

队列稳定性约束下的低空无人机通感一体化鲁棒安全波束成形算法

欧阳键^{*①②} 任伟^① 许拔^③ 刘笑宇^① 蒋万沐^①

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(南京信息工程大学复杂环境智能保障技术教育部重点实验室 南京 210044)

^③(国防科技大学第六十三研究所 南京 210007)

摘要: 针对低空无人机通感一体化(UAV-ISAC)系统中的数据到达量随机、机体抖动以及窃听威胁等问题, 该文提出了一种基于队列稳定性约束的鲁棒安全波束成形算法。首先, 构建以最小化系统长时隙平均发射功率为目标函数, 以队列稳定性、安全通信速率下限、感知性能下限和发射功率上限为约束的长时隙队列稳定性优化问题。其次, 由于长时隙优化问题难以直接求解, 采用Lyapunov优化框架将长时隙随机性优化问题转化为前后时隙关联的短时隙优化问题; 在短时隙优化中利用二阶泰勒展开对UAV机体抖动导致的通信链路角度误差进行近似处理, 并提出一种基于惩罚连续凸逼近的鲁棒安全优化算法。仿真结果表明, 所提算法与多种基准方案相比, 可有效保障UAV-ISAC系统在抖动场景下的数据传输稳定性与安全性。

关键词: 无人机; 通感一体化; 队列稳定性; Lyapunov优化; 鲁棒安全波束成形

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)00-0001-11

DOI: 10.11999/JEIT260275

CSTR: 32379.14.JEIT260275

1 引言

低空经济作为一类主要活动在低空空域的新兴综合经济形态, 主要依托各类低空无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)开展遥感监测, 交通运输以及消防救援等活动^[1,2]。低空通信技术作为支撑低空经济规模化、安全化发展的核心技术, 已成为极具理论价值与应用前景的关键研究方向。然而, 随着低空通信应用场景的快速拓展, 对协同感知与通信的需求也持续增长。为满足该需求, 感知与通信一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)技术通过共享硬件平台和频谱资源, 实现了无线感知与通信功能的深度结合, 有效提升了低空通信系统的资源利用效率^[3,4]。对于低空UAV-ISAC系统, 文献^[5]基于速率分割多址接入(Rate Splitting Multiple Access, RSMA)技术, 在

满足感知波束增益、RSMA公共速率、通信用户速率和发射功率的约束下, 实现了UAV能量效率的最大化。考虑到UAV机载能量受限, 文献^[6]提出了一种高能高效轨迹规划与资源分配算法, 在满足UAV-ISAC系统中所有用户服务质量约束的前提下, 最小化UAV通信感知与飞行推进的总能耗。然而, 文献^[5]和^[6]并未考虑UAV发送给用户的实际数据到达量会因应用层业务需求的多样性而呈现出时变特性, 导致系统资源分配策略难以及时响应实际数据到达量的动态变化。考虑到实际数据到达量的时变性与随机性问题, 文献^[7]针对双面有源可重构智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)系统, 通过引入数据队列对到达数据进行缓存, 提出了基于Lyapunov策略的数据队列长时隙稳定优化算法。该算法通过将长时隙队列稳定性优化问题解耦为时隙间相互关联的一系列确定性短时隙优化子问题, 实现了对原始问题的近似求解。基于Lyapunov优化策略, 文献^[8]提出了一种基于任务队列的长时隙用户调度与波束成形(Beamforming, BF)联合优化算法, 有效解决了工业物联网中业务流量的突发问题。为实现UAV移动边缘计算系统长时隙能量效率的最大化, 文献^[9]提出了一种基于RIS赋能的UAV轨迹与资源联合优化算法, 以实现系统长时隙能量效率与任务队列稳定性的平衡。针对UAV-ISAC系统, 文献^[10]提出了一种基于非正交多址接入技术辅助的UAV轨迹、BF与计算资源分配联合优化算法, 该算法利用Lyapunov优化策略实现了感知约束下的任务卸载吞吐量与高

收稿日期: 2026-03-16; 改回日期: 2026-06-24; 网络出版: 2026-07-04

*通信作者: 欧阳键 ouyangjian@njupt.edu.cn

基金项目: 南京信息工程大学复杂环境智能保障技术教育部重点实验室开放基金(B3202501), 江苏省高等学校自然科学基金项目(25KJD510011), 南京邮电大学引进人才自然科学基金启动基金(NY224068)

Foundation Items: The Key Laboratory of Intelligent Support Technology for Complex Environments, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology (B3202501), The Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (25KJD510011), The Natural Science Research Start up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications (NY224068)

可靠低时延约束之间的有效折中。鉴于空地无线通信链路的广播性与开放性, UAV发送给地面用户的信息极易被地面非法用户恶意窃听。为增强系统的通信安全, 文献[11]从物理层安全的角度, 提出了一种联合优化BF与RIS系数的无线安全传输方案, 以提升恶意窃听环境下的ISAC通信系统安全性能。面对地面非法监听, 文献[12]提出了一种UAV-ISAC隐蔽通信系统, 通过联合优化设计UAV飞行轨迹与BF, 实现了隐蔽速率的最大化。上述文献均假设UAV处于稳定飞行状态, 并未考虑在实际飞行环境中气流扰动和机身振动等因素导致的UAV机体抖动现象。UAV机体抖动会引起通信波束指向产生偏差, 使得波束难以在期望方向上实现最优波束增益, 同时在窃听方向上造成信号泄露, 导致无线传输安全性能的降低。针对UAV抖动引起的波束角度误差问题, 文献[13]分析了波束角度误差随机变化对通信速率的影响, 并提出了一种UAV下行通信系统鲁棒传输算法, 以提高用户平均可达速率。对于UAV-RIS辅助的无线携能通信系统, 文献[14]提出了基于一阶泰勒级数展开(First-Order Taylor Series Expansion, FTSE)的UAV抖动误差近似处理方法, 并通过联合优化BF、RIS相移矩阵和UAV轨迹最大化平均保密速率。由于FTSE方法对角度误差近似精度有限, 文献[15]提出了一种基于二阶泰勒级数展开(Second-Order Taylor Series Expansion, STSE)的UAV-RSMA上行通信系统抗抖动鲁棒BF优化方案。相较于FTSE方法, 采用STSE处理角度误差可有效提升近似精度, 增强BF的鲁棒性能。此外, 考虑到UAV机载能量受限和传输安全性, 文献[16]分别针对椭圆与概率抖动误差模型提出了基于安全能效最大化的卫星-无人机协同通信系统鲁棒BF算法。尽管文献[13–16]对UAV抖动问题开展了深入研究, 但均未考虑实际数据到达量的时变特性导致的系统性能不稳定问题。

为有效对抗UAV机体抖动且保障空地传输的安全性和稳定性, 本文提出一种数据队列稳定性约束下的UAV鲁棒安全BF算法。主要贡献如下:

(1) 针对低空UAV-ISAC系统, 考虑UAV机体抖动引起的信道不确定性和数据到达量时变问题, 构建了队列稳定性、安全通信速率、感知性能及发射功率约束条件下的系统长时隙平均发射功率最小化问题。

(2) 针对长时隙优化问题中的队列稳定性约束, 采用Lyapunov优化框架将长时隙优化问题转化为一系列短时隙优化子问题; 而对于短时隙内UAV

机体抖动导致的随机角度误差, 利用STSE与S-Procedure方法将其转换为确定性问题, 并提出了一种基于惩罚连续凸逼近优化的鲁棒安全BF算法。

(3) 仿真实验从角度误差、安全速率下限、Lyapunov权重参数以及数据到达率等多个维度验证了所提算法的有效性。同时, 相较于非鲁棒方案、无队列方案和仅通信波束方案, 所提算法在鲁棒性和稳定性方向均具有较好的性能提升。

