

低空 UAV 集群 MIMO-OTFS-NOMA 通感控一体化系统及其关键技术研究

李劲夫¹, 鲁佳星¹, 邹应全¹, 黄 翀², 王千里¹, 陈高洁², 范平志^{1*}

(1. 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川成都 611756; 2. 中山大学柔性电子学院, 广东深圳 518107)

摘 要: 针对低空无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)集群在高速移动及复杂多径环境下, 双选信道效应使通信链路距离/速度等参数估计性能受限, 同时远距离信息交互进一步带来可靠性下降与通-感-控闭环稳定性难题, 提出一种 MIMO-OTFS 通感控一体化系统框架。该框架利用正交时频空间(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)在时延-多普勒(Delay-Doppler, DD)域的准静态表征能力, 提升双选信道下的稳健传输与距离/速度等参数估计性能; 结合多输入多输出技术(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)与功率域非正交多址接入技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)实现集群规模接入与频谱复用。进一步地, 构建 DD 域微多普勒结构化映射的物理层身份感知机制, 将旋翼微多普勒作为“指纹”实现感知过程中的目标身份关联, 为密集/交叉航迹条件下的鲁棒跟踪与协同控制提供可靠索引; 同时, 针对 UAV 集群上行回传链路, 引入功率域 NOMA 传输机制, 构建主 UAV 全频复用与从 UAV 分频接入的叠加传输架构, 将复杂集群干扰解耦为若干并行的双用户 NOMA 模型, 进一步设计基于消息传递算法与串行干扰消除的联合检测结构, 有效地抑制若干个主 UAV 与从 UAV 的通信对回传所造成的用户间干扰, 保障空地链路的传输可靠性。在此基础上, 利用感知获得的距离/速度与微多普勒特征身份关联结果构建感知辅助的协同轨迹控制闭环, 实现“通-感-控”一体化流程贯通。结果表明, 与正交频分复用-非正交多址接入方案相比, 所提方案在高移动双选信道中有约 7 dB 的误码率性能增益; 感知侧可实现距离/速度等参数的稳定估计, 其精度变化趋势与克拉美-罗界分析一致; 在闭环协同验证中, 基于感知反馈的 UAV 集群实现了三维编队轨迹跟踪, 四架从 UAV 在持续机动巡航过程中的协同位置均方根误差分别控制在 0.13、0.15、0.19、0.23 m, 相对误差未出现发散, 在仿真层面上初步验证了所提方案在“通-感-控”一体化流程中的闭环稳定性。

关键词: 通感控一体化系统; 正交时频空间调制; 微多普勒特征识别; 非正交多址接入; 控制补偿机制

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2682025CX035); 国家自然科学基金(No.62501498, No.62301455, No.U23A20274)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)06-2609-14

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20260145

Integrated Sensing-Communication-Control System for Low-Altitude UAVs: A MIMO-OTFS-NOMA Framework and Key Enabling Techniques

LI Jingfu¹, LU Jiaying¹, ZOU Yingquan¹, HUANG Chong², WANG Qianli¹, CHEN Gaojie², FAN Pingzhi^{1*}

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;

2. School of Flexible Electronics, Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong 518107, China)

Abstract: Low-altitude unmanned aerial vehicle (UAV) swarms in urban airspace operate over rapidly time-varying multipath channels, where severe Doppler shifts and doubly selective fading can degrade data links, sensing reliability, and closed-loop cooperative control. To address these issues, this paper proposes an integrated sensing-communication-control framework based on MIMO-OTFS-non-orthogonal multiple access. Specifically, orthogonal time frequency space (OTFS) modulation is utilized to provide a quasi-static representation in the delay-Doppler (DD) domain, enhancing robust transmission and parameter estimation (e.g., range and velocity) under doubly selective channels. Simultaneously, multiple-input multiple-output (MIMO) and power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) are combined to achieve massive access and spectral efficiency. Furthermore, we construct a DD-domain micro-Doppler structured-mapping mechanism, where rotor micro-Doppler signatures serve as physical-layer fingerprints for identity association, providing a reliable index for robust tracking and cooperative control under dense or crossing trajectory conditions. For the uplink backhaul, a superposition transmission architecture is designed with full-frequency multiplexing for the master UAV and frequency-division access

for slave UAVs. By decomposing complex cluster interference into parallel two-user NOMA models and applying a joint detection scheme based on the message passing algorithm and successive interference cancellation, the proposed method effectively mitigates inter-user interference, ensuring air-ground link reliability. Finally, a sensing-aided cooperative trajectory control loop is established using the sensed range/velocity and micro-Doppler feature identity association results to realize the integrated sensing-communication-control process. Simulation results demonstrate that the proposed scheme avoids the bit-error-rate floor observed in baselines based on orthogonal frequency division multiplexing and non-orthogonal multiple access, and achieves a signal-to-noise ratio gain of approximately 7 dB. Moreover, the sensing module realizes stable estimation of range and velocity, with accuracy trends consistent with the Cramér-Rao bound analysis. In the closed-loop cooperative validation, the sensing-feedback-based UAV swarm achieves three-dimensional formation trajectory tracking. During continuous maneuvering cruise, the cooperative position root mean square errors of the four slave UAVs are controlled at 0.13, 0.15, 0.19, and 0.23 m, respectively, and the relative errors do not diverge. This preliminarily verifies the closed-loop stability of the proposed scheme in the integrated sensing-communication-control process at the simulation level.

Keywords: integrated sensing-communication-control system; orthogonal time frequency spatial modulation; Micro-Doppler feature recognition; non-orthogonal multiple access; control compensation mechanism

Foundation Item(s): Basic Research Funding for Central Universities (No.2682025CX035); National Natural Science Foundation of China (No.62501498, No.62301455, No.U23A20274)

0 引言

随着“低空经济”被正式纳入国家战略性新兴产业发展规划,低空空域的开发与利用逐渐成为新一轮科技创新和产业升级的重要发展方向。作为低空经济的核心载体,低空无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)正从单一的独立工作模式向规模化、网络化和智能化的集群协同作业形态演进。UAV 集群凭借其低成本、高机动性和较强的任务适应能力,在智慧物流、应急救援、低空安防巡检和环境监测等多个领域展现出广阔的应用前景。然而,随着低空空域飞行密度的持续增长,UAV 集群的运行规模与协同复杂度显著提升。在城市复杂传播环境和网络拓扑结构频繁变化的条件下,UAV 集群更加依赖高时效性的实时通信与精确的环境感知,以支撑安全飞行、协同作业以及低空空域的有效管控。

通感一体化(Integrated Sensing And Communication, ISAC)技术被视为 6G 网络关键赋能技术之一^[1-3]。ISAC 通过共享频谱、硬件平台与信号处理模块,在提升频谱效率的同时显著降低了系统成本与设备体积,这对于功耗与载荷受限的 UAV 平台尤为重要^[4]。目前的 ISAC 研究主要集中在波形设计、波束成形及信号处理算法等方面。例如,Liu 等人^[5]综述了通感一体化的基础理论边界与关键技术;Zhang 等人^[6]探讨了大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达与通信的信号处理技术;Meng 等人^[7]则专门分析了 UAV 赋能的 ISAC 系统在机会与挑战方面的最新进展。然而,在低空 UAV 集群的高速移动场景下,传统的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)波形面临着严重的多普勒频移挑战,导致子载波间干扰破坏通

