathbf{t}_U = \{\mathbf{t}_U[\omega] \triangleq [x_U[\omega], y_U[\omega]]^T\}$ ，其中 $\omega \in \{0, \dots, \Omega\}$ 。无人机轨迹必须受到以下限制的约束。

$$\mathbf{t}_U[0] = \mathbf{t}_{0,U}, \mathbf{t}_U[\Omega] = \mathbf{t}_{F,U} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{t}_{0,U} = [x_{0,U}, y_{0,U}]^T$ 是全双工无人机起飞的水平坐标， $\mathbf{t}_{F,U} = [x_{F,U}, y_{F,U}]^T$ 是全双工无人机最终的水平坐标。假设无人机最大速度为 $V_{\max,U}$ （单位：m/s），在每个时隙内，无人机能够飞行的最远水平距离是 $\Psi_U = V_{\max,U} \delta_t$ ，满足以下条件。

$$\|\mathbf{t}_U[\omega+1] - \mathbf{t}_U[\omega]\|^2 \leq \Psi_U^2, \omega = 0, \dots, \Omega-1 \quad (4)$$

根据文献[12]，由于在城市环境中通信很容易被障碍物阻挡，本文假设所有直连信道都遵循瑞利衰落信道模型。因此，对于从每个地面用户到全双工无人机的链路（G-U链路）、从全双工无人机到Eve的链路（U-E链路），以及从每个地面用户到Eve的链路（G-E链路），信道增益可以分别表示为： $y_{G,U}[\omega] \in \mathbb{C}$ 、 $y_{U,E}[\omega] \in \mathbb{C}$ 和 $y_{G,E} \in \mathbb{C}$ ，其中， $y_{G,U}[\omega] = \sqrt{\rho \cdot d_{G,U}[\omega]^{-\kappa_D}} \tilde{h}_1$ 、 $y_{U,E}[\omega] =$



$\sqrt{\rho \cdot d_{U,E}[\omega]^{-\kappa_D}} \tilde{h}_2$ 、 $y_{G_i,E} = \sqrt{\rho \cdot d_{G_i,E}^{-\kappa_D}} \tilde{h}_3$ ， ρ 是参考距离 D_0 的路径损耗，取 $D_0 = 1 \text{ m}$ ； κ_D 是相应的路径损耗指数； $\tilde{h}_1$ 、 $\tilde{h}_2$ 和 $\tilde{h}_3 \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 代表随机离散分量。 $d_{G_i,U}[\omega] = \sqrt{z_U^2 + \|G_i - t_U[\omega]\|^2}$ ， $i \in M$ ， $d_{UE}[\omega] = \sqrt{z_U^2 + \|t_U[\omega] - s_E\|^2}$ 和 $d_{G_i,E} = \sqrt{\|G_i - s_E\|^2}$ ， $i \in M$ ，它们分别表示第 i 个用户的G-U链路、U-E链路和第 i 个用户的G-E链路的距离。

本文假设用于U-R和R-U的链路采用视距（line of sight, LOS）信道模型。因此，可以使用 $y_{R,U}[\omega] = \sqrt{\rho \cdot d_{R,U}^{-\kappa_L}} y_{R,U}^{\text{LOS}}[\omega]$ 来表示R-U链路的信道模型。其中， κ_L 表示相应的路径损耗指数， $d_{R,U}[\omega] = \sqrt{\|t_R[\omega] - t_U[\omega]\|^2 + (z_R - z_U)^2}$ 表示 ω 时隙期间R-U链路的距离，而 $y_{R,U}^{\text{LOS}}[\omega] = \mathbf{w}_y^{R,U}[\omega] \otimes \mathbf{w}_x^{R,U}[\omega]$ ，其中，

$$\mathbf{w}_x^{R,U}[\omega] = \begin{bmatrix} 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega]}, \dots, \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M_x - 1) d \cos \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega]} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{w}_y^{R,U}[\omega] = \begin{bmatrix} 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega]}, \dots, \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M_z - 1) d \sin \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega]} \end{bmatrix}^T$$

$$\cos \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega] = \frac{x_R[\omega] - x_U[\omega]}{d_{R,U}[\omega]}$$

$$\sin \phi_{R,U}[\omega] \sin \varphi_{R,U}[\omega] = \frac{z_R - z_U}{d_{R,U}[\omega]}$$

$\phi_{R,U}[\omega]$ 和 $\varphi_{R,U}[\omega]$ 分别表示第 ω 个时隙内LOS分量的方位角和仰角， λ 为载波波长； d 为天线间隔的距离。可以采用类似的过程构建从全双工无人机到ARIS（U-R）链路的信道模型，并且表示为 $y_{U,R}[\omega] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 。

根据文献[13]，本文假设每个地面用户与ARIS之间的链路（G-R链路）、ARIS与Eve之间的

链路（R-E链路）是Rician衰落信道模型。因此，G-R链路的信道模型可以表示为 $y_{G_i,R}[\omega]$ ，表达式如下。

$$y_{G_i,R}[\omega] = \sqrt{\rho \cdot d_{G_i,R}^{-\kappa_R}} \left(\sqrt{\frac{1}{\varrho_{G_i,R} + 1}} y_{G_i,R}^{\text{NLOS}}[\omega] + \sqrt{\frac{\varrho_{G_i,R}}{\varrho_{G_i,R} + 1}} y_{G_i,R}^{\text{LOS}}[\omega] \right) \quad (5)$$

其中， κ_R 为相应的路径损耗指数， $d_{G_i,R}[\omega]$ 为 ω 时隙期间G-R链路的距离， $\varrho_{G_i,R}$ 为G-R链路的Rician因子， $y_{G_i,R}^{\text{LOS}}[\omega]$ 为确定性的LOS分量， $y_{G_i,R}^{\text{NLOS}}[\omega]$ 为非视距（non-line-of-sight, NLOS）分量，它们遵循零均值和单位方差的圆对称复高斯（circularly symmetric complex Gaussian, CSCG）分布。具体而言， $y_{G_i,R}^{\text{LOS}}[\omega]$ 依赖于无人机的轨迹，而 $y_{G_i,R}^{\text{LOS}}[\omega] = \mathbf{w}_y^{G_i,R}[\omega] \otimes \mathbf{w}_x^{G_i,R}[\omega]$ 。其中，

$$\mathbf{w}_x^{G_i,R}[\omega] = \begin{bmatrix} 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega]}, \dots, \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M_x - 1) d \cos \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega]} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{w}_y^{G_i,R}[\omega] = \begin{bmatrix} 1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega]}, \dots, \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M_z - 1) d \sin \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega]} \end{bmatrix}^T$$

其中， $\cos \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega] = \frac{x_R - x_i}{d_{G_i,R}[\omega]}$ ，

$$\sin \phi_{G_i,R}[\omega] \sin \varphi_{G_i,R}[\omega] = \frac{z_R}{d_{G_i,R}[\omega]}。$$

类似的分析过程可以应用于R-E链路。相应的信道功率增益可以表示为：

$$y_{R,E}[\omega] = \sqrt{\rho \cdot d_{R,E}^{-\kappa_E}} \left(\sqrt{\frac{1}{\varrho_{R,E} + 1}} y_{R,E}^{\text{NLOS}}[\omega] + \sqrt{\frac{\varrho_{R,E}}{\varrho_{R,E} + 1}} y_{R,E}^{\text{LOS}}[\omega] \right) \quad (6)$$

在第 ω 个时隙中, 从每个地面用户和 Eve 到全双工无人机经由 ARIS 的直连链路和反射链路的信道增益可以表示为:

$$g_U = y_{G_i, U}[\omega] + y_{R, U}^H[\omega] \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{G_i, R}[\omega] \quad (7)$$

$$g_{E_1} = y_{G_i, E} + y_{R, E}^H[\omega] \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{G_i, R}[\omega] \quad (8)$$

$$g_{E_2}[\omega] = y_{U, E}[\omega] + y_{R, E}^H[\omega] \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{U, R}[\omega] \quad (9)$$

其中, $\boldsymbol{\Theta}[\omega] = \text{diag}\{e^{j\theta_1[\omega]}, \dots, e^{j\theta_N[\omega]}\}$ 是 ARIS 的对角相位矩阵, $\theta_n[\omega] \in [0, 2\pi), n \in \mathcal{N} \setminus \{1, \dots, N\}$ 是第 n 个反射元素的相位偏移, $\text{diag}(x)$ 是对角矩阵。

在全双工无线通信系统中, 设备同时进行信号的发送和接收。理想情况下, 系统应完全隔离或消除发送信号对接收信号的干扰。然而, 由于硬件非理想性和信号处理的限制, 总会有一部分发送信号被泄露到接收链路, 这部分未被完全消除的信号称为剩余自干扰 (residual self interference, RSI), 本文定义 h_{JJ} 为由 RSI 引起的信道增益, 它代表了从无人机的发送天线到接收天线的不完全环路干扰消除。平均环路干扰被定义为 $\mathbb{E}[h_{JJ}^2] = \sigma_{\text{RSI}}^2$, σ_{RSI}^2 是 RSI 的方差并将它作为平均环路干扰水平 (loop interference level, LIL)。

设 $P_G[\omega]$ 为地面用户的传输功率, $P_U[\omega]$ 为全双工无人机在第 ω 个时隙内的干扰功率。平均和峰值功率限制表达式如下。

$$\bar{P}_j = \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q P_j[\omega], 0 \leq P_j[\omega] \leq P_j^{\max}, j \in \{G, U\} \quad (10)$$