2 系统模型与问题描述

低空UAV-ISAC系统下行通信场景如图1所示。UAV配备有 $N = N_x \times N_y$ 根天线的均匀平面阵列, 其在与一个单天线地面用户(Ground User, GU)通信的同时, 对目标感知区域(Sensing Area, SA)进行感知作业。此外, 存在有 M 个单天线窃听者(Eavesdropper, EVE)对UAV-GU链路的通信实施非法窃听。为提升下行传输的稳定性, UAV配备有数据存储队列, 用于存储待发送至GU的数据。在实际空中作业过程中, 受风力等因素影响, UAV存在机体抖动, 导致其天线波束的实际方向与估计方向存在偏差, 严重影响系统的通信与感知性能。采用三维笛卡尔坐标系, UAV, GU和EVE $_m$ 的坐标可分别表示为 $q_U = (0, 0, H)$, $q_G = (x_G, y_G, 0)$, $q_{E,m} = (x_{E,m}, y_{E,m}, 0)$, 其中 H 为无人机悬停高度, $m \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$ 。此外, SA为以坐标 $(x_S, y_S, 0)$ 为圆心 r_S 为半径的圆形区域。

对于ISAC系统, UAV可在同一时隙同时发送通信与感知信号^[3]。设 x_c 和 x_s 分别为UAV的通信和感知信号, 满足 $\mathbb{E}(|x_c|^2) = \mathbb{E}(|x_s|^2) = 1$ 且 $\mathbb{E}[x_s^* x_c] = 0$, 经过BF处理后, UAV向GU发射的信号可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}_c x_c + \mathbf{w}_s x_s \quad (1)$$

其中, $\mathbf{w}_c \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 和 $\mathbf{w}_s \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别为UAV通信和感知BF向量。由于无线通信的开放特性, GU和EVE $_m$ 接收到的信号可分别表示为:

$$z_G = \mathbf{h}_G^H \mathbf{y} + n_G \text{ 和 } z_{E,m} = \mathbf{h}_{E,m}^H \mathbf{y} + n_{E,m} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{h}_G \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 和 $\mathbf{h}_{E,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别为UAV-GU和UAV-EVE $_m$ 链路的信道向量, n_G 和 $n_{E,m}$ 为均值为0方差为 σ^2 的加性高斯白噪声。

将公式(1)代入公式(2), GU和EVE $_m$ 的信干噪比可分别表示为:

$$\gamma_G = \frac{|\mathbf{h}_G^H \mathbf{w}_c|^2}{|\mathbf{h}_G^H \mathbf{w}_s|^2 + \sigma^2} \text{ 和 } \gamma_{E,m} = \frac{|\mathbf{h}_{E,m}^H \mathbf{w}_c|^2}{|\mathbf{h}_{E,m}^H \mathbf{w}_s|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

为了保障通信的安全性, 根据物理层安全定

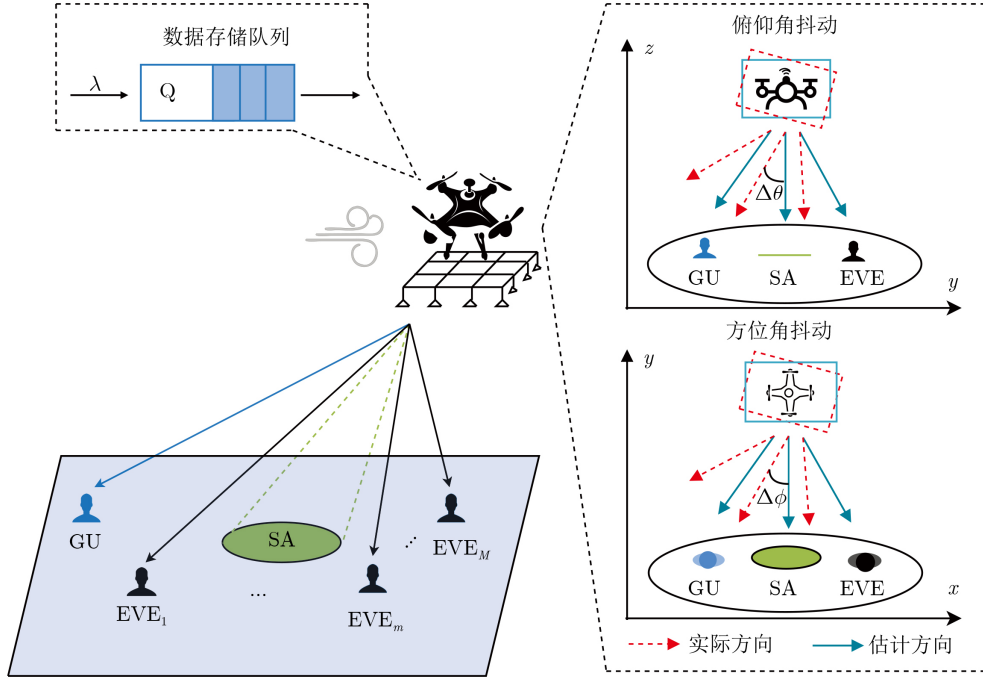


图 1 低空UAV-ISAC系统下行通信场景图

义，UAV-ISAC系统中GU的可达安全速率可表示为^[16]：

$$R_{\text{sec}} = \left[R_G - \max_{m \in \mathcal{M}} R_{E,m} \right]^+ \quad (4)$$

其中， $R_G = \log_2(1 + \gamma_G)$ 和 $R_{E,m} = \log_2(1 + \gamma_{E,m})$ 分别为GU和 EVE_m 的可达速率， $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

针对SA区域，为实现有效感知覆盖，采用离散采样方法在SA区域内均匀采样 K 个离散点，并以各个离散点的波束增益作为感知性能的度量指标^[12]。由于ISAC系统共享硬件与频谱资源，通信与感知波束可联合作用于SA^[17]。对于采样点 S_k ， $k \in \mathcal{K} \triangleq \{1, 2, \dots, K\}$ ，其波束增益可表示为：

$$G_{S,k} = \mathbb{E} \left(|\mathbf{h}_{S,k}^T \mathbf{y}|^2 \right) = \mathbf{h}_{S,k}^T (\mathbf{w}_c \mathbf{w}_c^H + \mathbf{w}_s \mathbf{w}_s^H) \mathbf{h}_{S,k} \quad (5)$$

其中， $\mathbf{h}_{S,k}$ 为UAV到采样点 S_k 的链路信道向量。

为避免与建筑或树木发生碰撞，UAV主要活动于低空开阔空域，其下行通信的空-地信道主要由视距分量主导^[16]。因此，UAV空-地信道向量可表示为：

$$\mathbf{h}_X = \sqrt{\eta d_X^{-2}} \mathbf{a}(\theta_X, \phi_X), \quad X \in \{G, E, S\} \quad (6)$$

其中， $\eta = (c/4\pi f_c)^2$ ， c 为光速， f_c 为载波频率， $d_X = \sqrt{x_X^2 + y_X^2 + H^2}$ 为UAV-X链路的距离， θ_X 和 ϕ_X 分别表示UAV-X链路的实际俯仰角和方位角， $\mathbf{a}(\theta_X, \phi_X) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为天线阵列方向矢量，可以表示为^[16]：

$$\mathbf{a}(\theta_X, \phi_X) = \left[1, \dots, e^{j\pi \sin \theta_X [(n_x - 1) \cos \phi_X + (n_y - 1) \sin \phi_X]}, \dots, e^{j\pi \sin \theta_X [(N_x - 1) \cos \phi_X + (N_y - 1) \sin \phi_X]} \right]^T \quad (7)$$