信链路的稳定性与感知的准确性^[8]。此外,UAV 集群在复杂环境下的高频次协同操作,对底层信道编码机制与高可靠低时延通信(Ultra-Reliable and Low-Latency Communications, URLLC)能力提出了极其严苛的要求^[9]。

在高移动性场景中,正交时频空间技术(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制技术因其在时延-多普勒(Delay-Doppler, DD)域的抗多普勒能力而备受关注^[10]。Yuan 等人^[11]指出,OTFS 将时变多径信道转换为 DD 域的二维时不变稀疏信道,天然契合高动态 UAV 通信需求。同时基于 OTFS 的 ISAC 系统研究已取得初步成果。Li 等人^[12]提出了基于空间扩展 OTFS 的 ISAC 传输框架;Keskin 等人^[13]深入研究了 MIMO-OTFS 中的通感一体化设计,利用符号间干扰和载波间干扰进行高精度的感知参数估计与多路复用;Xiang 等人^[14]则针对高移动性网络,提出了基于三维运动预测拓扑的 NOMA 辅助 OTFS-ISAC 网络鲁棒设计方案。此外,Shi 等人^[15]利用 OTFS-ISAC 辅助用户状态精细化。OTFS 在保障高速移动 UAV 的通信可靠性与感知分辨率方面具有显著优势,但多用户场景下的波形设计与资源分配仍需进一步探索^[16]。在多用户接入方面,面对 UAV 集群的海量连接需求,非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)技术通过功率域复用,能够显著提升系统容量与连接数。Mu 等人^[17]深入分析了 NOMA 在 ISAC 系统中的多址接入前景,指出 NOMA 与 ISAC 的结合可有效提升频谱效率。Zhou 等人^[18]研究了 NOMA-ISAC 赋能的 UAV 网络中的联合聚类与功率分配问题;Eslami 等人^[19]则在可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)辅助的 UAV-NOMA 网络

中提出了分层资源优化方案。在此基础上, Li 等人^[20]进一步引入 UAV 搭载 RIS(UAV-RIS)辅助干扰管理, 针对空天地一体化网络中不同信道状态信息(Channel State Information, CSI)条件提出了干扰对齐与波束成形设计, 并深入分析了系统的自由度(Degrees of Freedom, DoF)增益。同时, 为了克服空天地网络中机载平台的宽带数据回传瓶颈, 毫米波辅助机载激光通信等异构融合传输机制也成为提升容量的重要手段^[21]。此外, 针对空天地网络中受限的链路预算与传输时延挑战, Huang 等人^[22]探索了语义通信在资源管控中的应用, 提出了一种混合比特与生成式语义通信的资源分配框架, 利用深度强化学习算法, 在动态网络环境下实现了图像传输重建质量与时延的有效权衡。然而, 在高动态环境下, 如何联合优化 UAV 轨迹、功率分配以及波束成形以最大化通感性能, 仍是一个复杂的非凸优化问题^[23]。

在低空 UAV 集群场景下 MIMO-OTFS-NOMA 融合系统的研究相对较少。现有的 UAV 轨迹与资源分配研究大多假设信道状态信息完美或处于准静态环境^[24-27]。例如, Wu 等人^[28]研究了 RIS 辅助 UAV-ISAC 系统的联合轨迹与资源设计; Gao 等人^[29]利用多智能体强化学习(Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL)优化了 ISAC 系统的 UAV 轨迹; Zhang 等人^[30]探讨了动态约束下的发射功率与轨迹联合优化。尽管这些工作为 UAV 网络优化提供了理论基础, 但在 MIMO-OTFS 架构下, 如何利用 DD 域信道稀疏性进行高效的通感资源管控, 并结合 NOMA 技术处理簇内干扰, 仍面临巨大挑战^[31-34]。

针对上述问题, 本文充分考虑 UAV 集群中感知与控制任务的空间部署特性以及旋翼微多普勒的判别信息, 提出一种面向低空 UAV 集群的 MIMO-OTFS-NOMA 通感一体化系统方案。在有限无线资源条件下, 所提方案实现了高精度感知、可靠通信与精准控制的协同保障。本文的主要贡献与工作如下:

(1) 设计面向低空 UAV 集群场景的 MIMO-OTFS 通感一体化系统架构, 通过在集群中引入主 UAV 节点, 将原本由地面基站承担的感知与控制功能前移至空中侧, 在缩短感知链路距离的同时充分利用 OTFS 在延迟-多普勒域的高分辨特性, 实现对 UAV 目标距离、速度及微动特征的高精度感知。

(2) 提出一种基于 OTFS DD 域微多普勒特征的 UAV 物理层身份感知机制, 通过刻画旋翼微动特征在 DD 域中的结构化映射关系, 将微多普勒特征作为 UAV 的“物理层指纹”, 使主 UAV 在感知过程中即可完成目标身份关联, 避免了传统通信帧级身份标识的开销, 从而有效节约无线带宽并降低多目标关联

误差。

(3) 进一步地, 针对 UAV 集群与地面基站的远距离上行回传链路, 采用 OTFS-NOMA 传输机制: 通过构建主 UAV 全频复用与从 UAV 分频接入的叠加传输架构, 将复杂集群干扰解耦为若干并行的双用户 NOMA 模型; 在接收端设计基于消息传递算法(Message-Passing Algorithm, MPA)与串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)的联合检测结构, 有效抑制上行回传链路的用户间干扰, 在不影响集群内通感与控制闭环的前提下, 实现有限频谱条件下的可靠空地回传。

(4) 最后, 提出面向 MIMO-OTFS-NOMA 系统的控制补偿机制。利用主 UAV 在 DD 域获取的距离/速度信息与微多普勒“物理层指纹”, 构建目标身份关联的优化模型, 实现密集/交叉航迹下的鲁棒关联。在闭环反馈下, 通过驱动 UAV 集群协同轨迹控制, 抑制阵风扰动、机动变化与测量噪声引起的轨迹偏差。

1 系统模型

针对所提出的 MIMO-OTFS-NOMA 通感一体化系统, 本章将进行统一建模与性能分析, 从低空 UAV 集群的物理传播特性出发, 构建面向高速移动与复杂多径环境的系统模型。

1.1 低空 UAV 信道表征与双选信道模型

不同于地面低速用户场景, 低空 UAV 通信与感知系统面临由高速机动与复杂空域散射环境共同导致的显著时频变化特性。UAV 通信链路除视距(Line-of-Sight, LoS)分量外, 还受到地面建筑物、地形以及其他飞行器反射与散射的影响。在时域上, 多径传播效应表现为时间色散(多径时延); 在频域上, 因 UAV 的高速移动以及周围散射体的相对运动, 信号会产生严重的多普勒频移, 导致频率色散。因此, 低空 UAV 信道往往呈现出显著的“双选”特性, 即频率选择性衰落和时间选择性衰落同时存在。

为了准确描述这种信道, 首先从线性时变系统的角度出发。在线性时变信道中, 输入信号 $x(t)$ 与输出信号 $y(t)$ 的关系可以通过时变脉冲响应 $g(\tau, t)$ 来描述, 输入输出关系可采用卷积运算表征, 如式(1)所示:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau, t)x(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

其中, τ 代表多径时延。由于 $g(\tau, t)$ 会伴随时间 t 快速波动, 该模型在高速移动场景下难以直接处理。

为了获得在高速移动条件下具有准静态结构的等效信道表示, 将信道表征从时延-时间域转换到 DD 域。首先对 $g(\tau, t)$ 关于时间变量 t 进行傅里叶变换, 引入多普勒频移变量 ν 。DD 域的信道扩展函数表示为

$$h(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau, t) e^{-j2\pi\nu t} dt \quad (2)$$