其中, $\bar{P}_j \leq P_j^{\max}$ 。在时隙 ω 内, 全双工无人机和窃听者的可实现速率的约束单位以 bit/(sHz) 表示如下。

$$R_U[\omega] = E_1 \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |g_U[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |h_{JJ}|^2} \right) \right] \quad (a)$$

$$\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |g_U[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] \sigma_{\text{RSI}}^2} \right) \triangleq R_U[\omega] \quad (11)$$

$$R_E[\omega] = E_2 \left[\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |g_{E_1}[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |g_{E_2}[\omega]|^2} \hat{\delta} \right) \right] \quad (b)$$

$$\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |g_{E_1}[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |g_{E_2}[\omega]|^2} \right) \triangleq \hat{R}_E[\omega] \quad (12)$$

其中, $\hat{\delta}$ 遵循单位均值的指数分布, σ^2 为相应接收机处的附加白高斯噪声的功率, $E_1\{\}$ 和 $E_2\{\}$ 为相对于 $|h_{JJ}|^2$ 和 $\hat{\delta}$ 的期望计算式。关于这些变量,

$$\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |g_U[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |h_{JJ}|^2} \right) \text{ 和 } \text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] |y_{E_1}[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |y_{E_2}[\omega]|^2} \hat{\delta} \right) \text{ 约束是凸的 (凹的)。}$$

利用 Jensen 不等式, 本研究可以证明式 (11) 中的 (a) 和式 (12) 中的 (b) 成立。

根据时分多址 (time division multiple access, TDMA) 协议, 在每个时隙中, 只有一个被调度的用户与无人机通信。引入二进制变量 $\alpha_i[\omega]$ 来表示用户 i 是否在第 ω 个时隙内由无人机服务。这些约束可以表示如下。

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i[\omega] \leq 1, \forall \omega \quad (13)$$

$$\alpha_i[\omega] \in \{0, 1\}, \forall i, \omega \quad (14)$$

因此, 在每个时隙内, 可实现的平均保密速率表示为:

$$R_{\text{sec}}[\omega] = \left[\frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] (\hat{R}_U[\omega] - \hat{R}_E[\omega]) \right]^+ \quad (15)$$

1.2 问题构建

本节联合优化用户调度 $\mathbf{A} = \{\alpha_i[\omega], \forall i\}_{\omega=1}^Q$ 、用户传输功率 $\mathbf{P}_{G_i} \triangleq \{P_{G_i}[\omega]\}_{\omega=1}^Q, i \in M$ 、全双工无人机干扰功率 $\mathbf{P}_U \triangleq \{P_U[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、ARIS 相移 $\boldsymbol{\Theta} \triangleq \{\boldsymbol{\Theta}[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、水平 ARIS 轨迹 $\mathcal{T}_R \triangleq \{\mathbf{t}_R[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 和水平全双工无人机轨迹 $\mathcal{T}_U \triangleq \{\mathbf{t}_U[\omega]\}_{\omega=1}^Q$, 以覆盖飞行时间 T , 本文的目标是最大化每个用户在最坏情况下可实现的平均保密速率。因此, 问题可以描述为:



$$\max_{\mathbf{A}, \mathbf{P}_{G_i}, \mathbf{P}_U, \boldsymbol{\Theta}, \mathcal{T}_R, \mathcal{T}_U, \zeta} \zeta \quad (16)$$

$$\text{s.t. } R_{\text{sec}}[\omega] \geq \zeta \quad (17)$$

式(1)~式(4), 式(10), 式(13), 式(14)

尽管式(1)~式(4)和式(10)是凸的, 但在最优条件下解决问题(16)仍然具有挑战性。原因如下: 首先, 就 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\mathbf{P}_U$ 、 $\boldsymbol{\Theta}$ 、 $\mathcal{T}_R$ 和 $\mathcal{T}_U$ 而言, 式(17)不是联合凸的。其次, 由于二进制变量约束条件式(13)和式(14), 解决混合整数优化问题变得困难。因此, 为了在这样的优化问题中获得次优解, 本文在第2节提出了一种高效算法。

2 联合优化算法设计

本节专注于解决上述提到的联合优化问题。然而, 由于目标函数中涉及耦合的优化变量 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\mathbf{P}_U$ 、 $\boldsymbol{\Theta}$ 、 $\mathcal{T}_R$ 和 $\mathcal{T}_U$ 解决问题(16), 是非常具有挑战性的。本文提出了一种高效的算法来应对这个问题。更准确地说, 本文将问题(16)分解为6个子问题。

2.1 子问题1: 用户节点通信调度优化设计

用户调度 $\mathbf{A}$ 子问题可以通过给定的地面用户传输功率 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、全双工无人机干扰功率 $\mathbf{P}_U$ 、可重构智能表面相位变换矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 、ARIS轨迹 $\mathcal{T}_R$ 以及全双工无人机轨迹 $\mathcal{T}_U$ 来进行优化。本文将式(15)放宽为连续变量, 以使问题变得可处理。该问题可以由以下方式明确定义。

$$\max_{\mathbf{A}, \chi} \chi \quad (18)$$

$$\text{s.t. } R_{\text{sec}}[\omega] \geq \chi \quad (19)$$

$$0 \leq \alpha_i[\omega] \leq 1 \quad (20)$$

式(13)

因此, 问题(18)可以通过CVX得到有效解决, 因为它是一个标准的线性规划问题。本文可以找到问题(18)的最优解, 然后通过舍入方法获得整数解。

2.2 子问题2: 地面用户传输功率优化设计

用户传输功率 $\mathbf{P}_{G_i}$ 优化子问题可以通过给定的用户调度 $\mathbf{A}$ 、全双工无人机干扰功率 $\mathbf{P}_U$ 、可重构智能表面相位变换矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 、ARIS轨迹 $\mathcal{T}_R$ 以及全双工无人机轨迹 $\mathcal{T}_U$ 来进行优化, 表示为:

$$\max_{\mathbf{P}_{G_i}, \chi} \chi \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^{Q-1} \alpha_i[\omega] [\text{lb}(1 + \chi_i[\omega] P_{G_i}[\omega]) - \text{lb}(1 + \psi_i[\omega] P_{G_i}[\omega])] \geq \chi \quad (22)$$

式(11)

$$\text{其中, } \zeta_i[\omega] = \frac{|y_{G_i,U}[\omega] + y_{R,U}^H[\omega] \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{G_i,R}|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] \sigma_{\text{RSI}}^2},$$

$$\psi_i[\omega] = \frac{|y_{G_i,E} + y_{R,E}^H \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{G_i,R}|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] |y_{U,E}[\omega] + y_{R,E}^H \boldsymbol{\Theta}[\omega] y_{U,R}[\omega]|^2}.$$

根据文献[14]的相关工作, 可以获得最优解, 表达式如下。

$$P_{G_i}^{\text{opt}}[\omega] = \begin{cases} \min([\tilde{P}[\omega]]^+, P_G^{\text{max}}[i]), & \zeta_i[\omega] > \psi_i[\omega] \\ 0, & \zeta_i[\omega] \leq \psi_i[\omega] \end{cases} \quad (23)$$

其中,

$$\tilde{P}[\omega] = \sqrt{\left(\frac{1}{2\psi_i[\omega]} - \frac{1}{2\zeta_i[\omega]} \right)^2 + \frac{1}{\eta \ln 2} \left(\frac{1}{\psi_i[\omega]} - \frac{1}{\zeta_i[\omega]} \right)} - \frac{1}{2\psi_i[\omega]} - \frac{1}{2\zeta_i[\omega]}$$

这里只要达到了 $P_{G_i}^{\text{opt}}[\omega]$, 就可以使用一维二分搜索来获得满足 $\tilde{P}[\omega]$ 的 $\eta \geq 0$ 。

2.3 子问题3: 全双工无人机干扰功率优化设计

给定 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\boldsymbol{\Theta}$ 、 $\mathcal{T}_R$ 和 $\mathcal{T}_U$ 的情况下, 无人机干扰功率 $\mathbf{P}_U$ 的优化问题可以描述如下。

$$\max_{\mathbf{P}_U, \chi} \chi \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \alpha_i[\omega] [\text{lb}(P_U[\omega]\beta_0 + 1 + F_\omega) - \\ & \text{lb}(P_U[\omega]\beta_0 + 1) - \text{lb}(W_\omega P_U[\omega] + 1 + d_\omega) + \\ & \text{lb}(W_\omega P_U[\omega] + 1)] \geq \chi \end{aligned} \quad (25)$$

式(11)

$$\begin{aligned} \text{其中, } \beta_0 &= \frac{\sigma_{RSI}^2}{\sigma^2}, \quad W_\omega = \frac{|y_{U,E}[\omega] + y_{R,E}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{U,R}|^2}{\sigma^2}, \\ F_\omega &= \frac{P_{G_i}[\omega]|y_{G_i,U}[\omega] + y_{R,U}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{G_i,R}|^2}{\sigma^2} \text{ 和 } d_\omega = \\ & \frac{P_{G_i}[\omega]|y_{G_i,E} + y_{R,E}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{G_i,R}|^2}{\sigma^2}. \end{aligned}$$