其中， n_x 和 n_y 分别为均匀平面阵列中沿 x 轴和 y 轴方向的索引序号。受UAV机体抖动影响，俯仰角和方位角的实际值与估计值之间存在着角度误差，可建模为^[16]：

$$\theta_X = \bar{\theta}_X + \Delta\theta_X \text{ 和 } \phi_X = \bar{\phi}_X + \Delta\phi_X \quad (8a)$$

$$\Delta\theta_X^2 + \Delta\phi_X^2 \leq \epsilon_X^2 \quad (8b)$$

其中， $\bar{\theta}_X$ 和 $\bar{\phi}_X$ 分别为俯仰角和方位角估计值， ϵ_X 为角度误差值上限。

令 $Q(t)$ ， $A(t)$ 和 $R_G(t)$ 分别表示UAV机载数据队列在时刻 t 的数据积压量，到达量和发送量，则UAV数据队列的更新公式可表示为^[7]：

$$Q(t+1) = [Q(t) - R_G^{\text{wc}}(t), 0]^+ + A(t) \quad (9)$$

其中， $R_G^{\text{wc}}(t) = \min_{\Delta\theta_G(t), \Delta\phi_G(t)} R_G(t)$ 。由于数据到达量 $A(t)$ 的随机性和突发性，为保证UAV-ISAC系统作业期间通信的稳定性，队列的长时隙平均期望须满足如下约束^[7]：

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbb{E}[Q(t)] < \infty \quad (10)$$

其中， $\sup(\cdot)$ 表示队列平均期望值的最小上界。在队列稳定性约束下，UAV-ISAC系统的长时隙平均发射功率可表示为：

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\|\mathbf{w}_c(t)\|_2^2 + \|\mathbf{w}_s(t)\|_2^2 |Q(t) \right) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{w}_c(t)$ 和 $\mathbf{w}_s(t)$ 分别为时刻 t 的通信和感知 BF 向量。基于公式(10)和(11), 队列稳定性约束下的 UAV-ISAC 系统鲁棒安全优化问题可表示为:

$$\text{P1: } \min_{\mathbf{w}_c(t), \mathbf{w}_s(t)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\|\mathbf{w}_c(t)\|_2^2 + \|\mathbf{w}_s(t)\|_2^2 |Q(t) \right) \quad (12a)$$

$$\text{s.t. } \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbb{E}[Q(t)] < \infty \quad (12b)$$

$$\min_{\Delta\theta_{\{G,E\}}, \Delta\phi_{\{G,E\}}} R_{\text{sec}}(t) \geq R_{\text{sec}}^{\text{th}}, \forall t \quad (12c)$$

$$\min_{\Delta\theta_s, \Delta\phi_s} G_{S,k}(t) \geq \eta\Gamma, \forall k, t \quad (12d)$$

$$\|\mathbf{w}_c(t)\|_2^2 + \|\mathbf{w}_s(t)\|_2^2 \leq P_T^{\text{max}}, \forall t \quad (12e)$$

其中, $R_{\text{sec}}(t)$ 和 $G_{S,k}(t)$ 分别为时刻 t 的 GU 可达安全速率和采样点 S_k 波束增益, $R_{\text{sec}}^{\text{th}}$ 为 GU 的可达安全速率阈值, Γ 为 SA 的波束增益阈值, P_T^{max} 为 UAV 最大发射功率。

优化问题(P1)中包含有长时隙优化目标(12a)和队列稳定性约束(12b), 且约束条件(12c)和(12d)受 $A(t)$ 与 $(\Delta\theta, \Delta\phi)$ 的不确定性影响呈现非凸特性, 导致该优化问题难以直接求解。

3 基于Lyapunov优化框架的鲁棒安全波束成形算法设计

为求解优化问题(P1), 首先基于Lyapunov优化框架将长时隙随机性优化问题转化为前后时隙关联的短时隙优化问题; 其次, 针对任意短时隙中 UAV 机体抖动导致的通信链路角度误差, 通过将不确定优化问题转换为确定性优化问题对 BF 进行迭代求解。

3.1 基于Lyapunov的问题转化

首先, 为衡量队列 $Q(t)$ 的积压程度, 定义如下 Lyapunov 函数^[7]:

$$\mathcal{L}(Q(t)) = \frac{1}{2} Q(t)^2 \quad (13)$$

式(13)中 $\mathcal{L}(Q(t))$ 为非负且呈二次增长, 其值越大表示队列积压越严重。其次, 引入Lyapunov漂移用于评估队列在连续两个时隙之间的变化, 即:

$$\Delta Q(t) = \mathbb{E}[\mathcal{L}(Q(t+1)) - \mathcal{L}(Q(t)) | Q(t)] \quad (14)$$

由于 $\Delta Q(t)$ 难以获得闭式解, 可通过分析 $\Delta Q(t)$ 的上界对队列 $Q(t)$ 的稳定性进行评估。设 R_G^{max} 和

A^{max} 分别为用户通信速率 $R_G(t)$ 和数据到达量 $A(t)$ 的最大值, 可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta Q(t) &= \frac{1}{2} \mathbb{E} \left[\left([Q(t) - R_G^{\text{wc}}(t), 0]^+ + A(t) \right)^2 - Q(t)^2 | Q(t) \right] \\ &\leq \frac{1}{2} \mathbb{E} \left[(Q(t) + A(t) - R_G^{\text{wc}}(t))^2 - Q(t)^2 | Q(t) \right] \\ &\leq \frac{1}{2} \left((R_G^{\text{max}})^2 + (A^{\text{max}})^2 \right) + Q(t) A^{\text{max}} - Q(t) \mathbb{E}[R_G^{\text{wc}}(t) | Q(t)] \end{aligned} \quad (15)$$

因此, $\Delta Q(t)$ 的上界可表示为:

$$\Delta Q^{\text{up}}(t) = \bar{D} - Q(t) \mathbb{E}[R_G^{\text{wc}}(t) | Q(t)] \quad (16)$$

其中, $\bar{D} = \left((R_G^{\text{max}})^2 + (A^{\text{max}})^2 \right) / 2 + Q(t) A^{\text{max}}$ 。为在最小化长时隙发射功率的同时保障队列的稳定性, 可采用惩罚函数方法将优化问题(P1)的目标函数重新表示为:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left\{ \Delta Q^{\text{up}}(t) + V \mathbb{E} \left[\left(\|\mathbf{w}_c(t)\|_2^2 + \|\mathbf{w}_s(t)\|_2^2 \right) | Q(t) \right] \right\} \quad (17)$$

其中, V 为惩罚系数, 可作为权重在优化过程中调节发射功率与队列稳定性的重要度。

基于Lyapunov优化思想, 对于目标函数(17)中长时隙期望的处理可采用机会期望最小化方法, 即将长时隙优化问题转化为一系列前后时隙相互关联的短时隙序列优化问题^[7,8]。具体而言, 基于公式(9)对任意时隙 t 队列积压量 $Q(t)$ 的更新, 可通过优化 $\mathbf{w}_c(t)$ 和 $\mathbf{w}_s(t)$ 动态调整数据发送量 $R_G(t)$, 以实现队列稳定。因此, 优化问题(P1)可转换为一系列短时隙序列优化问题, 即:

$$\text{P2: } \min_{\mathbf{w}_c(t), \mathbf{w}_s(t)} V \left(\|\mathbf{w}_c(t)\|_2^2 + \|\mathbf{w}_s(t)\|_2^2 \right) - Q(t) R_G^{\text{wc}}(t) \quad (18a)$$