在物理传播环境中, 散射体数量通常是有限的, 每一条有效传播路径可由其传播距离(对应时延 τ_i)与相对径向速度(对应多普勒频移 ν_i)表征。因此, 在延迟-多普勒域中, 信道表现出极强的稀疏性。对于包含 P 条路径的低空 UAV 信道, 其 DD 域响应建模为一组狄拉克冲激函数的加权叠加:

$$h(\tau, \nu) = \sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(\nu - \nu_i) \quad (3)$$

其中, h_i 是第 i 条路径的复增益, τ_i 和 ν_i 分别为该路径对应的时延与多普勒频移, $\delta(\cdot)$ 代表狄拉克函数。将式(3)代入信道的逆变换关系, 得到时变冲激响应:

$$\begin{aligned} g(\tau, t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau, \nu) e^{j2\pi\nu t} d\nu \\ &= \sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) e^{j2\pi\nu_i t} \end{aligned} \quad (4)$$

进一步代入式(1), 可得时域接收信号:

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) e^{j2\pi\nu_i t} \right) x(t - \tau) d\tau \\ &= \sum_{i=1}^P h_i e^{j2\pi\nu_i t} x(t - \tau_i) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)表明, 在低空 UAV 双选信道中, 接收信号可视为多个经由不同时延 τ_i 和多普勒调制 $e^{j2\pi\nu_i t}$ 的发射信号副本的叠加。

1.2 MIMO-OTFS 传输模型

由于低空 UAV 信道具有显著的时延多普勒双选特性, 传统基于时频正交性的 MIMO-OFDM 调制在高速移动场景下面临严重的正交性破坏与性能退化, 难以满足低空通感一体化系统对高可靠通信与高精度感知的联合需求。为了克服这一物理层瓶颈, 本节引入 DD 域的 OTFS 调制, 以在双选信道下获得更加稳定的等效信道表征, 同时为进一步满足 UAV 集群的大容量通信与高分辨率感知需求, 将 OTFS 与 MIMO 技术相结合构建 MIMO-OTFS 传输模型。

假设 OTFS 信号在时频 (Time-Frequency, TF) 域上占据时长 $T_f = NT$ 和带宽 $B = M\Delta f$, 其中 N 表示时间维符号数, M 表示频率维子载波数, T 为符号周期, Δf 为子载波间隔并满足正交性条件 $T\Delta f = 1$ 。对应的 DD 域信号空间可离散化为 $N \times M$ 的二维网格 A_{DD} :

$$A_{DD} = \left\{ \left(\frac{k}{NT}, \frac{l}{M\Delta f} \right) \mid k=0, 1, \dots, N-1; l=0, 1, \dots, M-1 \right\} \quad (6)$$

其中, k 为多普勒索引, l 为时延索引。设 $x[k, l]$ 为放置在 DD 域网格上的 QAM 调制符号, 则 OTFS 通过逆辛有限傅里叶变换 (Inverse Symplectic Finite Fourier

Transform, ISFFT) 将 DD 域符号映射为 TF 域符号:

$$\begin{aligned} X[n, m] &= \text{ISFFT} \{ x[k, l] \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} x[k, l] e^{j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, n 和 m 分别为时间与频率索引。式(7)表明, ISFFT 等效于对多普勒维进行逆离散傅里叶变换, 同时对时延维进行离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT), 从而实现 DD 域与 TF 域之间的双向映射。

获得 TF 域信号 $X[n, m]$ 后, 利用海森堡变换将其转换为连续时间发射信号:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[n, m] g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi m \Delta f (t - nT)} \quad (8)$$

其中, $g_{tx}(t)$ 为发射脉冲。当接收端接收到时域信号 $r(t)$, 对其进行匹配滤波, 即利用接收脉冲 $g_{rx}(t)$ 将信号转换回 TF 域得到 $Y[n, m]$:

$$Y[n, m] = \int r(t) g_{rx}^*(t - nT) e^{-j2\pi m \Delta f (t - nT)} dt \quad (9)$$

再通过辛有限傅里叶变换 (Symplectic Finite Fourier Transform, SFFT) 将信号从 TF 域恢复至 DD 域, 得到估计符号:

$$\begin{aligned} \hat{x}[k, l] &= \text{SFFT} \{ Y[n, m] \} \\ &= \frac{1}{\sqrt{NM}} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} Y[n, m] e^{-j2\pi \left(\frac{nk}{N} - \frac{ml}{M} \right)} \end{aligned} \quad (10)$$

联立式(7)~(10)并代入式(5), 在理想脉冲条件下可以推导出 DD 域的输入输出关系为二维循环卷积形式:

$$\hat{x}[k, l] = \sum_{k'=0}^{N-1} \sum_{l'=0}^{M-1} h_w[k', l'] x[(k - k')_N, (l - l')_M] + w[k, l] \quad (11)$$

其中, $(\cdot)_N$ 表示模 N 运算, $w[k, l]$ 为噪声项, h_w 为包含脉冲成型影响的有效 DD 域信道增益。

为进一步利用空间自由度提升低空 UAV 双选信道下的链路可靠性与分辨能力, 将 SISO-OTFS 模型推广至多天线场景, 构建 MIMO-OTFS 传输模型。设 $\mathbf{x}[k, l] \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ 为 DD 域网格点 (k, l) 上的发射信号向量, 发射端采用预编码矩阵 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_s \times N_s}$ 来优化波束指向, 其中 N_s 为数据流数。预编码后的信号为 $\hat{\mathbf{x}}[k, l] = \mathbf{W} \mathbf{x}[k, l]$ 。为便于系统分析与算法设计, 下文给出 MIMO-OTFS 的矩阵表示形式。将所有天线的 DD 域数据按帧堆叠为矩阵 $\mathbf{X}_{DD} \in \mathbb{C}^{NM \times N_s}$, MIMO-OTFS 的发射信号向量 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{NMN_s \times 1}$ 表示为

$$\mathbf{s} = \left(\mathbf{I}_{N_s} \otimes (\mathbf{G}_{tx} \mathbf{F}_M^H \mathbf{F}_N) \right) \text{vec}(\mathbf{X}_{DD}) \quad (12)$$

其中, $\otimes$ 表示克罗内克积, $\mathbf{G}_{tx}$ 为脉冲成型矩阵, $\mathbf{F}_M$ 和 $\mathbf{F}_N$ 分别为 M 点和 N 点的 DFT 矩阵。

在接收端,第 q 根接收天线收到的 DD 域信号 $y_q[k, l]$ 是所有 N_t 根发射天线信号经过各自 DD 域信道卷积后的叠加。MIMO-OTFS 的 DD 域输入输出关系描述为

$$y[k, l] = \sum_{k'=0}^{N-1} \sum_{l'=0}^{M-1} \mathbf{H}[k', l'] \mathbf{x}[(k-k')_N, (l-l')_M] + \mathbf{z}[k, l] \quad (13)$$