由于问题的非凸性, 采用 SCA 技术, 按照文献[5]的方法, 将其近似转化为一个凸优化问题。 $\text{lb}(P_U[\omega]\beta_0 + 1)$ 和 $\text{lb}(W_\omega P_U[\omega] + 1 + d_\omega)$ 关于 $P_U[\omega]$ 是凹函数, 以特定点 $P_U^{kk0}[\omega]$ 为中心, 进行一阶泰勒展开得到局部上界, 并在问题 (24) 中进行相应替换, 可以转化为以下凸优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{P_U, \chi} \quad & \chi \\ \text{s.t. } & \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \alpha_i[\omega] [\text{lb}(P_U[\omega]\beta_0 + 1 + F_\omega) + \text{lb}(W_\omega P_U[\omega] + 1)] \\ & - \text{lb}(P_U^{kk0}[\omega]\beta_0 + 1) - \text{lb}(W_\omega P_U^{kk0}[\omega] + 1 + d_\omega) \\ & - \frac{\beta_0(P_U[\omega] - P_U^{kk0}[\omega])}{\ln 2(P_U^{kk0}[\omega]\beta_0 + 1)} - \frac{W_\omega(P_U[\omega] - P_U^{kk0}[\omega])}{\ln 2(P_U^{kk0}[\omega]W_\omega + 1 + d_\omega)} \geq \chi \end{aligned} \quad (26)$$

式(11)

因此, 问题 (26) 可以通过使用 CVX 得到有效解决。

2.4 子问题4: 智能反射面相移矩阵优化设计

本节给定 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\mathbf{P}_U$ 、 $\mathcal{T}_R$ 和 $\mathcal{T}_U$, 在松弛变量 $\boldsymbol{\tau} = \tau[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$ 的辅助下, 相移矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 优化问题如下所示: 让 $\mathbf{q}[\omega] = [q_1[\omega], q_2[\omega], \dots, q_N[\omega]]^T$, ($q_n[\omega] = e^{j\theta_n[\omega]}, n \in N, \forall \omega$), $\mathbf{w}[\omega] = [\mathbf{q}^T[\omega], 1]^T$, $C_{U,E}[\omega] = P_U[\omega]|y_{U,E}[\omega] + y_{R,E}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{U,R}[\omega]|^2$,

$$C_{G_i,U}[\omega] = \frac{P_{G_i}[\omega]|y_{G_i,U}[\omega] + y_{R,U}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{G_i,R}|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega]\sigma_{RSI}^2},$$

$$C_{G_i,E}[\omega] = P_{G_i}[\omega]|y_{G_i,E} + y_{R,E}^H[\omega]\Theta[\omega]y_{G_i,R}|^2.$$

因此, 下面的等式可以成立, 如下所示。

$$C_{G_i,U}[\omega] = \mathbf{w}_W^T[\omega] + \mathbf{w}^H[\omega]\boldsymbol{\Phi}_W[\omega]\mathbf{w}[\omega] \quad (28)$$

$$C_{G_i,E}[\omega] = \mathbf{w}_I^T[\omega] + \mathbf{w}^H[\omega]\boldsymbol{\Phi}_I[\omega]\mathbf{w}[\omega] \quad (29)$$

$$C_{U,E}[\omega] = \mathbf{w}_U^T[\omega] + \mathbf{w}^H[\omega]\boldsymbol{\Phi}_U[\omega]\mathbf{w}[\omega] \quad (30)$$

$$\text{其中, } \mathbf{w}_W[\omega] = \frac{P_{G_i}[\omega]|y_{G_i,U}[\omega]|^2}{\sigma^2 + P_U[\omega]\sigma_{RSI}^2}, \quad \mathbf{w}_I[\omega] =$$

$$P_{G_i}[\omega]y_{G_i,E}^H y_{G_i,E}, \quad \mathbf{w}_U[\omega] = P_U[\omega]y_{U,E}^H y_{U,E}[\omega],$$

$$\boldsymbol{\Phi}_W[\omega] = \frac{P_{G_i}[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega]\sigma_{RSI}^2} \begin{bmatrix} y_{W1}[\omega] & y_{W2}[\omega] \\ y_{W3}[\omega] & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Phi}_U[\omega] = P_U[\omega] \begin{bmatrix} y_{U1}[\omega] & y_{U2}[\omega] \\ y_{U3}[\omega] & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Phi}_I[\omega] = P_{G_i}[\omega] \begin{bmatrix} y_{I1}[\omega] & y_{I2}[\omega] \\ y_{I3}[\omega] & 0 \end{bmatrix}.$$

其中,

$$y_{W1}[\omega] = \text{diag}(y_{R,U}^H[\omega]^*) y_{G_i,R}^* y_{G_i,R}^T \text{diag}(y_{R,U}^H[\omega]),$$

$$y_{W2}[\omega] = \text{diag}(y_{R,U}^H[\omega]^*) y_{G_i,R}^* y_{G_i,U}^T[\omega]$$

$$y_{W3}[\omega] = y_{G_i,U}^*[\omega] y_{G_i,R}^T \text{diag}(y_{R,U}^H[\omega]),$$

$$y_{U1}[\omega] = \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega]^*) y_{U,R}^*[\omega] y_{U,R}^T[\omega] \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega])$$

$$y_{U2}[\omega] = \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega]^*) y_{U,R}^*[\omega] y_{U,E}^T[\omega],$$

$$y_{U3}[\omega] = y_{U,E}^*[\omega] y_{U,R}^T[\omega] \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega])$$

$$y_{I1}[\omega] = \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega]^*) y_{G_i,R}^* y_{G_i,R}^T \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega]),$$

$$y_{I2}[\omega] = \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega]^*) y_{G_i,R}^* y_{G_i,E}^T$$

$$y_{I3}[\omega] = y_{G_i,E}^* y_{G_i,R}^T \text{diag}(y_{R,E}^H[\omega])$$

这里, 上标 * 表示共轭运算符。相位变换矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$ 的优化进一步简化为:

$$\max_{\mathbf{w}, \boldsymbol{\tau}, \chi} \quad \chi \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \alpha_i[\omega] [\text{lb}(1 + \mathbf{w}^H[\omega]\boldsymbol{\Phi}_W[\omega]\mathbf{w}[\omega] + \\ & \mathbf{w}_W^T[\omega]) - \text{lb}(1 + \tau[\omega])] \geq \chi \end{aligned} \quad (32)$$



$$\frac{\mathbf{w}^H[\omega]\Phi_I[\omega]\mathbf{w}[\omega] + w_I[\omega]}{\mathbf{w}^H[\omega]\Phi_U[\omega]\mathbf{w}[\omega] + w_U[\omega] + \sigma^2} \leq \tau[\omega] \quad (33)$$

$$|q_n[\omega]| = 1 \quad (34)$$

由于 $-\ln(1 + \tau[\omega])$ 相对于 $\tau[\omega]$ 不是凹的，因此找到问题 (31) 的最优解是具有挑战性的。众所周知，凸函数的一阶泰勒展开是它的全局下界估计，而凹函数的一阶泰勒展开是全局上界估计。因此，为了解决问题 (31)，本文使用 SCA 技术，在指定点 $\tau_0 = \tau_0[\omega]_{\omega=1}^Q$ 处对 $\ln(1 + \tau[\omega])$ 进行一阶泰勒展开，因此问题 (31) 可以修改为：

$$\max_{\mathbf{w}, \tau, \chi} \chi \quad (35)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] [\ln(1 + \mathbf{w}^H[\omega]\Phi_W[\omega]\mathbf{w}[\omega] + w_W[\omega]) - \ln(1 + \tau_0[\omega]) - \frac{\tau[\omega] - \tau_0[\omega]}{\ln 2(1 + \tau_0[\omega])}] \geq \chi \quad (36)$$

$$\frac{\mathbf{w}^H[\omega]\Phi_I[\omega]\mathbf{w}[\omega] + w_I[\omega]}{\mathbf{w}^H[\omega]\Phi_U[\omega]\mathbf{w}[\omega] + w_U[\omega] + \sigma^2} \leq \tau[\omega] \quad (37)$$

$$\mathbf{w}^H E_\omega \mathbf{w}[\omega] = 1 \quad (38)$$

其中， E_ω 的 (e, f) 元素用 $[E_\omega]_{e, f}$ 表示，表达式如下。

$$[E_\omega]_{e, f} = \begin{cases} 1, & e = f = n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (39)$$

由于关于 $\mathbf{w}$ 的分数和非凹约束式 (38)，以及每个 ω 的非凸二次等式约束式 (38)，找到问题 (35) 的最优解是具有挑战性的。为了解决这些问题，本文采用 SDR 技术，由 $\text{rank}(\mathbf{Z})$ 和 $\text{tr}(\mathbf{Z})$ 分别表示矩阵 $\mathbf{Z}$ 的秩和迹。对于 $\mathbf{W}[\omega] \triangleq \mathbf{w}[\omega]\mathbf{w}^H[\omega]$ ，需要放弃 $\text{rank}(\mathbf{W}[\omega]) = 1$ 的约束，以便将问题 (35) 重新表达为其松弛形式。为了获得问题 (35) 的近似解，转换为一个更新后的优化问题：

$$\max_{\mathbf{W} \geq 0, \tau \geq 0, \chi} \chi \quad (40)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^Q \beta_i[\omega] [\ln(1 + \text{tr}(\Phi_W[\omega]\mathbf{W}[\omega]) + w_W[\omega]) - \ln(1 + \tau_0[\omega]) - \frac{\tau[\omega] - \tau_0[\omega]}{\ln 2(1 + \tau_0[\omega])}] \geq \chi \quad (41)$$

$$\frac{\text{tr}(\Phi_I[\omega]\mathbf{W}[\omega]) + w_I[\omega]}{\text{tr}(\Phi_U[\omega]\mathbf{W}[\omega]) + w_U[\omega] + \sigma^2} \leq \tau[\omega] \quad (42)$$

$$\text{tr}(E_n \mathbf{W}[\omega]) = 1 \quad (43)$$

使用 Charnes - Cooper 变换，设定 $\varepsilon[\omega] =$

$$\frac{1}{\text{tr}(\Phi_U[\omega]\mathbf{W}[\omega]) + w_U[\omega] + \sigma^2}, \quad \text{以及 } \gamma[\omega] =$$