$$\text{s.t. } (12c) - (12e) \quad (18b)$$

其中, \bar{D} 为常数在目标函数中可忽略。

3.2 鲁棒安全波束成形设计

针对优化问题(P2), 为简化表达, 其求解过程将省略时间索引 t 。定义 $\mathbf{W}_c = \mathbf{w}_c \mathbf{w}_c^H$ 和 $\mathbf{W}_s = \mathbf{w}_s \mathbf{w}_s^H$, 并引入 \mathbf{W}_c 和 \mathbf{W}_s 的秩一约束, 可将优化问题(P2)等价转换为:

$$\begin{aligned} \text{P3: } &\min_{\mathbf{W}_c \succeq \mathbf{0}, \mathbf{W}_s \succeq \mathbf{0}} V (\text{Tr}(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s)) \\ &- Q \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\min_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_c \mathbf{a}_G}{\max_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_s \mathbf{a}_G + 1} \right) \right\} \end{aligned} \quad (19a)$$

$$\begin{aligned} & \text{s.t.} \log_2 \left(1 + \frac{\min_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_c \mathbf{a}_G}{\max_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_s \mathbf{a}_G + 1} \right) \\ & - \log_2 \left(1 + \frac{\max_{\Delta\theta_{E,m}, \Delta\phi_{E,m}} L_{E,m} \mathbf{a}_{E,m}^H \mathbf{W}_c \mathbf{a}_{E,m}}{\min_{\Delta\theta_{E,m}, \Delta\phi_{E,m}} L_{E,m} \mathbf{a}_{E,m}^H \mathbf{W}_s \mathbf{a}_{E,m} + 1} \right) \\ & \geq R_{\text{sec}}^{\text{th}}, \forall m \end{aligned} \quad (19b)$$

$$\min_{\Delta\theta_{S,k}, \Delta\phi_{S,k}} \mathbf{a}_{S,k}^H (\mathbf{W}_c + \mathbf{W}_s) \mathbf{a}_{S,k} \geq d_{S,k}^2 \Gamma, \forall k \quad (19c)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s) \leq P_T^{\text{max}} \quad (19d)$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_c) = 1, \text{rank}(\mathbf{W}_s) = 1 \quad (19e)$$

其中, $L_X = \eta d_X^{-2} / \sigma_X^2$, $X \in \{G, E\}$ 。由于优化问题(P3)包含不确定性误差($\Delta\theta, \Delta\phi$), 可引入非负辅助变量 $\{a, b, d, f, g\}$ 将优化问题(P3)转换为:

$$\text{P4:} \quad \min_{\substack{\mathbf{W}_c \succeq \mathbf{0}, \mathbf{W}_s \succeq \mathbf{0} \\ a \geq 0, b \geq 0, d \geq 0, f \geq 0, g \geq 0}} V(\text{Tr}(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s)) - Qa \quad (20a)$$

$$\text{s.t.} \quad \ln \left(1 + \frac{b}{1+d} \right) \geq a \ln 2 \quad (20b)$$

$$a \ln 2 - \ln \left(1 + \frac{f}{1+g} \right) \geq R_{\text{sec}}^{\text{th}} \ln 2 \quad (20c)$$

$$\min_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_c \mathbf{a}_G \geq b \quad (20d)$$

$$\max_{\Delta\theta_G, \Delta\phi_G} L_G \mathbf{a}_G^H \mathbf{W}_s \mathbf{a}_G \leq d \quad (20e)$$

$$\max_{\Delta\theta_{E,m}, \Delta\phi_{E,m}} L_{E,m} \mathbf{a}_{E,m}^H \mathbf{W}_c \mathbf{a}_{E,m} \leq f, \forall m \quad (20f)$$

$$\max_{\Delta\theta_{E,m}, \Delta\phi_{E,m}} L_{E,m} \mathbf{a}_{E,m}^H \mathbf{W}_s \mathbf{a}_{E,m} \geq g, \forall m \quad (20g)$$

$$(19c) - (19e) \quad (20h)$$

其中, a 为所有角度误差情况下的GU的可达速率最小值, b 和 d 分别为任意角度误差情况下GU接收到的有用信号功率最小值和干扰功率最大值, f 和 g 分别为任意角度误差情况下EVE接收到的有用信号功率的最大值和干扰功率的最小值。

对于公式(20b), 由于其分式形式难以处理, 可转换为以下形式:

$$\ln(1+b+d) - \ln(1+d) \geq a \ln 2 \quad (21)$$

在可行点 \bar{d} 处对 $\ln(1+d)$ 进行一阶泰勒展开, 可以得到:

$$\ln(1+d) \leq \ln(1+\bar{d}) + \frac{d-\bar{d}}{1+\bar{d}} \triangleq \Phi_1(d|\bar{d}) \quad (22)$$

将公式(22)代入公式(21), 可得:

$$\ln(1+b+d) - \Phi_1(d|\bar{d}) \geq a \ln 2 \quad (23)$$

同理, 对于非凸约束(20c)可转换为如以下形式:

$$\Phi_1(f+g|\bar{f}+\bar{g}) - \ln(1+g) \leq (a - R_{\text{sec}}^{\text{th}}) \ln 2 \quad (24)$$

对于不确定性约束(19c), 采用二阶泰勒展开, 可将其近似表示为^[16]:

$$\Delta \mathbf{e}_{S,k}^T \mathbf{U}_{S,k}^+ \Delta \mathbf{e}_{S,k} + 2\mathbf{v}_{S,k}^+ \Delta \mathbf{e}_{S,k} + r_{S,k}^+ \geq d_{S,k}^2 \Gamma, \forall \Delta \mathbf{e}_{S,k} \quad (25)$$

其中, $\Delta \mathbf{e}_{S,k} = [\Delta\theta_{S,k}, \Delta\phi_{S,k}]^T$, $\mathbf{U}_{S,k}^+ = (\boldsymbol{\mu}_{S,k}^{12})^T L(\mathbf{A}_{S,k}^+)$
 $\boldsymbol{\mu}_{S,k}^{12} + \mathbf{Q}_{S,k}^+$, $\mathbf{v}_{S,k}^+ = f(\mathbf{B}_{S,k}^+)^T \boldsymbol{\mu}_{S,k}^{12}$, $r_{S,k}^+ = \sum_{i,j} [\mathbf{Z}_{S,k}^+]_{i,j}$
 $\boldsymbol{\mu}_{S,k}^{12} = [\boldsymbol{\mu}_{S,k}^1, \boldsymbol{\mu}_{S,k}^2]$, $\mathbf{Q}_{S,k}^+ = f(\mathbf{B}_{S,k}^+)^T$
 $(\boldsymbol{\mu}_{S,k}^3 \mathbf{J}_2 - \boldsymbol{\mu}_{S,k}^0 \mathbf{I}_2)$, $\mathbf{J}_2 = [0, 1; 1, 0]$, $\mathbf{A}_{S,k}^+ = \text{Re}(\mathbf{Z}_{S,k}^+)$,
 $\mathbf{B}_{S,k}^+ = \text{Im}(\mathbf{Z}_{S,k}^+)$, $\mathbf{Z}_{S,k}^+ = (\mathbf{W}_c + \mathbf{W}_s) \odot (\mathbf{m}_{S,k} \mathbf{m}_{S,k}^H)$,
 $\mathbf{m}_{S,k} = \exp(-j\boldsymbol{\mu}_{S,k}^0)$, $[\boldsymbol{\mu}_{S,k}^0]_n = \pi \sin \bar{\theta}_{S,k} (\alpha_n \cos \bar{\varphi}_{S,k} + \beta_n \sin \bar{\varphi}_{S,k})$,
 $[\boldsymbol{\mu}_{S,k}^1]_n = \pi \cos \bar{\theta}_{S,k} (\alpha_n \cos \bar{\varphi}_{S,k} + \beta_n \sin \bar{\varphi}_{S,k})$,
 $[\boldsymbol{\mu}_{S,k}^2]_n = \pi \sin \bar{\theta}_{S,k} (\beta_n \cos \bar{\varphi}_{S,k} - \alpha_n \sin \bar{\varphi}_{S,k})$,
 $[\boldsymbol{\mu}_{S,k}^3]_n = \pi \cos \bar{\theta}_{S,k} (\beta_n \cos \bar{\varphi}_{S,k} - \alpha_n \sin \bar{\varphi}_{S,k})$, $\alpha_n = \lfloor (n-1)/N_x \rfloor$,
 $\beta_n = \lfloor (n-1)/N_y \rfloor$ 。此外, $L(\mathbf{X})$ 和 $f(\mathbf{Y})$ 定义如下:

$$[L(\mathbf{X})]_{i,j} = \begin{cases} [\mathbf{X}]_{i,j} - [f(\mathbf{X})]_i, & i = j \\ [\mathbf{X}]_{i,j}, & i \neq j \end{cases} \quad (26a)$$

$$[f(\mathbf{Y})]_i = \sum_l [\mathbf{Y}]_{i,l} \quad (26b)$$

对于公式(25), 基于误差上界约束(8b), 可采用S-Procedure方法^[18]将其转换为可处理的确定性线性矩阵不等式形式, 即:

$$\begin{bmatrix} \delta_{S,k}^+ \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_{S,k}^+ & (\mathbf{v}_{S,k}^+)^T \\ \mathbf{v}_{S,k}^+ & r_{S,k}^+ - d_{S,k}^2 \Gamma - \delta_{S,k}^+ \varepsilon_{S,k}^2 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}_3, \forall k \quad (27)$$

其中, $\delta_{S,k}^+ \geq 0$ 。同理, 对于公式(20d)-(20g), 可分别转换为:

$$\begin{bmatrix} \delta_G^c \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_G^c & (\mathbf{v}_G^c)^T \\ \mathbf{v}_G^c & r_G^c - bL_G^{-1} - \delta_G^c \varepsilon_G^2 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}_3 \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_G^s \mathbf{I}_2 - \mathbf{U}_G^s & -(\mathbf{v}_G^s)^T \\ -\mathbf{v}_G^s & dL_G^{-1} - r_G^s - \delta_G^s \varepsilon_G^2 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}_3 \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{E,m}^c \mathbf{I}_2 - \mathbf{U}_{E,m}^c & -(\mathbf{v}_{E,m}^c)^T \\ -\mathbf{v}_{E,m}^c & fL_{E,m}^{-1} - r_{E,m}^c - \delta_{E,m}^c \varepsilon_{E,m}^2 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}_3, \forall m \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_{E,m}^s \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_{E,m}^s & (\mathbf{v}_{E,m}^s)^T \\ \mathbf{v}_{E,m}^s & r_{E,m}^s - gL_{E,m}^{-1} - \delta_{E,m}^s \varepsilon_{E,m}^2 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}_3, \forall m \quad (31)$$

其中, $\delta_G^c \geq 0$, $\delta_G^s \geq 0$, $\delta_{E,m}^c \geq 0$, $\delta_{E,m}^s \geq 0$ 。

对于非凸秩一约束(19e), 可采用基于惩罚函数的连续凸逼近方法处理^[16]。令 $\lambda(\mathbf{W})$ 为 \mathbf{W} 的最大特征值, 由于 $\text{rank}(\mathbf{W}) = 1$ 与 $\text{Tr}(\mathbf{W}) - \lambda(\mathbf{W}) = 0$ 等价, 可将 $\text{Tr}(\mathbf{W}) - \lambda(\mathbf{W})$ 作为惩罚项加入到目标函数中, 将原优化问题(P4)的目标函数(20a)可转换为:

$$V(\text{Tr}(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s)) - Qa + \rho(\text{Tr}(\mathbf{W}_c) - \lambda(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s) - \lambda(\mathbf{W}_s)) \quad (32)$$

其中, $\rho \geq 1$ 为惩罚系数。由于 $\lambda(\mathbf{W})$ 非凸, 对其进行一阶泰勒展开可以得到:

$$\lambda(\mathbf{W}) \geq \lambda(\overline{\mathbf{W}}) + \text{Tr}(\mu(\overline{\mathbf{W}})\mu^H(\overline{\mathbf{W}})(\mathbf{W} - \overline{\mathbf{W}})) \triangleq \Phi_2(\mathbf{W}|\overline{\mathbf{W}}) \quad (33)$$

其中, $\mu(\overline{\mathbf{W}})$ 是可行解 $\overline{\mathbf{W}}$ 最大特征值所对应的特征向量。

将公式(33)代入(32), 并利用约束条件近似结果(23), (24)和(27)–(31), 原优化问题(P4)可转换为如下凸优化问题:

$$\text{P5: } \min_{\substack{\mathbf{W}_c \succeq \mathbf{0}, \mathbf{W}_s \succeq \mathbf{0} \\ a \geq 0, b \geq 0, d \geq 0, f \geq 0, g \geq 0}} V(\text{Tr}(\mathbf{W}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s)) - Qa + \rho\Omega(\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s, \overline{\mathbf{W}}_c, \overline{\mathbf{W}}_s) \quad (34a)$$

$$\text{s.t. (19d), (23), (24), (27) - (31)} \quad (34b)$$

其中, $\Omega(\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_s, \overline{\mathbf{W}}_c, \overline{\mathbf{W}}_s) = \text{Tr}(\mathbf{W}_c) - \Phi_2(\mathbf{W}_c|\overline{\mathbf{W}}_c) + \text{Tr}(\mathbf{W}_s) - \Phi_2(\mathbf{W}_s|\overline{\mathbf{W}}_s)$ 。

3.3 优化算法设计

基于提出的Lyapunov优化框架与鲁棒安全BF优化方法, 优化问题(P1)的求解可转换为时序连续求解问题, 具体算法流程如表1所示。

4 仿真结果与分析

仿真实验中, GU坐标为(0,200)m, 两个EVE坐标分别为(-200,-100)m和(-100,-200)m, SA为以(200,-200)m为圆心50 m为半径的圆形区域。此外, 数据到达量 $A(t)$ 服从泊松分布^[7], 即 $A(t) \sim \text{Poisson}(\lambda)$, 其中 λ 为平均数据到达量。除另有说明外, 其它仿真参数设置如表2所示。

图2为所提鲁棒安全BF算法下UAV发射功率收敛图。从图中可看出所提算法在经过大约5次迭代后即可趋于稳定, 表明所提算法具有较好的收敛性。此外, UAV发射功率随着天线数量 N 的增加而降低, 这是因为在满足安全速率和感知阈值的约束条件下, 更多的天线可提供更丰富的自由度, 使得发射波束更窄, 能量更加集中, 进而降低发射功率并获得更好的传输性能。

图3给出了所提算法的通信和感知波束增益图。从图3(a)可看出, 通信波束在GU和SA处均具有较高增益, 而在EVE处形成不低于-30 dB的零陷区域, 表明通信波束可辅助感知波束对SA区域进行协同感知。在图3(b)中, 感知波束在SA和EVE处均具有较高增益, 而在GU处形成了不低于-50 dB的零陷区域, 这是因为在安全容量的约束下, 可利用感知波束对EVE产生辅助干扰, 进而抑制窃听性能。

图4给出了所提算法的UAV发射功率随安全速率阈值变化的趋势图。从图中可以看出, 随着对系统安全性能 $R_{\text{sec}}^{\text{th}}$ 和感知波束增益阈值 Γ 的提升, UAV发射功率也随之增加。此外, 随着角度误差 ε 的增