其中, $\mathbf{y}[k, l] \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 是接收信号向量, $\mathbf{z}[k, l]$ 是噪声向量, $\mathbf{H}[k', l'] \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 是对应于时延抽头 l' 和多普勒抽头 k' 的 MIMO 信道矩阵。为了进一步简化分析,利用 DD 域信道的稀疏性,将式 (13) 写成块矩阵形式。定义接收向量 $\mathbf{y}_{\text{vec}} = \text{vec}(\mathbf{Y}_{\text{DD}})$ 和发射向量 $\mathbf{x}_{\text{vec}} = \text{vec}(\mathbf{X}_{\text{DD}})$, 则系统方程为

$$\mathbf{y}_{\text{vec}} = \mathbf{H}_{\text{eff}} \mathbf{x}_{\text{vec}} + \mathbf{z}_{\text{vec}} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 是块循环矩阵,其结构由 DD 域信道响应 $\mathbf{H}[k', l']$ 决定。

1.3 MIMO-OTFS-NOMA 系统

虽然 MIMO-OTFS 有效解决了高速移动下的可靠性问题,但面对 UAV 集群海量的接入节点与有限的频谱资源之间的矛盾,系统仍难以满足协同控制的实时性要求。为了解决这个问题,本文构建了一种由地面基站 (Ground Base Station, GBS) 与 UAV 集群 (包含 1 架主 UAV 和 K 架从 UAV) 构成的通感一体化架构。

为了避免时分轮询带来的控制滞后,系统在总带宽分配层面上采用频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 策略,将总带宽划分为多个正交的子频带,每个子频带专属分配给特定的“主-从无人机”配对使用,以并行传输机制确保集群内所有节点状态能被同时交互。在此分层带宽划分的基础上,针对每个专属子频带内部进一步引入功率域 NOMA 技术,形成连贯的通-感-控闭环框架。低空 UAV 集群的 MIMO-OTFS-NOMA 通感一体化框架如图 1 所示。

在该架构中,主 UAV 作为空中核心节点,首先通过下行 NOMA 将发送给不同从 UAV 的控制指令在 DD 域进行功率域叠加并向从 UAV 并发传输控制信息;与此同时,主 UAV 在发射通信信号时同步接收被从 UAV 反射的回波信号,利用自干扰抵消技术提取雷达分量,在空中侧直接执行并完成对覆盖范围内各从 UAV 的高精度位置与状态感知;最后,在完成集群内部任务后,主 UAV 和从 UAV 通过上行 NOMA 向 GBS 并发传输信息,即信道条件较优的主 UAV 与处于边缘的从 UAV 在同一子频带的 DD 域资源块上进行功率叠加,主 UAV 负责回传获取的从 UAV 感知状态,而从 UAV 共享该频率资源回传自身采集的环境感知信息,GBS 端再利用串行干扰消除 (SIC) 技术进行分离解码,从而在有限频谱下实现了高可靠的空地协同与远距离回传。这种设计将传统由 GBS 承担的

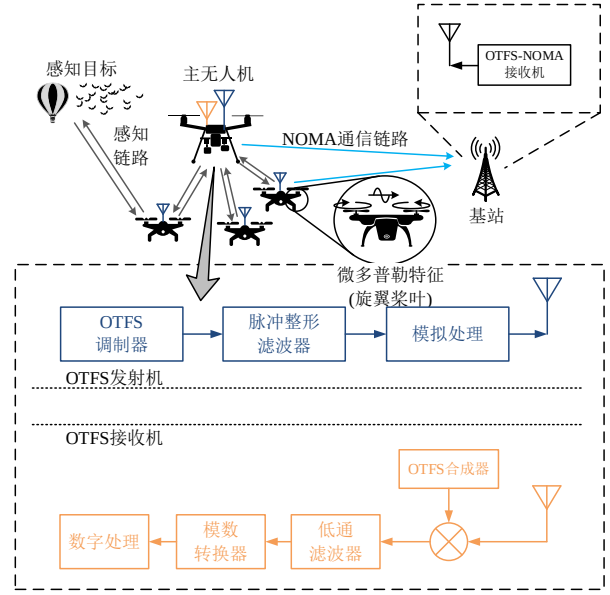


图 1 低空 UAV 集群的 MIMO-OTFS-NOMA 通感一体化框架

Figure 1 MIMO-OTFS-NOMA ISAC framework for UAV swarms

高负荷通感任务前移至空中侧,有效利用了 LoS 链路优势,规避了城市复杂多径对感知精度的干扰。

考虑主 UAV U_m 与 K 架从 UAV $U_{s,i}$ 组成的集群内部,采用基于 DD 域的 MIMO-OTFS-NOMA 协议进行下行控制指令传输和上行数据上报。设 U_m 位于坐标原点,第 i 架从 UAV $U_{s,i}$ 的三维坐标为 $\mathbf{q}_{s,i}(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)]^T$ 。在下行链路中, U_m 将发送给不同从 UAV 的符号 $x_{s,i}[k, l]$ 在 DD 域进行功率域叠加。叠加信号 $\mathbf{X}_{\text{DD}}[k, l]$ 可表示为

$$\mathbf{X}_{\text{DD}}[k, l] = \sum_{i=1}^K \sqrt{P_{s,i}} \mathbf{w}_{s,i} x_{s,i}[k, l] \quad (15)$$

其中, $P_{s,i}$ 为分配给第 i 架从 UAV 的发射功率, $\mathbf{w}_{s,i} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为对应的预编码向量。主 UAV U_m 在发射信号的同时接收被从 UAV 反射的回波。由于 U_m 预知自身的下行通信信号,利用自干扰抵消技术提取雷达分量,得到第 i 个从 UAV 反射的回波在 DD 域的响应遵循二维卷积:

$$y_e[k, l] = \sum_{i=1}^K \zeta_i \mathbf{H}_{e,i} \mathbf{X}_{\text{DD}}[(k-k_i)_N, (l-l_i)_M] + \mathbf{V}_n \quad (16)$$

其中, ζ_i 是包含雷达散射截面积的反射系数, k_i 和 l_i 分别对应 $U_{s,i}$ 相对于 U_m 的径向速度和距离偏移抽头, $\mathbf{V}_n$ 为噪声。

在完成集群内部的感知与控制任务后, UAV 集群需通过回传链路将数据上报至 GBS。在这一过程中,为了进一步提升频谱利用效率并保障“通-感-控”闭环的实时性,回传链路在每个 FDMA 子频带内构建双用户 NOMA 上行链路。具体而言,针对第 k 个子频带,存在两个待回传的信息流:一是主 UAV 利用雷达

感知获得的该从 UAV 的运动状态信息(如位置、速度等);二是该从 UAV 利用自身传感器采集的周围环境感知信息。由于主 UAV 通常具有更好的信道条件(强用户),而从 UAV 位于边缘或受限位置(弱用户),两者通过差异化的功率分配在同一 DD 域资源块上进行叠加。回传信号为

$$y = h_{\text{master}} \sqrt{P_{\text{master}}} x_{\text{master}} + h_{\text{slave}} \sqrt{P_{\text{slave}}} x_{\text{slave}} + n \quad (17)$$

其中: y 为 GBS 侧的接收信号;主 UAV 回传的信息流(从 UAV 的运动状态)与从 UAV 回传的信息流(环境感知信息)分别记为 x_{master} 和 x_{slave} ;其对应的发射功率分配因子分别记为 P_{master} 和 P_{slave} ; h_{master} 和 h_{slave} 分别为主 UAV 和从 UAV 到 GBS 的等效信道增益; n 为系统加性高斯白噪声。功率分配方案依据任务的紧急程度进行动态调整,确保时效性极强的感知数据(即占主导功率的 x_{master})能够在 GBS 侧获得优先解码保障。