$\varepsilon[\omega]\mathbf{W}[\omega]$ ，问题 (40) 可以进一步转化为：

$$\max_{\mathbf{W} \geq 0, \varepsilon \geq 0, \gamma \geq 0, \tau \geq 0, \chi} \chi \quad (44)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^Q \beta_i[\omega] [\ln\left(1 + \frac{\text{tr}(\Phi_W[\omega]\mathbf{Y}[\omega])}{\varepsilon[\omega]} + w_W[\omega]\right) -$$

$$\ln(1 + \tau_0[\omega]) - \frac{\tau[\omega] - \tau_0[\omega]}{\ln 2(1 + \tau_0[\omega])}] \geq \chi \quad (45)$$

$$\text{tr}(\Phi_I[\omega]\mathbf{Y}[\omega]) + \varepsilon[\omega]w_I[\omega] \leq \tau[\omega] \quad (46)$$

$$\text{tr}(\Phi_U[\omega]\mathbf{Y}[\omega]) + \varepsilon[\omega](w_U[\omega] + \sigma^2) = 1 \quad (47)$$

$$\text{tr}(E_n \mathbf{Y}[\omega]) = \varepsilon[\omega] \quad (48)$$

在松弛变量 $\xi = \xi[\omega]_{\omega=1}^Q$ 的辅助下，问题 (44)

被转化为一个等价的非分数形式，如下所示。

$$\max_{\mathbf{W} \geq 0, \varepsilon \geq 0, \gamma \geq 0, \tau \geq 0, \chi} \chi \quad (49)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] [\ln(1 + \xi[\omega]) - \ln(1 + \tau_0[\omega]) - \frac{\tau[\omega] - \tau_0[\omega]}{\ln 2(1 + \tau_0[\omega])}] \geq \chi \quad (50)$$

$$\xi[\omega] = \frac{\text{tr}(\Phi_W[\omega]\mathbf{Y}[\omega])}{\varepsilon[\omega]} + w_W[\omega] \quad (51)$$

式(57)

因此，优化问题 (49) 可以通过使用 CVX 得到有效解决。

2.5 子问题5：空中智能反射面轨迹优化设计

给定 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\mathbf{P}_U$ 、 $\boldsymbol{\Theta}$ 和 $\mathcal{T}_U$ ，ARIS 水平轨迹 $\mathcal{T}_R$ 优化问题可以表示为：

$$\max_{\mathcal{T}_R, \chi} \chi \quad (52)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] [\text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega] \sigma_{RSI}^2} |h_{G_i,1}^H[\omega] H_{G_i} u[\omega]|^2 \right) - \text{lb} \left(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] h_{G_i,2}^H[\omega] H_{G_i} u[\omega]^2}{\sigma^2 + P_U[\omega] h_U^H[\omega] H_U[\omega] u[\omega]^2} \right)] \geq \chi \quad (53)$$

式(3), 式(4)

其中, $\mathbf{u}[\omega] = [u_1[\omega], u_2[\omega], \dots, u_N[\omega], 1]^T$ ($u_n[\omega] = e^{j\theta_n[\omega]}, \forall \omega, n$), $H_{G_i} = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} y_{G_i,R}[\omega] \\ 1 \end{bmatrix} \right)$, $\mathbf{h}_{G_i,1}[\omega] = [y_{R,U}^H[\omega], y_{G_i,U}[\omega]]^H$, $\mathbf{h}_{G_i,2}[\omega] = [y_{R,E}^H[\omega], y_{G_i,E}[\omega]]^H$, $\mathbf{h}_U[\omega] = [y_{R,E}^H[\omega], y_{U,E}[\omega]]^H$ 以及 $H_U[\omega] = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} y_{U,R}[\omega] \\ 1 \end{bmatrix} \right)$.

值得注意的是, $y_{G_i,R}[\omega]$ 、 $y_{U,R}[\omega]$ 、 $y_{R,E}^H[\omega]$ 和 $y_{R,U}^H[\omega]$ 均受到 ARIS 轨迹的影响。然而, 由于 U-E 链路的 $y_{U,R}[\omega]$ 、R-U 链路中的 $y_{G_i,R}[\omega]$ 和式 (6) 中的 $y_{R,E}[\omega]$ 的复杂和非线性特性, 优化 ARIS 轨迹变得棘手。为了解决这个问题, 本文在第 j 次迭代中使用 $(j-1)$ 次迭代的无人机轨迹近似 $y_{R,U}[\omega]$ 、 $y_{U,R}[\omega]$ 和 $y_{R,E}[\omega]$ 。通过这个近似, 可以重新制定问题如下。

$$\max_{\mathcal{T}_R, \chi} \chi \quad (54)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] [\text{lb}(1 + \rho \gamma_0[\omega] h_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] h_{b,v}[\omega]) - \text{lb}(1 + \frac{\rho \gamma_2[\omega] h_{d,v}^T[\omega] H_{D,Q}[\omega] h_{d,v}[\omega]}{1 + \rho \gamma_1[\omega] h_{d,v}^T[\omega] H_{D,Q}[\omega] h_{d,v}[\omega]})] \geq \chi \quad (55)$$

式(1), 式(2)

其中,

$$h_{b,v}[\omega] = \left[1, \sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L} (d_{G_i,R}[\omega])^{-\kappa_R}} \right]^T$$

$$h_{d,v}[\omega] = \left[1, \sqrt{(d_{G_i,R}[\omega])^{-\kappa_R} (d_{R,E}[\omega])^{-\kappa_R}} \right]^T$$

$$h_{c,v}[\omega] = \left[1, \sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L} (d_{R,E}[\omega])^{-\kappa_R}} \right]^T$$

$$H_{i,Q}[\omega] =$$

$$\left[\sqrt{(d_{G_i,U}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_1, (y_{G_i,R}^{(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,U}^{\text{LOS}(j-1)}[\omega] \right]^H \times$$

$$\left[\sqrt{(d_{G_i,U}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_1, (y_{G_i,R}^{(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,U}^{\text{LOS}(j-1)}[\omega] \right]$$

$$H_{E,Q}[\omega] =$$

$$\left[\sqrt{(d_{U,E}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_2, (y_{U,R}^{\text{LOS}(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E}^{(j-1)}[\omega] \right]^H \times$$

$$\left[\sqrt{(d_{G_i,E}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_3, (y_{G_i,R}^{(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E}^{(j-1)}[\omega] \right]$$

$$H_{E,Q}[\omega] =$$

$$\left[\sqrt{(d_{U,E}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_2, (y_{U,R}^{\text{LOS}(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E}^{(j-1)}[\omega] \right]^H \times$$

$$\left[\sqrt{(d_{U,E}[\omega])^{-\kappa_D}} \tilde{h}_2, (y_{U,R}^{\text{LOS}(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E}^{(j-1)}[\omega] \right]$$

这里, $\gamma_0[\omega] = \frac{P_{G_i}[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega] \sigma_{RSI}^2}$, $\gamma_1[\omega] = \frac{P_U[\omega]}{\sigma^2}$,

$$\gamma_2[\omega] = \frac{P_{G_i}[\omega]}{\sigma^2}.$$
 $y_{G_i,R}^{(j-1)}[\omega]$ 、 $y_{R,E}^{(j-1)}[\omega]$ 、 $y_{R,U}^{(j-1)}[\omega]$ 、

$y_{U,R}^{(j-1)}[\omega]$ 是利用 $(j-1)$ 次迭代的 ARIS 轨迹设计的。需要注意的是, 由于目标函数相对于 ARIS 轨迹 $\mathcal{T}$ 的非凹性, 问题 (54) 不是凸的。通过引入松弛变量 $\mathbf{s} = \mathbf{s}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{b} = \mathbf{b}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{v} = \mathbf{v}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{c} = \mathbf{c}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{o} = \mathbf{o}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{a} = \mathbf{a}[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{f}_0 = \mathbf{f}_0[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_1[\omega]_{\omega=1}^Q$, $\mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_2[\omega]_{\omega=1}^Q$, 进一步更新问题 (54), 具体如下。

$$\max_{\mathcal{T}_R, \mathbf{b}, \mathbf{v}, \mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{o}, \mathbf{f}_0, \mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \chi, \mathbf{s}} \chi \quad (56)$$

$$\text{s.t. } \sum_{\omega=1}^Q \frac{1}{Q} \alpha_i[\omega] \left[\text{lb}(1 + \rho \gamma_0[\omega] f_0[\omega]) - \text{lb} \left(1 + \frac{1}{\mathbf{s}[\omega]} \right) \right] \geq \chi \quad (57)$$

$$\frac{\rho \gamma_2[\omega] f_1[\omega]}{1 + \rho \gamma_1[\omega] f_2[\omega]} \leq \frac{1}{\mathbf{s}[\omega]} \quad (58)$$

$$\sqrt{(d_{G_i,R}[\omega])^{-\kappa_R}} \geq b[\omega] \quad (59)$$



$$\sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L}} \geq v[\omega] \quad (60)$$

$$\sqrt{(d_{R,E}[\omega])^{-\kappa_R}} \geq c[\omega] \quad (61)$$

$$\sqrt{(d_{G_i,R}[\omega])^{-\kappa_R}} \leq a[\omega] \quad (62)$$

$$\sqrt{(d_{R,E}[\omega])^{-\kappa_R}} \leq o[\omega] \quad (63)$$

$$\tilde{h}_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{h}_{b,v}[\omega] \geq f_0[\omega] \quad (64)$$

$$\tilde{h}_{d,v}^T[\omega] H_{D,Q}[\omega] \tilde{h}_{d,v}[\omega] \leq f_1[\omega] \quad (65)$$

$$\tilde{h}_{c,v}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \tilde{h}_{c,v}[\omega] \geq f_2[\omega] \quad (66)$$