表1 鲁棒安全波束成形算法

- (1) 初始化队列积压量 $Q(0)$ 和可行初始点 $(\mathbf{W}_c(0), \mathbf{W}_s(0))$ 。
- (2) 根据 $\mathbf{W}_c(0)$ 和 $\mathbf{W}_s(0)$ 计算 $R_G(0)$, 并设置 $t = 1$ 。
- (3) While $t \leq T$:
- (4) $t = t + 1$;
- (5) 获取 $A(t-1)$, 并依据公式(9)更新 $Q(t)$;
- (6) 设置时隙 t 的初始点 $(\overline{\mathbf{W}}_c^0, \overline{\mathbf{W}}_s^0) = (\mathbf{W}_c(t-1), \mathbf{W}_s(t-1))$ 和 $i = 0$;
- (7) do:
- (8) $i = i + 1$;
- (9) 求解优化问题(P5), 获得最优解 $(\overline{\mathbf{W}}_c^i, \overline{\mathbf{W}}_s^i)$;
- (10) While $\|\overline{\mathbf{W}}_c^i - \overline{\mathbf{W}}_c^{i-1}\| + \|\overline{\mathbf{W}}_s^i - \overline{\mathbf{W}}_s^{i-1}\| \rightarrow 0$
- (11) 更新 $(\mathbf{W}_c(t), \mathbf{W}_s(t)) = (\overline{\mathbf{W}}_c^i, \overline{\mathbf{W}}_s^i)$;
- (12) 根据 $\mathbf{W}_c(t)$ 和 $\mathbf{W}_s(t)$ 计算 $R_G(t)$;
- (13) end

表2 仿真参数

参数名称	符号	数值	参数名称	符号	数值
天线数量	N	3×3	平均数据到达量	λ	10
无人机高度	H	100 m ^[13]	安全速率阈值	$R_{\text{sec}}^{\text{th}}$	3 bps/Hz
噪声功率	σ^2	-110 dBm ^[12]	感知波束增益阈值	Γ	-30 dBm ^[12]
载波频率	f_c	20 GHz ^[20]	发射功率上限	P_T^{max}	30 dBm
感知区域采样点数	K	9	总时隙	T	2000
抖动误差界限	ε	3° ^[15]	Lyapunov权重参数	V	20

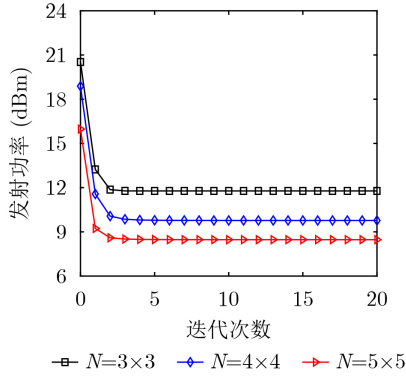


图2 鲁棒安全波束成形算法收敛图

加，UAV需要分配更多的功率来抵消角度误差的影响，迫使发射功率提升。

为了验证所提算法的通感一体化性能，引入通感分离方案作为对比基准。该方案中通信波束仅执行通信任务，感知波束仅执行感知任务，即公式(3)中忽略感知波束 w_s 且公式(5)中忽略通信波束 w_c 。本文所提通感一体方案与通感分离方案的性能对比如图5所示。从图中可得，通感一体和通感分离方案的发射功率均随安全速率阈值 R_{sec}^{th} 的增加而提升，

且在不同感知阈值 Γ 下，通感一体方案所需发射功率始终低于通感分离方案。这是因为通感分离方案中，通信波束与感知波束无法实现相互辅助。相比而言，通感一体方案则因波束的双功能特性，即通信波束可为感知目标区域提供额外感知增益，而感知波束则可通过在窃听方向上形成高增益对EVE形成辅助干扰，可有效降低系统整体的功率消耗。

图6给出了角度误差 ε 为 3° 和 6° 时，所提鲁棒方案与非鲁棒方案的安全速率概率分布直方图。从图中可得，鲁棒方案确保了所有安全速率 R_{sec} 均高于安全速率阈值 R_{sec}^{th} 。相比之下，非鲁棒方案中存在着 R_{sec} 低于 R_{sec}^{th} 的情况，且随着 ε 从 3° 增大到 6° ，性能呈现恶化趋势。这表明，在存在角度误差的情况下，所提鲁棒方案始终能满足系统安全性能要求，且呈现出较好的鲁棒性能。

图7给出了长时隙平均发射功率和平均队列积压随权重参数 V 的变化趋势。从图中可以看出，随着 V 的增加，系统长时隙平均发射功率呈现下降趋势，而平均队列积压与之呈现相反的变化趋势。这是因为 V 取值较小时，系统更倾向于保持传输队列