考虑到 GBS 接收到的回传信号受到严重的多径衰落与多普勒频移影响,系统在 GBS 接收端执行 SFFT 变换将信号从时频域恢复至 DD 域。在此基础上,利用 SIC 技术对叠加信号进行剥离。解码过程依据主、从 UAV 信号分量的等效信道增益进行排序,对于第 i 个待解码分量,其信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)定义为

$$\gamma_i[k, l] = \frac{P_i |h_i[k, l]|^2}{\sum_{j=i+1}^{I_{\text{total}}} P_j |h_j[k, l]|^2 + \sigma^2} \quad (18)$$

其中, $h_i[k, l]$ 为 DD 域下的准静态等效信道增益。由于 OTFS 调制将复杂的快时变信道转化为 DD 域内稀疏且稳定的表征, SIC 的解码顺序在 UAV 高速移动过程中能够保持较高的稳定性,有效规避了传统 OFDM 方案中因信道正交性破坏而导致的解码失效。

在这种框架下,感知结果不仅用于环境监测,更能实时辅助主 UAV 优化 NOMA 功率分配系数与飞行轨迹规划,从而在确保集群安全间距的前提下,最大化空地链路的整体吞吐量与感知分辨率。

2 基于旋翼微多普勒的通感一体化设计

MIMO-OTFS-NOMA 系统将 GBS 承担的感知功能前移至空中侧,有效缩短了感知链路距离并提升了信号分辨能力。在此基础上,本章进一步提出基于旋翼微多普勒特征的通感一体化设计,将 OTFS 信号在 DD 域中的微多普勒信息作为 UAV 的物理层身份标识,使主 UAV 能够在感知过程中同步完成从 UAV 的监测与身份关联。该机制有效避免了传统通信帧级身份标识所带来的额外开销,进一步改善了多目标关联可靠性和节约无线带宽。

2.1 UAV 旋翼的微动效应

假设 UAV 旋翼由 N_b 个叶片组成,叶片长度为 L ,以角速度 ω 旋转。为了直观描述 UAV 旋翼散射点之间的相对运动关系,建立了如图 2 所示的旋翼几何空间模型。

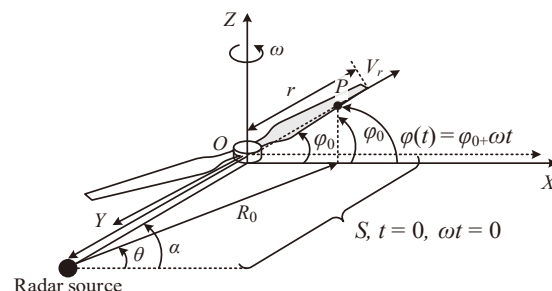


图2 UAV 旋翼几何空间模型

Figure 2 Geometric spatial model of the UAV rotor

设主 UAV 位于笛卡尔坐标系的坐标原点,从 UAV 的旋翼中心 O 距主 UAV 的初始欧式距离为 R_0 ,视线方向与旋翼平面法线的夹角为 θ 。旋翼上第 p 个散射点距旋翼中心的径向距离为 r ,其初始旋转相位为 ϕ_0 ,其瞬时相位函数 $\Phi_p(t)$ 由载波波长 λ 和散射点到雷达的瞬时距离 $R_p(t)$ 共同决定。根据几何投影关系,主 UAV 至从 UAV 旋翼的欧式距离变化为

$$R_p(t) \approx R_0 + r \cos \beta \cos(\omega t + \phi_0) \quad (19)$$

其中, ϕ_0 为初始相位。主 UAV 接收到的回波相位:

$$\begin{aligned} \Phi_p(t) &= \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t) \\ &= \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{4\pi r}{\lambda} \cos \beta \cos(\omega t + \phi_0) \end{aligned} \quad (20)$$

对 $\Phi_p(t)$ 求导,得到瞬时多普勒频移:

$$\begin{aligned} f_D(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_p(t)}{dt} \\ &= -\frac{2\Omega r}{\lambda} \cos \beta \sin(\omega t + \phi_0) \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)表明,微多普勒频移呈正弦规律变化,且幅度与转速 ω 和叶片位置 r 成正比。对于整个叶片,其回波信号是沿叶片长度 L 的积分。设叶片反射系数均匀,单个叶片的回波 $s_{\text{blade}}(t)$ 为

$$s_{\text{blade}}(t) = \int_0^L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r \cos \beta \cos(\omega t) \right\} dr \quad (22)$$

由于回波相位中包含非线性变化的余弦项,利用 Jacobi-Anger 展开式对回波信号中的相位调制项进行展开为

$$e^{-jz \cos \theta} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-j)^n J_n(z) e^{jn\theta} \quad (23)$$

其中, $J_n(\cdot)$ 为第一类贝塞尔函数。总回波信号表示为

一系列边带分量的叠加:

$$s_{\Sigma}(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n e^{j(\omega_c + n\omega)t} \quad (24)$$

这些边带分量在 OTFS 的 DD 域中表现为以主体多普勒为中心,间隔为 ω 的一系列离散峰值,从而形成具有结构化分布特性的微多普勒谱,可被 OTFS 接收机在 DD 域中直接解析并用于 UAV 旋翼特征提取与身份识别。

2.2 微多普勒特征提取

旋翼转动在时域产生相位调制。在 OTFS 的 DD 域中,这种周期性的相位变化表现为多普勒维度上的“弥散”或边带分量,如图 3 所示。

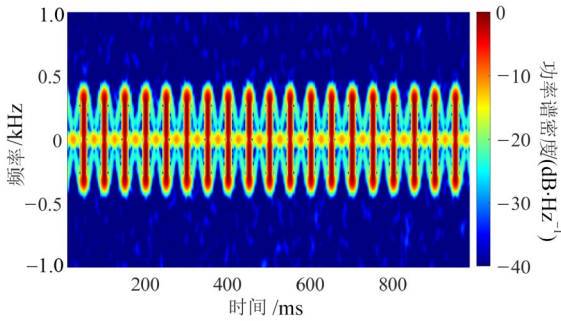


图 3 微多普勒特征分析

Figure 3 Micro-Doppler feature analysis

我们将微动目标的 DD 域响应建模为一系列离散的散射点。对于具有微动的第 i 个无人机目标,其 DD 域接收信号 $y_{\mu D}[k, l]$ 不再是理想的冲激函数,而是主体多普勒 k_i 两侧的一系列旁瓣。根据 Bessel 函数展开,DD 域的微多普勒信号建模为

$$y_{\mu D}[k, l] = \alpha_i \sum_{q=-\infty}^{+\infty} c_q \delta(k - (k_i + q\Delta k_{\Omega}), l - l_i) \quad (25)$$

其中, k_i 是由 UAV 主体径向速度 v_r 引起的多普勒抽头, l_i 是由距离引起的时延抽头。 Δk_{Ω} 是对应于旋翼转速 Ω 的多普勒网格偏移量。系数 c_q 与 Bessel 函数 $J_q(\beta_{\text{mod}})$ 有关, β_{mod} 为调制指数。

式(25)表明,微动目标在 DD 域呈现出特定的结构化特征:在时延轴上集中在 l_i ,但在多普勒轴上以 k_i 为中心呈现多峰分布。这种特征是识别 UAV 的“指纹”。