式(1), 式(2)

其中, $\tilde{h}_{c,v}[\omega] = [1, c[\omega]v[\omega]]^T$, $\tilde{h}_{d,v}[\omega] = [1, b[\omega]c[\omega]]^T$, $\tilde{h}_{b,v}[\omega] = [1, b[\omega]v[\omega]]^T$ 。为了使后续推导更容易, 对式(59)~式(63)展开观察。展开后存在非凸性以及 $\ln(1 + \frac{1}{\aleph[\omega]})$ 中关于 $\aleph[\omega]$ 的非凹性, 因此, 对展开式中的 $-x_R^2[\omega]$ 、 $-y_R^2[\omega]$ 、 $(b[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}}$ 、 $(v[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}}$ 、 $(c[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}}$ 、 $\tilde{h}_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{h}_{b,v}[\omega]$ 和 $\tilde{h}_{c,v}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \tilde{h}_{c,v}[\omega]$ 在给定的可行点 $x_{R,0} = \{x_{R,0}[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、 $y_{R,0} = \{y_{R,0}[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、 $b_0 = \{b_0[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、 $v_0 = \{v_0[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、 $c_0 = \{c_0[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 、 $H_{bv,0} = \{\tilde{h}_{bv,0}[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 和 $H_{cv,0} = \{\tilde{h}_{cv,0}[\omega]\}_{\omega=1}^Q$ 处进行一阶泰勒展开, 相应地, 问题(56)可以近似转换为:

$$\max_{\mathcal{T}_R, b, v, c, a, o, f_0, f_1, f_2, \chi, \aleph} \chi \quad (67)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] \left[\ln(1 + \rho \gamma_0[\omega] f_0[\omega]) - \ln \left(1 + \frac{1}{\aleph[\omega]} \right) \right] \geq \chi \quad (68)$$

$$\begin{aligned} & x_R^2[\omega] + x_i^2 + y_R^2[\omega] + y_i^2 - 2x_R[\omega]x_i - 2y_R[\omega]y_i + z_R^2 \\ & - (1 + \frac{4}{\kappa_D})(b_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + \frac{4}{\kappa_D}(b_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}-1} b[\omega] \leq 0 \end{aligned} \quad (69)$$

$$x_U^2[\omega] + x_R^2[\omega] + y_U^2[\omega] + y_R^2[\omega] - 2x_U[\omega]x_R[\omega] -$$

$$2y_U[\omega]y_R[\omega] + (z_U - z_R)^2 - (1 + \frac{4}{\kappa_L})(v_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}} +$$

$$\frac{4}{\kappa_L}(v_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}-1} v[\omega] \leq 0 \quad (70)$$

$$\begin{aligned} & x_R^2[\omega] + x_E^2 + y_R^2[\omega] + y_E^2 - 2x_R[\omega]x_E - 2y_R[\omega]y_E + z_R^2 \\ & - (1 + \frac{4}{\kappa_D})(c_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + \frac{4}{\kappa_D}(c_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}-1} c[\omega] \leq 0 \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} & (a[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + x_{R,0}^2[\omega] - 2x_{R,0}[\omega]x_R - x_i^2 + y_{R,0}^2[\omega] - \\ & 2y_{R,0}[\omega]y_R - y_i^2 + 2x_R[\omega]x_i + 2y_R[\omega]y_i - z_R^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} & (o[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + x_{R,0}^2[\omega] - 2x_{R,0}[\omega]x_R - x_E^2 + y_{R,0}^2[\omega] - \\ & 2y_{R,0}[\omega]y_R - y_E^2 + 2x_R[\omega]x_E + 2y_R[\omega]y_E - z_R^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (73)$$

$$\begin{aligned} & f_0[\omega] + \tilde{h}_{bv,0}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{h}_{bv,0}[\omega] - \\ & 2R[\tilde{h}_{bv,0}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{h}_{bv,0}[\omega]] \leq 0 \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} & f_2[\omega] + \tilde{h}_{cv,0}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \tilde{h}_{cv,0}[\omega] - \\ & 2R[\tilde{h}_{cv,0}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \tilde{h}_{cv,0}[\omega]] \leq 0 \end{aligned} \quad (75)$$

式(1), 式(2), 式(58)

因此, 凸优化问题(67)可以通过使用 CVX 得到有效解决。

2.6 子问题6: 全双工无人机轨迹优化设计

给定 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{P}_{G_i}$ 、 $\mathbf{P}_U$ 、 $\boldsymbol{\Theta}$ 和 $\mathcal{T}_R$, 全双工无人机轨迹 $\mathcal{T}_U$ 优化问题可以表示为:

$$\max_{\mathcal{T}_U, \chi} \chi \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] \ln(1 + \frac{P_{G_i}[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega]\sigma_{RSI}^2} |\mathbf{h}_{G_i1}^H[\omega] H_{G_i} u[\omega]|^2) \\ & - \ln(1 + \frac{P_{G_i}[\omega] A[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega] |\mathbf{h}_U^H[\omega] H_U u[\omega]|^2}) \geq \chi \end{aligned} \quad (77)$$

式(3), 式(4)

其中, $H_{G_i} = \text{diag} \left(\begin{bmatrix} y_{G_i,R} \\ 1 \end{bmatrix} \right)$, $H_U[\omega] = \text{diag}$

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} y_{U,R}[\omega] \\ 1 \end{bmatrix} \right), \mathbf{h}_{G,i}[\omega] = [y_{R,U}^H[\omega], y_{G,i,U}[\omega]]^H, A[\omega] = \\ & |h_{G,2}^H[\omega] H_{G,i} u[\omega]|^2, \mathbf{h}_{G,2}[\omega] = [y_{R,E}^H, y_{G,i,E}]^H, h_U[\omega] = \\ & [y_{R,E}^H, y_{U,E}[\omega]]^H, u[\omega] = [u_1[\omega], u_2[\omega], \dots, u_N[\omega], 1]^T \\ & (u_n[\omega] = e^{j\theta_n[\omega]}, \forall \omega, n). \end{aligned}$$

特别地, 由于 $\mathbf{y}_{R,E}$ 和 $\mathbf{y}_{G,i,E}$ 与全双工无人机轨迹无关, 本文在式 (77) 中设置一个常量 $A[\omega]$ 来代替它。值得注意的是, $\mathbf{y}_{G,i,U}[\omega]$ 、 $\mathbf{y}_{U,E}[\omega]$ 和 $\mathbf{y}_{R,U}[\omega]$ 受到全双工无人机轨迹变量的影响。然而, 由于 $\mathbf{y}_{R,U}[\omega]$ 的复杂和非线性特性, 优化无人机轨迹十分困难。为了解决这个问题, 本文在第 j 次迭代中使用 $(j-1)$ 次迭代的无人机轨迹近似 $\mathbf{y}_{R,U}[\omega]$ 和 $\mathbf{y}_{U,R}[\omega]$ 。通过此近似, 可以重新制定问题如下。

$$\begin{aligned} & \max_{\mathcal{T}, \chi} \chi \quad (78) \\ \text{s.t. } & \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \alpha_i[\omega] [\text{lb}(1 + \\ & \gamma_0[\omega] h_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] h_{b,v}[\omega]) \\ & - \text{lb}(1 + \frac{\gamma_2[\omega]}{1 + \gamma_1[\omega] h_{c,v}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] h_{c,v}[\omega]})] \geq \chi \end{aligned} \quad (79)$$

式(3), 式(4)

其中,

$$\begin{aligned} h_{b,v}[\omega] &= \left[\sqrt{(d_{G,i,U}[\omega])^{-\kappa_D}}, \sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L}} \right]^T, \\ h_{c,v}[\omega] &= \left[\sqrt{(d_{U,E}[\omega])^{-\kappa_D}}, \sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L}} \right]^T, \\ H_{i,Q}[\omega] &= \left[\sqrt{\rho} \tilde{\mathbf{h}}_1, y_{G,i,R}^H \Theta^H[\omega] y_{R,U}^{\text{LOS},(j-1)}[\omega] \right]^H \\ & \left[\sqrt{\rho} \tilde{\mathbf{h}}_1, y_{G,i,R}^H \Theta^H[\omega] y_{R,U}^{\text{LOS},(j-1)}[\omega] \right], \\ H_{E,Q}[\omega] &= \left[\sqrt{\rho} \tilde{\mathbf{h}}_2, (y_{U,R}^{\text{LOS},(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E} \right]^H \\ & \left[\sqrt{\rho} \tilde{\mathbf{h}}_2, (y_{U,R}^{\text{LOS},(j-1)}[\omega])^H \Theta^H[\omega] y_{R,E} \right]. \end{aligned}$$