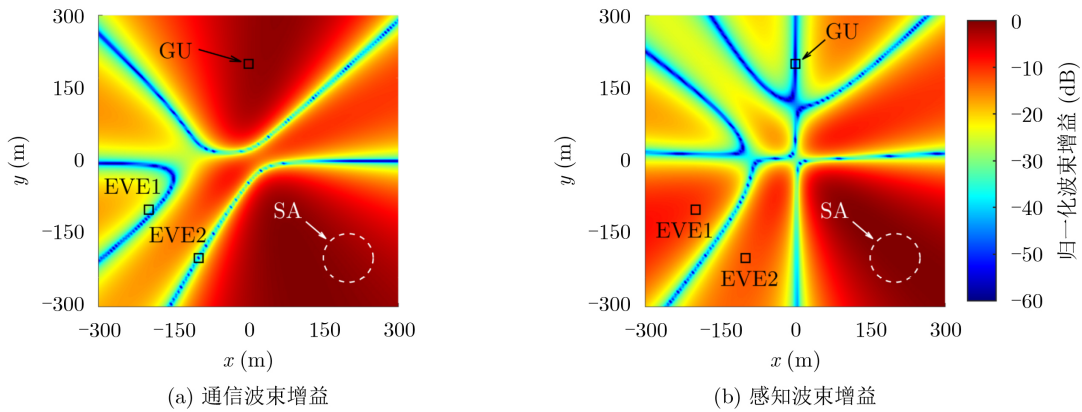


图3 通信波束增益图和感知波束增益图

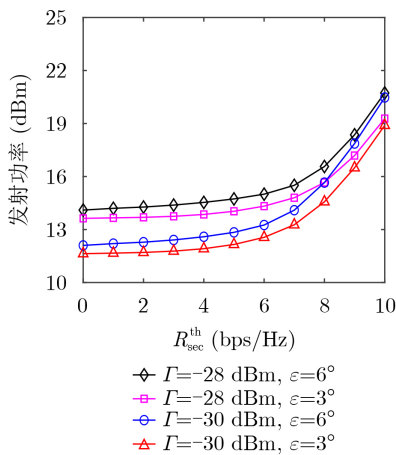


图4 安全速率阈值与发射功率关系图

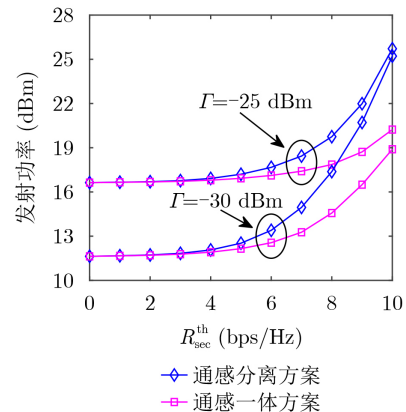


图5 通感一体方案和通感分离方案性能对比图

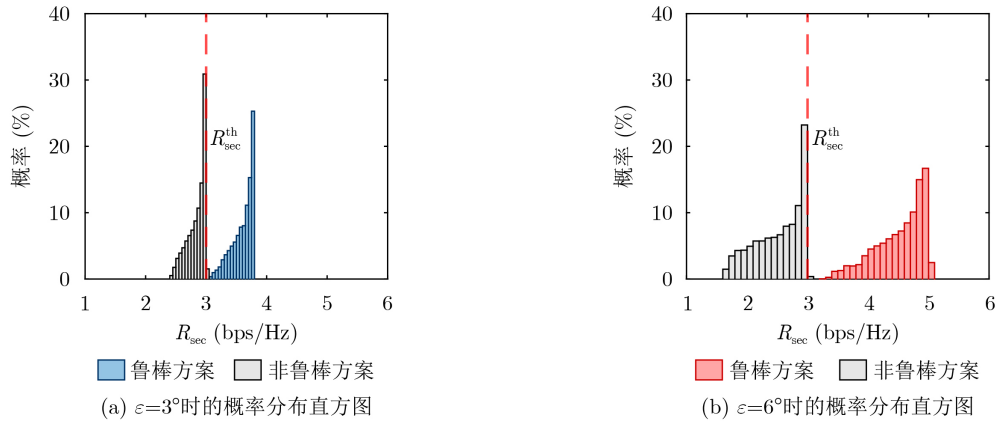


图 6 不同角度误差下安全速率概率分布直方图

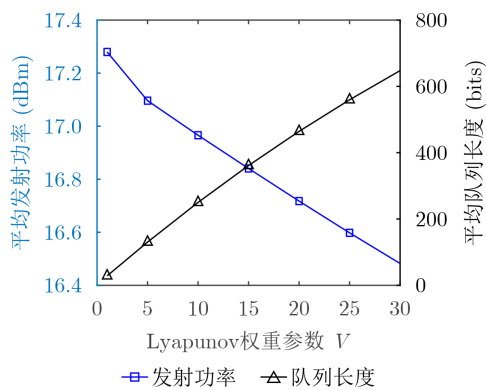


图 7 平均发射功率和平均队列积压与V的关系图

的稳定性, 通过提升发射功率增加数据发送量, 进而缓解队列积压程度。但当 V 较大时, 系统则更倾向于降低发射功率, 导致队列积压的加剧。

图8为不同平均数据到达率 λ 下发射功率随时隙 t 的动态变化趋势。图中的无队列方案在 $\lambda = 8$ 时发射功率随时隙 t 呈现出剧烈波动, 这是因为在没有队列的情况下, 系统需在各时隙将到达的数据即时传输至用户, 进而使得发射功率随数据量的随机到达呈现出显著的波动。相比而言, 有队列方案在 $\lambda = 8$ 和 $\lambda = 10$ 时均可在 $t = 1000$ 时达到发射功率的稳定, 表明本文所提算法可有效保障UAV下行通信的稳定性。

图9给出了UAV机载数据队列平均排队时延随权重参数 V 的变化趋势图。平均排队时延定义为^[10]:

$\lim_{T \rightarrow \infty} (\sum_{t=1}^T Q(t)) / \lim_{T \rightarrow \infty} (\sum_{t=1}^T A(t))$, 可衡量 V 对数据队列排队时延的影响。从图中可得, 平均排队时延随 V 的增大呈单调递增趋势。这是因为 V 越大, 系统越侧重降低发射功率, 导致队列积压加剧, 进而排队时延上升。另一方面, 对于相同 V 值, 平均数据到达量 λ 取值越大, 对应的平均排队时延越高。这是因为单位时隙内到达的数据量越多, 队列积压的累积速度越快, 排队时延也随之增加。

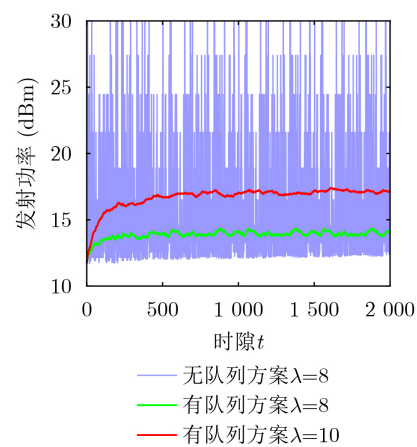


图 8 长时隙下发射功率随动态变化图

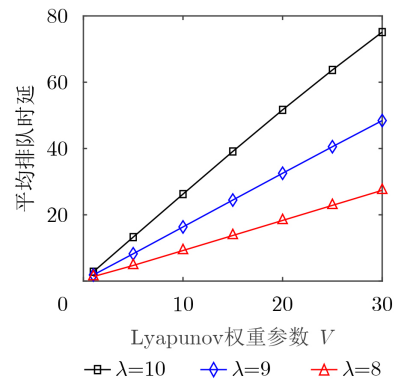


图 9 平均排队时延随权重参数V的变化图

5 结论

本文针对队列稳定性约束下的UAV-ISAC鲁棒安全BF方法开展研究。首先, 基于Lyapunov优化框架将长时隙随机性优化问题转化为前后时隙关联的短时隙优化问题。其次, 针对UAV机体抖动问题, 采用STSE近似处理抖动角度误差, 并利用S-Procedure方法将非凸约束转化为易于处理的线性矩阵不等式形式。最后, 提出了一种基于惩罚逐次凸逼近的鲁棒安全BF优化算法, 对短时隙确定性

优化问题进行高效迭代求解。仿真结果表明所提方案可有效解决数据到达量随机、UAV机体抖动、以及非法窃听威胁等挑战，保障了低空UAV-ISAC系统下行数据传输的稳定性与安全性。