2.3 基于 DD 域微多普勒特征的物理层身份感知机制

面对低空 UAV 集群的高密度并发接入需求,如何实现快速且低开销的目标身份识别成为关键。传统的身份识别依赖于高层协议的帧头解析(如 MAC 地址),这在海量节点的高频交互中会产生一定的信令开销与处理时延。为此,本节提出一种利用 OTFS 信号在 DD 域中对微动特征的结构化映射机制,将旋

翼产生的微多普勒效应提取为 UAV 的“物理层指纹”,从而在物理层感知阶段同步完成目标的身份关联。

UAV 旋翼的高速旋转会引起雷达回波相位的周期性调制。不同于传统时频分析,OTFS 调制通过 SFFT 将时变信道映射至 DD 域,使得旋翼微动特征呈现出稳定的离散谱结构。假设第 q 架 UAV 的旋翼转速为 Ω_q ,叶片长度为 L_q ,根据 Jacobi-Anger 展开式,其时域非平稳相位变化在 DD 域网格中表现为以主体多普勒为中心的边带分量。第 q 个目标的 DD 域接收信号 $\hat{y}_q[k, l]$ 可建模为

$$\hat{y}_q[k, l] = \alpha_q \sum_{n \in \mathbb{Z}} J_n(\beta_q) \delta[k - k_q - n\Delta k_q, l - l_q] + z[k, l] \quad (26)$$

其中: α_q 为包含路径损耗与雷达散射截面积的复增益; $J_n(\cdot)$ 是第 n 阶第一类贝塞尔函数; β_q 为调制指数; l_q 和 k_q 分别为由 UAV 质心运动产生的时延抽头与主体多普勒抽头。微多普勒边带在多普勒维度上的离散间隔 Δk_q ,其与旋翼物理转速存在确定的映射关系:

$$\Delta k_q = \left\lfloor \frac{\Omega_q}{2\pi} NT \right\rfloor \quad (27)$$

其中, N 为多普勒维度的符号总数, T 为 OTFS 符号周期, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算。式(27)表明,不同 UAV 个体因旋翼转速 Ω_q 的差异,将在 DD 域产生唯一的谱线间隔指纹 Δk_q 。

然而,该“物理层指纹”的身份关联可分辨性受限于 OTFS 系统在 DD 域的内生分辨率限制。理论上,多普勒域的物理分辨率为 $\Delta v = 1/(NT_s)$,时延域的物理分辨率为 $\Delta \tau = 1/B$ (B 为系统总带宽)。为了在物理层实现无模糊的目标身份关联,系统需满足以下可分辨条件:假设两架 UAV 的预设旋翼转速分别为 $f_{\text{rotor},i}$ 和 $f_{\text{rotor},j}$,要使其在多普勒域中可被区分为不同的指纹特征,其转速差带来的多普勒偏移必须大于或等于系统多普勒分辨率,即满足条件 $|f_{\text{rotor},i} - f_{\text{rotor},j}| \geq 1/(NT_s)$ 。

这一条件同时也构成了系统关联的物理限制:当 UAV 集群规模持续扩大,导致分配给单机的预设转速区间极其接近,或单次感知观测时间(即帧长 NT_s)不足以提供足够细的多普勒网格划分时,不同目标的微多普勒指纹将发生多普勒维度的混叠(即映射到相同的多普勒抽头 $\Delta k_i = \Delta k_j$)。此时,系统必须依赖时延域分辨率进行联合分辨(要求两者径向距离差 $\Delta d \geq c/(2B)$,其中 c 为光速)。若在多普勒域与时延域均无法满足上述最小分辨率界限,目标特征将完全重叠,从而导致物理层身份关联失效。

基于上述映射规律与可分辨条件,主 UAV 可利用该物理层指纹实现“感知即识别”。由于 OTFS 将双选信道转化为准静态表征,微多普勒旁瓣在整个帧周期内保持稳定,有效克服了 OFDM 体制下因多普勒频

移波动导致的特征模糊问题。系统首先通过二维恒虚警率检测提取 DD 域内的峰值集合,识别出主体多普勒点 k_q 及其两侧对称分布的微动边带。随后,构建目标身份匹配的优化问题。主 UAV 维护一个包含集群内各从机预设转速特征的指纹库 $\Phi = \{\Omega_1^{\text{ref}}, \Omega_2^{\text{ref}}, \dots, \Omega_K^{\text{ref}}\}$ 。联合考虑目标的运动学状态与微动特征,构建如式(28)的身份关联优化问题:

$$\text{ID}_i^* = \arg \min_j \left\{ w_1 \| \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j^{\text{est}} \|^2 + w_2 \left| \Delta \hat{k}_i - \frac{\Omega_j^{\text{ref}}}{2\pi} NT \right|^2 \right\} \quad (28)$$

其中, $j \in \{1, 2, \dots, K\}$, $\mathbf{p}$ 代表位置与速度向量, w_1, w_2 为权重系数。

通过引入 Δk_q 这一判别特征,即使在多目标空间距离极近或径向速度重叠(即 l 轴或 k 轴重叠)的极端工况下,系统仍能利用旋翼转速的微小差异实现鲁棒的身份区分。该机制避免了传统方案中对通信解码的依赖,在节约无线带宽资源的同时,降低了密集集群环境下的多目标关联误差。

3 基于 NOMA 的远距离回传设计

由于空地回传链路通常面临长距离传输损耗、高速移动带来的多普勒频移挑战以及频谱资源受限的问题,本章提出在 OTFS 调制的 DD 域引入功率域 FDMA-NOMA 的分层多址回传技术。首先利用频分多址划分正交子频带以确保集群回传的实时性,并在每个子频带内利用功率域 NOMA,允许空中节点向 GBS 发送回传数据,然后通过功率域的差异化分配与接收端的 SIC,实现空地链路的远距离回传。

3.1 回传链路的 NOMA 功率域复用机制

在低空 UAV 集群执行通感一体化任务的过程中,高效的空地回传链路是连接空中边缘节点与地面核心网的关键纽带。在 UAV 集群的上行回传阶段,主 UAV 与从 UAV 均作为独立通信用户向 GBS 发送信息。考虑到主 UAV 需要回传集群内所有感知到的从 UAV 运动状态信息,数据吞吐量大,因此需占用整个回传频段以保障传输容量。为了在保障系统可扩展性的同时有效控制干扰复杂度,本节采用功率域 FDMA-NOMA 的分层多址设计:系统首先将回传带宽划分为多个正交子频带,集群内每个从 UAV 占用一个独立的子频带;而主 UAV 则在频域上复用所有子频带,与各个从 UAV 形成并行的传输关系。当主 UAV 与所有从 UAV 同时向基站回传信息时,整个回传场景在物理层上可等效为若干对相互隔离的“主-从无人机”同频干扰链路(即:子频带 1 内的主-从 1、子频带 2 内的主-从 2、...、子频带 K 内的主-从 K)。在此基础上,在每个子频带内引入功率域 NOMA,使处于集

群核心位置、信道条件较优的主 UAV (U_m , 强用户) 与对应的处于边缘或受限位置的从 UAV (U_s , 弱用户) 配对,并在同一时频资源并发回传信息到 GBS。其中,主 UAV 负责回传感知到的从 UAV 运动状态信息,从 UAV 回传其自身采集的周围环境感知信息。通过这种设计,系统在任一子频带内仅存在可控的主-从双用户干扰,GBS 利用 SIC 接收技术能够有效抑制。