这里, $\gamma_0[\omega] = \frac{P_{G,i}[\omega]}{\sigma^2 + P_U[\omega]\sigma_{RSI}^2}$, $\gamma_1[\omega] = \frac{P_U[\omega]}{\sigma^2}$, $\gamma_2[\omega] = \frac{P_{G,i}[\omega]A[\omega]}{\sigma^2}$ 及 $\mathbf{y}_{R,U}^{(j-1)}[\omega]$ 和 $\mathbf{y}_{U,R}^{(j-1)}[\omega]$ 是利用 $(j-1)$ 次迭代的无人机轨迹设计的 $\mathbf{y}_{U,R}[\omega]$ 和 $\mathbf{y}_{R,U}[\omega]$ 。同时, 目标函数相对于无人机轨迹 $\mathcal{T}$ 的非凹性, 问题 (78) 不是凸的。引入松弛变量 $\mathbf{b} = b[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{v} = v[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{c} = c[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{f}_0 = f_0[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$ 和 $\mathbf{f}_1 = f_1[\omega]_{\omega=1}^{\Omega}$, 进一步更新问题 (78), 具体如下。

$$\max_{\mathcal{T}, \mathbf{b}, \mathbf{v}, \mathbf{c}, \mathbf{f}_0, \mathbf{f}_1, \chi} \chi \quad (80)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \frac{1}{\Omega} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \alpha_i[\omega] \text{lb}(1 + \rho \gamma_0[\omega] f_0[\omega]) \\ & - \text{lb}(1 + \frac{\gamma_2[\omega]}{1 + \rho \gamma_1[\omega] f_1[\omega]}) \geq \chi \end{aligned} \quad (81)$$

$$\sqrt{(d_{G,i,U}[\omega])^{-\kappa_D}} \geq b[\omega] \quad (82)$$

$$\sqrt{(d_{U,R}[\omega])^{-\kappa_L}} \geq v[\omega] \quad (83)$$

$$\sqrt{(d_{U,E}[\omega])^{-\kappa_D}} \geq c[\omega] \quad (84)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{\mathbf{h}}_{b,v}[\omega] \geq f_0[\omega] \quad (85)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_{c,v}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \tilde{\mathbf{h}}_{c,v}[\omega] \geq f_1[\omega] \quad (86)$$

式(3), 式(4)

其中, $\tilde{\mathbf{h}}_{c,v}[\omega] = [c[\omega], v[\omega]]^T$, $\tilde{\mathbf{h}}_{b,v}[\omega] = [b[\omega], v[\omega]]^T$ 。为了使后续推导更容易, 展开式 (82) ~ 式 (84) 进行观察, 由于存在非凸性, 以及 $\text{lb}(1 + \frac{\gamma_2[\omega]}{1 + \rho \gamma_1[\omega] f_1[\omega]})$ 中关于 $f_1[\omega]$ 的非凹性。对 $(b[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}}$ 、 $(v[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}}$ 、 $(c[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}}$ 、 $\tilde{\mathbf{h}}_{b,v}^T[\omega] H_{i,Q}[\omega] \tilde{\mathbf{h}}_{b,v}[\omega]$ 和 $\mathbf{h}_{c,v}^T[\omega] H_{E,Q}[\omega] \mathbf{h}_{c,v}[\omega]$ 在给定的可行点 $\mathbf{b}_0 = \{b_0[\omega]\}_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{v}_0 = \{v_0[\omega]\}_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{c}_0 = \{c_0[\omega]\}_{\omega=1}^{\Omega}$ 、 $\mathbf{H}_{b,v,0} = \{\tilde{\mathbf{h}}_{b,v,0}[\omega]\}_{\omega=1}^{\Omega}$ 和 $\mathbf{H}_{c,v,0} = \{\tilde{\mathbf{h}}_{c,v,0}[\omega]\}_{\omega=1}^{\Omega}$ 进行一阶泰勒展开, 相应地, 问题 (80) 可以近似转换为:



$$\max_{\mathbf{T}, \mathbf{b}, \mathbf{v}, \mathbf{c}, f_0, f_1, \chi} \chi \quad (87)$$

$$\text{s.t. } \frac{1}{Q} \sum_{\omega=1}^Q \alpha_i[\omega] [\text{lb}(1 + \rho\gamma_0[\omega]f_0[\omega]) - g_2(1 + \frac{\gamma_2[\omega]}{1 + \rho\gamma_1[\omega]f_1[\omega]})] \geq \zeta, \quad (88)$$

$$x^2[\omega] + x_i^2 + y^2[\omega] + y_i^2 - 2x[\omega]x_i - 2y[\omega]y_i + z_U^2 - (1 + \frac{4}{\kappa_D})(b_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + \frac{4}{\kappa_D}(b_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}-1}b[\omega] \leq 0 \quad (89)$$

$$x^2[\omega] + x_R^2 + y^2[\omega] + y_R^2 - 2x[\omega]x_R - 2y[\omega]y_R + (z_U - z_R)^2 - (1 + \frac{4}{\kappa_L})(v_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}} + \frac{4}{\kappa_L}(v_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_L}-1}v[\omega] \leq 0 \quad (90)$$

$$x^2[\omega] + x_E^2 + y^2[\omega] + y_E^2 - 2x[\omega]x_E - 2y[\omega]y_E + z_U^2 - (1 + \frac{4}{\kappa_D})(c_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}} + \frac{4}{\kappa_D}(c_0[\omega])^{-\frac{4}{\kappa_D}-1}c[\omega] \leq 0 \quad (91)$$

$$f_0[\omega] + \tilde{\mathbf{h}}_{bv,0}^T[\omega]\mathbf{H}_{i,Q}[\omega]\tilde{\mathbf{h}}_{bv,0}[\omega] - 2R[\tilde{\mathbf{h}}_{bv,0}^T[\omega]\mathbf{H}_{i,Q}[\omega]\tilde{\mathbf{h}}_{bv,0}[\omega]] \leq 0 \quad (92)$$

$$f_1[\omega] + \tilde{\mathbf{h}}_{cv,0}^T[\omega]\mathbf{H}_{E,Q}[\omega]\tilde{\mathbf{h}}_{cv,0}[\omega] - 2R[\tilde{\mathbf{h}}_{cv,0}^T[\omega]\mathbf{H}_{E,Q}[\omega]\tilde{\mathbf{h}}_{cv,0}[\omega]] \leq 0 \quad (93)$$

式(3),式(4)

因此, 凸优化问题 (87) 可以通过使用 CVX 得到有效解决。

2.7 总体算法和设计复杂度

求解优化问题 (16) 的算法如算法 1 所示, 总结了新提出的算法, 将整体优化问题分解为 6 个子问题。最大迭代次数由 $l_{\max}$ 表示, 收敛精度由参数 ϵ 控制。迭代解决这 6 个子问题, 可以得到问题 (16) 的解。这 6 个子问题的复杂性决定了整体计算的复杂性。为了解决这些子问题, 使用了 CVX^[15] 的标准内点方法。子问题 4、子问题 5 和子问题 6 的计算复杂性最高, 分别表示为 $o_{\text{sub4}}(\sqrt{N+1} \log(\frac{1}{\epsilon})(M\Omega(N+1)^3 + M^2\Omega^2(N+1)^2 + M^2\Omega^2))$, $O_{\text{sub5}}((8N)^{3.5} \log(\frac{1}{\epsilon}))$

和 $O_{\text{sub6}}((8N)^{3.5} \log(\frac{1}{\epsilon}))$ 。因此, 算法 1 的复杂性主要来自子问题 4、子问题 5 和子问题 6。算法 1 中的目标函数 (16) 由后续的数值结果确认。

算法 1 求解优化问题 (16) 的算法

(1) 初始化 $\mathbf{P}_{G_i}^0$, $\mathbf{P}_U^0$, $\boldsymbol{\theta}^0$, $\mathcal{T}_R^0$, $\mathcal{T}_U^0$, 迭代次数 $q=0$, 容差 ϵ 和最大迭代次数 $q_{\max}$ 。

(2) 开始迭代:

计算迭代次数 $q=q+1$

根据给定的 $\{\mathbf{P}_{G_i}^{l-1}, \mathbf{P}_U^{l-1}, \boldsymbol{\theta}^{l-1}, \mathcal{T}_R^{l-1}, \mathcal{T}_U^{l-1}\}$, 求解优化问题 (18), 得到 $\mathbf{A}^l$

根据给定的 $\{\mathbf{P}_U^{l-1}, \boldsymbol{\theta}^{l-1}, \mathcal{T}_R^{l-1}, \mathcal{T}_U^{l-1}, \mathbf{A}^l\}$, 求解优化问题 (21), 得到 $\mathbf{P}_{G_i}^l$

根据给定的 $\{\boldsymbol{\theta}^{l-1}, \mathcal{T}_R^{l-1}, \mathcal{T}_U^{l-1}, \mathbf{A}^l, \mathbf{P}_{G_i}^l\}$, 求解优化问题 (26), 得到 $\mathbf{P}_U^l$