参 考 文 献

- [1] WANG Yixian, SUN Geng, SUN Zemin, *et al.* Toward realization of low-altitude economy networks: Core architecture, integrated technologies, and future directions[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(5): 2788–2820. doi: [10.1109/TCCN.2025.3601015](https://doi.org/10.1109/TCCN.2025.3601015).
- [2] 钱志鸿, 王义君. 低空经济赋能者: 智能无人机技术体系综述与展望[J]. *电子与信息学报*, 2026, 48(1): 1–33. doi: [10.11999/JEIT251246](https://doi.org/10.11999/JEIT251246).
QIAN Zhihong and WANG Yijun. Intelligent unmanned aerial vehicles for low-altitude economy: A review of the technology framework and future prospects[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2026, 48(1): 1–33. doi: [10.11999/JEIT251246](https://doi.org/10.11999/JEIT251246).
- [3] JIANG Yihang, LI Xiaoyang, ZHU Guangxu, *et al.* Integrated sensing and communication for low altitude economy: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2025, 63(12): 72–78. doi: [10.1109/MCOM.001.2400685](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2400685).
- [4] 朱政宇, 温鑫平, 李兴旺, 等. 面向低空经济的通感一体化关键技术[J]. *电子与信息学报*, 2026, 48(2): 471–486. doi: [10.11999/JEIT250747](https://doi.org/10.11999/JEIT250747).
ZHU Zhengyu, WEN Xinpeng, LI Xingwang, *et al.* An overview on integrated sensing and communication for low altitude economy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2026, 48(2): 471–486. doi: [10.11999/JEIT250747](https://doi.org/10.11999/JEIT250747).
- [5] PENG Guangqian, ZHANG Ningbo, CHEN Hao, *et al.* Energy-efficient-aware RSMA-enabled UAV-ISAC[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2026, 15: 1380–1384. doi: [10.1109/LWC.2025.3647149](https://doi.org/10.1109/LWC.2025.3647149).
- [6] GOU Haosong, ZHAO Siyu, RAO Yunbo, *et al.* Energy-efficient trajectory design and resource allocation for multi-drone-enabled ISAC in IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2026, 72(1): 1672–1684. doi: [10.1109/TCE.2025.3631745](https://doi.org/10.1109/TCE.2025.3631745).
- [7] ZHOU Yuyan, LIU Yang, WU Qingqing, *et al.* Queueing aware power minimization for wireless communication aided by double-faced active RIS[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(10): 5799–5813. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3293858](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3293858).
- [8] WANG Xue, WANG Ying, ZHAO Jianguo, *et al.* Joint long-term user scheduling and beamforming design for burst IIoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(12): 22628–22642. doi: [10.1109/JIOT.2024.3382738](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3382738).
- [9] SHENG Zhichao, HU Hao, NASIR A A, *et al.* Online Trajectory planning and resource allocation of UAV-enabled MEC networks empowered by RIS[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025, 9(3): 1224–1238. doi: [10.1109/TGCN.2024.3503687](https://doi.org/10.1109/TGCN.2024.3503687).
- [10] QIN Peng, FU Yang, YU Zhigang, *et al.* URLLC-aware trajectory plan and beamforming design for NOMA-aided UAV integrated sensing, communication, and computation networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(1): 1610–1625. doi: [10.1109/TVT.2024.3460813](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3460813).
- [11] 朱政宇, 杨晨一, 李铮, 等. 智能反射面辅助通感一体化系统安全资源分配算法[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(1): 66–74. doi: [10.11999/JEIT240083](https://doi.org/10.11999/JEIT240083).
ZHU Zhengyu, YANG Chenyi, LI Zheng, *et al.* Resource allocation algorithm for intelligent reflecting surface-assisted secure integrated sensing and communications system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(1): 66–74. doi: [10.11999/JEIT240083](https://doi.org/10.11999/JEIT240083).
- [12] DENG Dan, ZHOU Wen, LI Xingwang, *et al.* Joint beamforming and UAV trajectory optimization for covert communications in ISAC networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(2): 1016–1030. doi: [10.1109/TWC.2024.3503726](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3503726).
- [13] GAO Ruifeng, CHEN Ying, HU Yingdong, *et al.* Towards UAV aerial base station networking robustness: A jitter-aware antenna selection perspective[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(10): 15866–15871. doi: [10.1109/TVT.2024.3399309](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3399309).
- [14] CHENG Tianhao, WANG Buhong, CAO Kunrui, *et al.* Aerial IRS-assisted secure SWIPT system with UAV jitter[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024, 8(4): 1530–1544. doi: [10.1109/TGCN.2024.3366539](https://doi.org/10.1109/TGCN.2024.3366539).
- [15] OUYANG Jian, LU Yuting, LIU Chengyang, *et al.* Robust beamforming for uplink RSMA in UAV communication systems with jittering[J]. *IEEE Communications Letters*, 2025, 29(4): 769–773. doi: [10.1109/LCOMM.2025.3543284](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2025.3543284).
- [16] OUYANG Jian, DING Jing, WANG Runan, *et al.* Robust secrecy-energy efficient beamforming for jittering UAV in cognitive satellite-aerial networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(4): 9567–9583. doi: [10.1109/TAES.2025.3552313](https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3552313).
- [17] ZHANG Yu, CHEN Jiachi, ZHONG Caijun, *et al.* Active

- IRS-assisted integrated sensing and communication in C-RAN[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(3): 411–415. doi: [10.1109/LWC.2022.3228405](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3228405).
- [18] XU Dongfang, SUN Yan, NG D W K, *et al.* Multiuser MISO UAV communications in uncertain environments with no-fly zones: Robust trajectory and resource allocation design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5): 3153–3172. doi: [10.1109/TCOMM.2020.2970043](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2970043).
- [19] WANG Kunyu, SO A M C, CHANG T H, *et al.* Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: Tractable approximations by conic optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(21): 5690–5705. doi: [10.1109/TSP.2014.2354312](https://doi.org/10.1109/TSP.2014.2354312).
- [20] XU Yu, ZHANG Tiankui, LIU Yuanwei, *et al.* UAV-enabled integrated sensing, computing, and communication: A fundamental trade-off[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(5): 843–847. doi: [10.1109/LWC.2023.3245728](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3245728).
- 欧阳键: 男, 副教授, 研究方向为无人机通信系统、智能信号处理、医学信号处理等。
- 任伟: 男, 硕士生, 研究方向为无人机通信系统、通感一体化技术等。
- 许拔: 男, 副研究员, 研究方向为无线通信、信号处理等。
- 刘笑宇: 男, 讲师, 研究方向为空地一体化网络中的优化设计与性能分析等。
- 蒋万沐: 男, 硕士生, 研究方向为无人机通信系统、深度学习等。
- 责任编辑: 廖海贝

Queue Stability Constrained Robust Secure Beamforming for Low-Altitude UAV-ISAC Systems

OUYANG Jian^{①②} REN Wei^① XU Ba^③ LIU Xiaoyu^① JIANG Wanmu^①

^①(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Key Laboratory of Intelligent Support Technology for Complex Environments, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

^③(Sixty-third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract:

Objective To address the challenges of antenna array angle errors caused by UAV jitter, transmission instability induced by random data arrivals, and secure transmission guarantee in multi-eavesdropper scenarios for low-altitude UAV-ISAC systems, this paper proposes a robust secure beamforming algorithm based on queue stability constraints. The proposed algorithms aims to minimize long-term transmit power consumption while maintaining data queue stability while enhancing beamforming robustness against UAV jitter.

Methods To guarantee the stability of the wireless transmission in UAV-ISAC systems, this paper formulates an optimization problem aimed at minimizing the long-term average transmit power, subject to constraints on data queue stability, secure communication rate, sensing performance, and maximum transmit power. Since this long-term optimization problem is intractable, the Lyapunov optimization framework is employed to transform it into a sequence of short-term subproblems. To handle the antenna array angle errors caused by UAV jitter within each short slot, we jointly adopt the second-order Taylor series expansion and the S-Procedure method to approximate the short-term subproblem into a convex form. Consequently, a robust secure beamforming algorithm based on penalty successive convex approximation optimization is proposed.

Results and Discussions Simulation results demonstrate the impact of the number of antennas, secrecy rate threshold, beam gain threshold, UAV jitter error, and Lyapunov weight factor on the system transmit power. As illustrated by the beam gain pattern in Fig. 3, the communication beamformer facilitates cooperative sensing toward the sensing area, while the sensing beamformer enhances system security by directing interference toward potential eavesdroppers. This validates the effectiveness of the proposed algorithm in simultaneously improving sensing and secure communication performance. Furthermore, leveraging the dual-function

characteristics of the communication and sensing beamformers, the proposed integrated sensing and communication scheme achieves significantly higher resource utilization efficiency than the communication-only and sensing-only schemes, as shown in Fig. 5. Additionally, Fig. 6 indicates that, compared with the non-robust scheme, the proposed robust scheme strictly satisfies security requirements under various angle errors. Finally, Fig. 8 shows that the proposed queue-aware scheme can effectively suppress the transmit power fluctuations caused by random data arrivals, exhibiting superior stability compared to the queue-free baseline.

Conclusions This paper investigates a robust secure beamforming method for UAV-ISAC systems subject to queue stability constraints. First, based on the Lyapunov optimization framework, the long-term stochastic optimization problem is transformed into a sequence of short-term subproblems. Second, to address the issue of UAV jitter, the second-order Taylor series expansion and the S-Procedure method are jointly employed to approximate the non-convex constraints into tractable convex forms. Finally, a robust secure BF optimization algorithm based on penalty successive convex approximation is proposed to efficiently solve the deterministic short-term subproblems. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can effectively tackle the challenges posed by random data arrivals, UAV jitter, and eavesdropping threats, thereby ensuring the stability and security of downlink data transmission in low-altitude UAV-ISAC systems.

Key words: UAV; ISAC; Queue stability; Lyapunov optimization; Robust secure beamforming