OTFS 调制的 DD 域网格上,假设系统总带宽为 B ,包含多个子频带,时延与多普勒网格数分别为 M 和 N , $l \in [0, M-1]$ 和 $k \in [0, N-1]$ 分别表示时延索引与多普勒索引。主 UAV 与从 UAV 在第 (k, l) 个 DD 域网格及第 p 根天线上的发射符号分别为 $x_m[k, l]$ 和 $x_s[k, l]$ 。由于两者共享资源,GBS 接收到的叠加信号 $y_{\text{GBS}}[k, l]$ 可建模为各用户信号经由各自空地双选信道后的线性叠加:

$$y_{\text{GBS}}[k, l] = \sqrt{P_m} \cdot h_m[k, l] * x_m[k, l] + \sqrt{P_s} \cdot h_s[k, l] * x_s[k, l] + z[k, l] \quad (29)$$

其中, P_m 和 P_s 分别为主、从 UAV 的发射功率, h_m 和 h_s 为两者到基站的 DD 域等效信道增益, $*$ 表示二维循环卷积操作, $z[k, l]$ 为加性高斯白噪声。

根据上行 NOMA 协议及信道质量差异(通常 $|h_m|^2 > |h_s|^2$),GBS 采用 SIC 策略。若基站优先解码功率较高(或信道增益较强)的主 UAV 信号 x_m ,则此时将从 UAV 信号 x_s 视为干扰。引入功率分配因子 α ($0 < \alpha \leq 1$),令 $P_m = \alpha P_{\text{total}}$, $P_s = (1 - \alpha) P_{\text{total}}$,其中 P_{total} 为总发射功率。此时,主 UAV 的 SINR 可表示为

$$\gamma_m = \frac{\alpha P_{\text{total}} |h_m|^2}{(1 - \alpha) P_{\text{total}} |h_s|^2 + \sigma^2} \quad (30)$$

其中, $|h_m|^2$ 和 $|h_s|^2$ 分别为 DD 域的有效信道增益模平方, σ^2 为噪声功率。

在基站成功解码并重构主 UAV 信号后,利用 SIC 技术将其从总接收信号中剔除,进而解调从 UAV 信号。执行 SIC 后,此时从 UAV 信号不再受强用户干扰,从 UAV 的信噪比(SNR)为

$$\gamma_s = \frac{(1 - \alpha) P_{\text{total}} |h_s|^2}{\sigma^2} \quad (31)$$

对应的可达速率分别为式(32)和式(33):

$$R_m(\alpha) = B \log_2(1 + \gamma_m) \quad (32)$$

$$R_s(\alpha) = B \log_2(1 + \gamma_s) \quad (33)$$

为了在保障边缘节点(从 UAV)基本服务质量(QoS,即最小速率 R_{req}^s)的前提下,最大化主节点(主 UAV)的高吞吐量回传能力,本文将功率分配因子 α 的求解建模为式(34)的约束优化问题:

$$\begin{aligned} \max \quad & R_m(\alpha) \\ \text{s.t.} \quad & R_s(\alpha) \geq R_{\text{req}}^s, \quad 0 < \alpha \leq 1 \end{aligned} \quad (34)$$

为了求解该问题,利用拉格朗日乘数法(Lagrange Multiplier Method)构造目标函数,如式(35)所示:

$$\mathcal{L}(\alpha, \lambda) = R_m(\alpha) + \lambda(R_s(\alpha) - R_{\text{req}}^s) \quad (35)$$

其中, $\lambda \geq 0$ 为拉格朗日乘子。

通过求解 Karush-Kuhn-Tucker 条件 $\partial \mathcal{L} / \partial \alpha = 0$, 并结合 $R_s(\alpha)$ 关于 α 的单调递减特性, 可知为了最大化 R_m , 应尽可能增大 α , 因此最优解必然取在约束边界上, 即 $R_s(\alpha) = R_{\text{req}}^s$ 。经过代数推导, 可得到最优功率分配系数 α^* 的闭式解为

$$\alpha^* = 1 - \frac{(2^{R_{\text{req}}^s/B} - 1)\sigma^2}{P_{\text{total}}|h_s|^2} \quad (36)$$

该闭式解表明, 系统应当分配刚好满足从 UAV 通信中断概率要求的最小功率, 而将剩余的所有功率集中分配给主 UAV。这一策略在物理层上通过 NOMA 技术实现了“按需分配”, 既保障了边缘弱用户的连通性, 又充分利用了中心强用户的优质信道条件, 从而提升低空 UAV 集群回传链路的整体频谱效率与传输容量。

3.2 发射机设计

发射机需在物理层完成多流信号的构建、调制变换。首先将待回传的数据映射为 QAM 符号。为了实现非正交传输, 系统直接在 DD 域网格上执行功率域叠加。依据 3.1 节建立的叠加模型式(29), 发射机在第 (k, l) 个网格点上构造复合符号。此时, DD 域发射信号矩阵 $\mathbf{X}_{\text{DD}}$ 的能量分布严格遵循 α^* 确定的比例约束, 即边缘节点(从 UAV)作为强分量($\alpha^* > 0.5$)以保障可靠性, 主节点(主 UAV)作为弱分量叠加以提升容量。利用第 1.2 节定义的 ISFFT[式(7)]将叠加后的 DD 域信号 $\mathbf{X}_{\text{DD}}$ 映射至 TF 域, 得到预备信号 $\mathbf{X}_{\text{TF}}$ 。此步骤将感知流的高能量符号扩散至整个时频平面, 使其对信道选择性衰落具有天然的鲁棒性。

随后, 在 TF 域执行波束赋形。设主 UAV 配置 N_t 根发射天线, 预编码矩阵 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 根据瞬时信道状态信息进行设计。经过预编码后的多天线 TF 域发射信号向量 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{TF}}[n, m]$ 可表示为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{TF}}[n, m] = \mathbf{W}[n, m] \cdot x_{\text{TF}}[n, m] \quad (37)$$

其中, $x_{\text{TF}}[n, m]$ 为单路 NOMA 混合信号在 TF 域的标量表示, n, m 分别为时隙与子载波索引。对每个发射天线分支, 利用 ISFFT 将 DD 域信号变换到 TF 域:

$$\mathbf{S}_{\text{TF}} = \text{ISFFT}(\mathbf{S}_{\text{DD}}) \quad (38)$$

将 TF 域信号转换为时域信号, 并添加循环前缀以消除符号间干扰:

$$\mathbf{s}(t) = \text{Heisenberg}(\mathbf{S}_{\text{TF}}) + \text{CP} \quad (39)$$

3.3 接收机设计

GBS 接收到的回传信号是经过双选信道、MIMO 矩阵混合及 NOMA 功率叠加的复合波形。为了准确分离主、从 UAV 的数据流, 本节设计了一种基于 MPA 与 SIC 的迭代接收机。接收信号经 Wigner 变换与 SFFT 处理后恢复至 DD 域。利用 OTFS 信道在 DD 域的稀疏特性, 执行以下“检测-重构-剥离”闭环。

第一阶段: 将从 UAV 信号视为高斯干扰, 优先对主 UAV U_m 进行解调。针对双选信道引起的分数多普勒干扰, 构建因子图并运行 MPA 算法。在第 t 次迭代中, 变量节点 v_k 传递给观察节点 c_d 的均值消息更新规则为

$$\mu_{v_k \rightarrow c_d}^{(t)} = \sum_{x \in \mathcal{A}} x \cdot P_{v_k \rightarrow c_d}^{(t-1)}(x) \quad (40)$$

$$I_{c_d \rightarrow v_k}^{(t)} = y_{\text{GBS}}[d] - \sum_{j \in \mathcal{N}(d) \setminus \{k\}} H_m[d, j] \mu_{v_j \rightarrow c_d}^{(t)} \quad (41)$$