根据给定的 $\{\mathcal{T}_R^{l-1}, \mathcal{T}_U^{l-1}, \mathbf{A}^l, \mathbf{P}_{G_i}^l, \mathbf{P}_U^l\}$, 求解优化问题 (49), 得到 $\boldsymbol{\theta}^l$

根据给定的 $\{\mathcal{T}_U^{l-1}, \mathbf{A}^l, \mathbf{P}_{G_i}^l, \mathbf{P}_U^l, \boldsymbol{\theta}^l\}$, 求解优化问题 (67), 得到 $\mathcal{T}_R^l$

根据给定的 $\{\mathbf{A}^l, \mathbf{P}_{G_i}^l, \mathbf{P}_U^l, \boldsymbol{\theta}^l, \mathcal{T}_R^l\}$, 求解优化问题 (87), 得到 $\mathcal{T}_U^l$

在给定 $\{\mathbf{A}^l, \mathbf{P}_{G_i}^l, \mathbf{P}_U^l, \boldsymbol{\theta}^l, \mathcal{T}_R^l, \mathcal{T}_U^l\}$ 的情况下, 获取 χ^l 。

(3) 根据 $|\chi^l - \chi^{l-1}| \leq \epsilon$ 或 $q \geq q_{\max}$ 判断是否收敛, 是则退出迭代, 否则进入下一次迭代。

3 数值仿真结果分析

本节通过一些数值模拟结果, 可以验证所提出的联合优化用户调度、用户发射功率、无人机干扰功率、ARIS 相位变换、ARIS 轨迹和全双工无人机轨迹的算法, 称作 APT 方法。ARIS 的初始可行轨迹称为基线轨迹, 采用最佳靠近方法。它沿着直线路径穿过用户, 并在飞行时间 T 内以最大速度直接前往目的地点。为了便于进行性能比较, 模拟验证中还考虑了以下基准。

(1) 无干扰联合优化, 简称NJ方法, 设置 $P_U[\omega]=0, \forall \omega$, 同时优化用户调度、用户传输功率、RIS相位变换、ARIS轨迹和无人机轨迹。

(2) 无RIS联合优化, 简称NR方法, 将反射元素的数量设置为 $N=0$, 同时优化用户调度、用户传输功率、无人机干扰功率和无人机轨迹。

(3) 将RIS设置在建筑物表面, 联合优化用户调度、用户传输功率、无人机干扰功率、RIS相位变换和全双工无人机轨迹的算法, 简称SPRPT方法。

本文仿真参数为 $G_1=[0, 67]^T \text{ m}$ 、 $G_2=[-47, 16]^T \text{ m}$ 、 $G_3=[45, 20]^T \text{ m}$ 、 $s_E=[155, 70]^T \text{ m}$; 无人机参数为 $Z_U=100 \text{ m}$ 、 $Z_R=100 \text{ m}$ 、 $t_{0,R}=[-200, 40]^T \text{ m}$ 、 $t_{F,R}=[200, 40]^T \text{ m}$ 、 $t_{0,U}=[-200, 40]^T \text{ m}$ 、 $t_{F,U}=[200, 40]^T \text{ m}$ 、 $V_{\max,U}=30 \text{ m/s}$ 、 $V_{\max,R}=30 \text{ m/s}$; 环境参数为 $\delta_t=1 \text{ s}$ 、 $N=N_x N_y$ 、 $\bar{P}_G=0.1 \text{ W}$ 、 $P_G^{\max}=0.4 \text{ W}$ 、 $\bar{P}_U=0.1 \text{ W}$ 、 $P_U^{\max}=0.4 \text{ W}$ 、 $\kappa_D=1.1$ 、 $\kappa_L=2.2$ 、 $\kappa_R=3.3$ 、 $\varrho_{G,R}=\varrho_{R,E}=3 \text{ dB}$ 、 $\rho=-30 \text{ dB}$ 、 $\sigma^2=-60 \text{ dB}$ 。

在 $T=100 \text{ s}$ 和 $N=800$ 时, 不同基准方案中的ARIS轨迹和无人机轨迹如图2所示。4种情景下最优轨迹的具体描述如下。

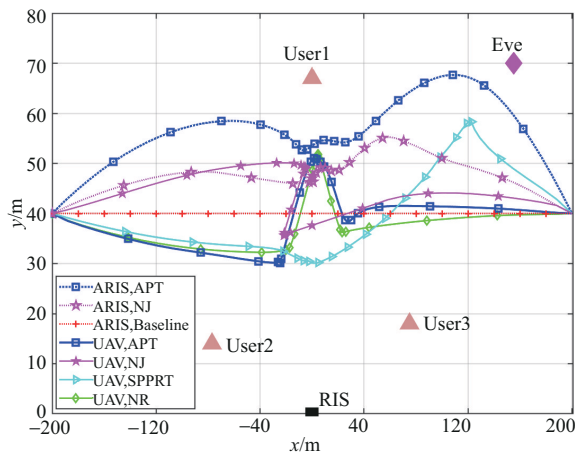


图2 不同基准方案中的ARIS轨迹和无人机轨迹

(1) 在提出的APT方案中, 无人机按照与用户的距离, 分别先后靠近User2、User1和User3并与其通信, 以最大化性能增益。为了保证无人机与用户通信的安全性, ARIS与无人机在不同高度的同一位置起飞, 向同一终点飞去。其中, 在无人机靠近用户通信时, ARIS尽量靠近窃听器, 通过反射无人机发送的干扰信号以抑制窃听从而增强通信安全性。

(2) 在NJ方案中, 无人机先后与User1、User3和User2通信, 并在与User1通信时悬停尽可能多的时间, 以最大化性能增益。当无人机向终点飞行时, 选择与其距离最远的User2通信, 以最小化窃听者的窃听效果, 从而保证通信的安全性。ARIS尽可能地在User1处悬停, 以最大化辅助无人机与用户通信的性能。与APT方案不同的是, 在靠近终点时, 为了保证信息不被窃听者窃听, ARIS在无人机与窃听者之间飞行, 与User2保持较远的距离, 以最小化信息泄露的风险。

(3) 在NR方案中, 无人机按顺序与User2、User1和User3通信。与APT方案不同, 没有ARIS的帮助, NR方案无法有效抑制窃听。因此, 无人机分别接近每个用户并远离窃听者, 以增强保密速率。

(4) 在SPRPT方案中, 无人机在用户和RIS之间飞行, 以最大化性能增益。然后, 它接近窃听器, 发送干扰信号以通过抑制窃听来增强通信安全性。

随着 T 从 40 s 变化到 140 s ($N=800$), 不同基准方案中不同时间下的最大最小期望速率如图3所示。从图3可以看出, APT方案明显优于其他基准。随着 T 的增加, NJ方案表现较差, 因为它不能对窃听者进行干扰。这显示了无人机全双工通信系统的显著优势。SPRPT方案在最大最小速率上优于NR方案, 表明RIS可以有效抑制窃听。显然, APT方案在保密速率方面优于SPRPT方



案, 这表明了 ARIS 比附着在建筑物表面的静态 RIS 更能提高整体保密速率方面的有效性。

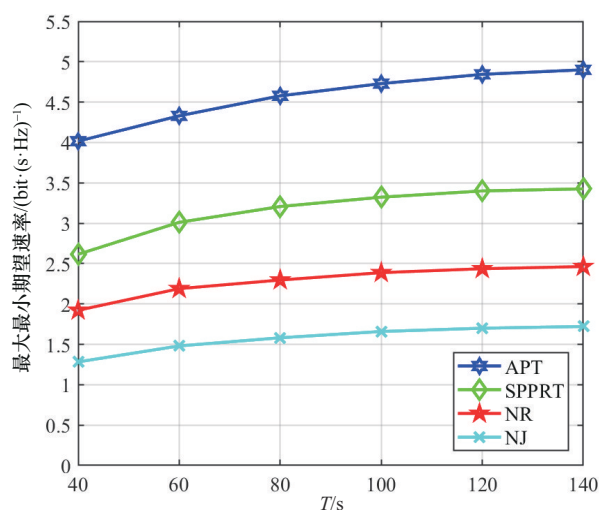


图3 不同基准方案中不同时间下的最大最小期望速率

在 $N=800$ 、 $N=1\,600$ 和 $N=2\,400$ 时, 不同基准方案在不同的智能反射面元件数量下的最大最小期望速率如图4所示。对于相同的时隙, 可以看到 ARIS 反射元素的数量 N 越多, 保密速率的提高越大; 对于相同的 N 值, 随着 T 的增加, 保密速率也增加。因此, 增加元素的数量可以产生更高的被动波束成形增益。

在 $T=100\text{ s}$ 和 $N=800$ 时, 不同基准方案在不

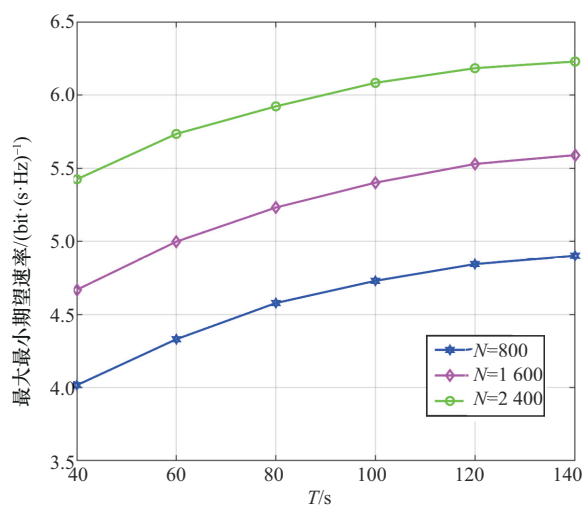


图4 不同基准方案在不同的智能反射面元件数量下的最大最小期望速率

同的 LIL 下的最大最小期望速率如图5所示。从图5可以看出, APT 方案表现出相较于其他方案的优越性。随着 LIL 的增加, APT 的保密速率逐渐接近 JO/NJ, 而 JO/NR 收敛到一个稳定值。在 APT 方案中, 无人机动态调整功率分配, 以与 NJ 方案的干扰功率对齐, 导致它们的保密速率收敛, 尤其是在高 LIL 值的情景中。JO/NR 方案由于没有 RIS 的协助显著降低了通信性能和窃听抵消, 随着 LIL 的增加, 无人机干扰功率大幅降低并收敛到稳定的保密速率。在 SPPRT 方案中, 由于 RIS 没有空中 RIS 辅助通信那样的优越性能, 其 RIS 无法灵活地调节以适应无人机在不同的位置时 LIL 所带来的影响, 随着 LIL 的增加, SPPRT 方案的保密速率低于 NJ 方案。因此, 在 APT 方案中, 虽然无人机更高的 LIL 将影响其发送干扰信号的能力, 但空中 RIS 比静态 RIS 更能有效消减 LIL 带来的负面影响。

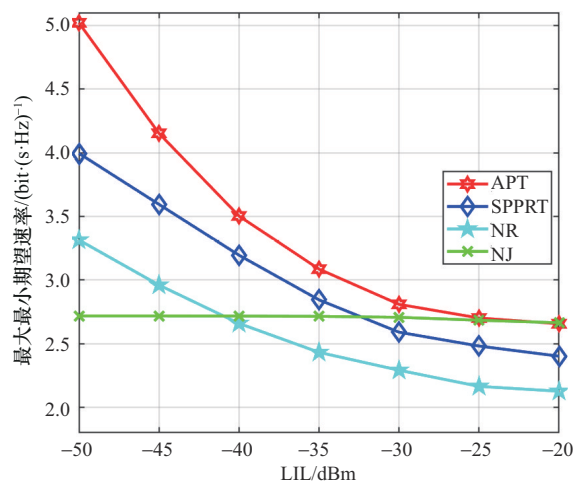


图5 不同基准方案在不同的 LIL 下的最大最小期望速率

在 $T=40\text{ s}$ 和 $N=800$ 时, 不同基准方案在不同的峰值干扰功率下的最大最小期望速率如图6所示。从图6可以看出, APT 方法在各个峰值发射功率下都保持了较高的系统容量性能。这说明, APT 方法通过联合优化多个参数, 能够合理调整干扰功率以及双无人机的航迹, 从而有效提高系统的整体性能。SPPRT 方法的性能介于 APT 和

NR 方法之间, 由于将 RIS 设置在建筑物上, 相比于 APT 的 ARIS 优化方案, SPPRT 的灵活性受限, 因此无法与全双工无人机实现紧密配合。NR 方法由于无法享受 RIS 带来的通信性能增益以及对窃听的干扰抑制, 其系统容量明显低于 APT 和 SPPRT 方法, 在高发射功率下, 两者性能差距更为明显。

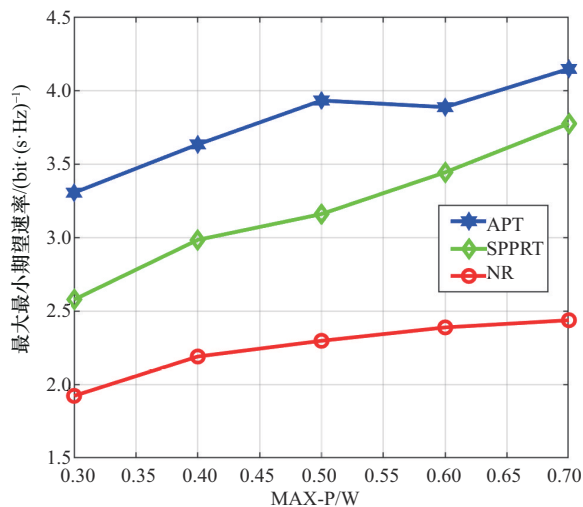


图6 不同基准方案在不同的峰值干扰功率下的最大最小期望速率

4 结束语

本文聚焦于提高无人机通信系统的安全性和效率, 特别是在存在地面窃听者的复杂通信环境中。针对传统全双工通信系统中的安全隐患以及频谱效率低下的问题, 研究引入了 ARIS 辅助的全双工无人机通信技术。联合优化用户调度、用户传输功率、全双工无人机干扰功率、RIS 相位变换、ARIS 航迹和全双工无人机航迹等多个参数, 最大化最小平均可达安全速率。由于优化问题的非凸性以及子问题中存在非凸二次等式约束, 本文提出了一种新颖的算法, 即 APT 方案, 处理这样的优化问题并得到次优解。数值结果证实了本文所提算法的有效性。与静态的 RIS 和无 RIS 的情况相比, ARIS 辅助的全双工无人机的方

案取得了显著的安全速率增益。

参考文献:

- [1] SABRI ABDALLA A, FAIZUR RAHMAN T, MAROJEVIC V. UAVs with reconfigurable intelligent surfaces: applications, challenges, and opportunities[J]. arXiv e-Prints, 2020: arXiv: 2012.04775.
- [2] LIU C X, LEE J, QUEK T Q S. Safeguarding UAV communications against full-duplex active eavesdropper[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 2919-2931.
- [3] WU Q Q, XU J, ZENG Y, et al. A comprehensive overview on 5G-and-beyond networks with UAVs: from communications to sensing and intelligence[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2912-2945.
- [4] YANG L, MENG F X, ZHANG J Y, et al. On the performance of RIS-assisted dual-hop UAV communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10385-10390.
- [5] LI S X, 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.
- [6] PANG X W, ZHAO N, TANG J, et al. IRS-assisted secure UAV transmission via joint trajectory and beamforming design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1140-1152.
- [7] 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.
- [8] WU W, WANG Y J, MO J L, et al. Robust proactive eavesdropping in UAV-enabled wireless communication networking[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 285.
- [9] LAI H, LI D F, XU F, et al. Optimization of full-duplex UAV secure communication with the aid of RIS[J]. Drones, 2023, 7(9): 591.
- [10] WU Q Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint trajectory and communication design for UAV-enabled multiple access[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [11] BIAN K J, XU D Y. Auxiliary training based channel estimation for RIS aided UAV communications in disaster scenarios [C]//Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE



Press, 2023: 150-155.

- [12] DUO B, WU Q Q, YUAN X J, et al. Energy efficiency maximization for full-duplex UAV secrecy communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4590-4595.
- [13] WEI Z Q, CAI Y X, SUN Z, et al. Sum-rate maximization for IRS-assisted UAV OFDMA communication systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2530-2550.
- [14] GOPALA P K, LAI L F, EL GAMAL H. On the secrecy capacity of fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(10): 4687-4698.
- [15] GRANT M, SP B. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming[Z]. 2014.
- [16] GE L H, DONG P H, ZHANG H, et al. Joint beamforming and trajectory optimization for intelligent reflecting surfaces-assisted UAV communications[J]. IEEE Access, 2020(8): 78702-78712.
- [17] FANG S S, CHEN G J, LI Y H. Joint optimization for secure intelligent reflecting surface assisted UAV networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(2): 276-280.
- [18] NNAMANI C O, KHANDAKER M R A, SELLATHURAI M. Joint beamforming and location optimization for secure data collection in wireless sensor networks with UAV-carried intelligent reflecting surface[J]. arXiv preprint, 2021: arXiv: 2101.06565.
- [19] VO V N, LONG N Q, DANG V H, et al. Physical layer security in cognitive radio networks for IoT using UAV with reconfigurable intelligent surfaces[C]//Proceedings of the 2021 18th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [20] SHANG B D, SHAFIN R, LIU L J. UAV swarm-enabled aerial reconfigurable intelligent surface (SARIS) [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(5): 156-163.
- [21] LU H Q, 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.
- [22] PFEIFFER C, GRBIC A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(19): 197401.
- [23] LIN X Q, YAJNANARAYANA V, MURUGANATHAN S D, et al. The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 204-210.

[作者简介]



罗俊松 (1972-), 男, 成都理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为大数据技术、优化理论与强化学习及其应用、智能超表面的前沿基础。



黄平 (2001-), 男, 成都理工大学计算机与网络安全学院硕士生, 主要研究方向为无人机通信、凸优化理论、机器学习应用。



罗欣悦 (2002-), 女, 成都理工大学计算机与网络安全学院硕士生, 主要研究方向为无人机通信、机器学习应用、仿真系统。



赖欢 (1998-), 男, 成都理工大学计算机与网络安全学院硕士生, 主要研究方向为无人机通信、机器学习应用。



多滨 (1982-), 男, 博士, 成都理工大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无人机通信、凸优化理论、机器学习应用。



袁晓军 (1977-), 男, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为统计信号处理、机器学习、分布式学习、智能超表面的前沿基础。