其中: $\mathcal{A}$ 为调制星座点集合; $P_{v_k \rightarrow c_d}^{(t-1)}(x)$ 为上一轮迭代传递的概率信息; v_j 表示除目标节点 v_k 以外, 与观察节点 c_d 相连的其他干扰变量节点; $\mu_{v_j \rightarrow c_d}^{(t)}$ 即为这些干扰节点传递的先验均值; $I_{c_d \rightarrow v_k}^{(t)}$ 为剔除图上其他相邻节点干扰后的等效观测。

第二阶段: 获得主 UAV 判决符号 $\hat{x}_m$ 后, 利用估计信道 $\hat{H}_m$ 重构其干扰分量, 得到残差信号:

$$y_{\text{res}}[k, l] = y[k, l] - \sqrt{P_m} \hat{H}_m(\hat{x}_m[k, l]) \quad (42)$$

第三阶段: 针对 SINR 显著提升的残差信号 y_{res} , 利用 MPA 流程解调从 UAV 信号 x_s 。

4 MIMO-OTFS-NOMA 系统的控制补偿机制

基于前述 MIMO-OTFS-NOMA 通感一体化体系结构, 主 UAV 能够在 DD 域中同时获取 UAV 集群的距离、速度及旋翼微多普勒特征, 并通过微多普勒物理层指纹实现目标身份与状态的可靠关联。然而, 在低空集群编队飞行中, 阵风扰动、机动变化以及测量噪声会持续引入轨迹偏差, 若缺乏有效的闭环反馈机制, 仅依赖开环通信与感知难以维持稳定的编队构型与安全间距。因此, 本文进一步提出一种基于感知辅助的 UAV 集群协同轨迹控制, 将系统升级为 MIMO-OTFS-NOMA 通感控一体化系统。

4.1 感知辅助的 UAV 集群协同轨迹控制

考虑到传统通感一体化系统在多目标跟踪过程中通常依赖距离与径向速度进行航迹关联, 当多架 UAV 距离接近或轨迹交叉时, 极易发生目标混淆, 从而导致控制指令误分配。因此, 通过为集群中不同从 UAV 预设互不重叠的旋翼转速区间作为其物理层

“指纹”,可以在感知层面引入稳定的身份区分维度;进一步地,充分利用雷达回波中同时包含的宏观运动状态(距离 r 、径向速度 v)与反映旋翼转速特征的微多普勒参数 Ω ,实现多目标的鲁棒关联与闭环控制。相比于传统OFDM波形在高速场景下因多普勒频移导致的正交性破坏,OTFS调制利用DD域的准静态特性,保证了微多普勒指纹在快速时变信道下的表征稳定性。这种稳定性为闭环控制提供了确定性的反馈索引,有效抑制了因目标误关联引起的控制指令震荡。

定义第 k 架从UAV的预设旋翼转速为 Ω_k^{ref} 。在 t 时刻,系统检测到 M 个目标的感知参数向量集 $\mathcal{Z}(t)=\{\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_M\}$,其中第 i 个观测向量 $\mathbf{z}_i=[\hat{r}_i, \hat{v}_i, \hat{\Omega}_i]^T$ 包含估计的距离、速度及从DD域提取的微多普勒转速 $\hat{\Omega}_i$ 。目标ID的匹配问题可建模为式(43)的最小化特征误差的优化问题:

$$\hat{k}_i = \arg \min_{k \in \{1, 2, \dots, K\}} |\hat{\Omega}_i - \Omega_k^{\text{ref}}| \quad (43)$$

完成身份关联后,观测向量 $\mathbf{z}_i$ 被唯一分配给第 $\hat{k}_i$ 架UAV,并利用坐标变换将极坐标下的测量值 $(\hat{r}_i, \hat{\theta}_i)$ 转换为笛卡尔坐标系下的实时位置向 $\mathbf{p}_k(t)=[x_k(t), y_k(t), z_k(t)]^T$ 。

获得各从UAV的身份与高精度实时位置后,集群将维持编队构型进行预定轨迹飞行。设主UAV的实时轨迹为 $\mathbf{p}_L(t)$,第 k 架从UAV相对于主UAV的期望几何偏移量为 δ_k ,则第 k 架从UAV的期望轨迹 $\mathbf{p}_{d,k}(t)$ 定义为

$$\mathbf{p}_{d,k}(t) = \mathbf{p}_L(t) + \mathbf{R}(t) \cdot \delta_k \quad (44)$$

其中, $\mathbf{R}(t)$ 为编队坐标系相对于惯性坐标系的旋转矩阵。

定义第 k 架从UAV的位置跟踪误差 $\mathbf{e}_k(t)$ 为期望位置与OTFS感知位置之差:

$$\mathbf{e}_k(t) = \mathbf{p}_{d,k}(t) - \mathbf{p}_k(t) \quad (45)$$

为了消除该误差并克服阵风扰动及感知噪声的影响,设计连续时间PID轨迹控制。控制输入 $\mathbf{u}_k(t)$ 由比例项、积分项和微分项共同决定:

$$\mathbf{u}_k(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{e}_k(t) + \mathbf{K}_I \int_0^t \mathbf{e}_k(\tau) d\tau + \mathbf{K}_D \frac{d\mathbf{e}_k(t)}{dt} \quad (46)$$

其中, $\mathbf{K}_p, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D$ 分别为正定增益矩阵。

通过上述闭环反馈机制,MIMO-OTFS-NOMA系统不仅实现了高可靠通信,还利用物理层感知的微多普勒指纹与运动状态信息,完成UAV集群的协同控制,初步实现了“通-感-控”的通感控一体化。

4.2 克拉美-罗下界(CRLB)分析

为了评估感知性能,我们推导OTFS-ISAC系统的CRLB。CRLB给出了无偏估计量方差的理论下界。

定义待参数向量 $\boldsymbol{\theta}=[\tau, v, \alpha]^T$,其中 α 为反射系数。Fisher信息矩阵(FIM) $\mathbf{J}$ 的元素定义为

$$\mathbf{J}_{mn} = -\mathbb{E} \left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{y}; \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_m \partial \theta_n} \right] \quad (47)$$

其中, $p(\mathbf{y}; \boldsymbol{\theta})$ 为接收信号向量 $\mathbf{y}$ 的条件概率密度函数。

假设噪声为零均值复高斯白噪声,且噪声协方差矩阵 $\mathbf{R}_n$ 与待估计参数无关,则FIM元素可简化为

$$\mathbf{J}_{mn} = 2\text{Re} \left\{ \left(\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_m} \right)^H \mathbf{R}_n^{-1} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_n} \right) \right\} \quad (48)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\theta})$ 为无噪声的理想接收信号向量, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示取实部。对于OTFS信号,利用其大时宽带宽积特性,可以推导出时延估计的下界CRLB(τ)与信号有效带宽 B_{rms} 的平方成反比:

$$\text{CRLB}(\tau) \geq \frac{1}{8\pi^2 \text{SNR} \cdot B_{\text{rms}}^2} \quad (49)$$

多普勒估计的下界CRLB(v)与信号有效时宽 T_{rms} 的平方成反比:

$$\text{CRLB}(v) \geq \frac{1}{8\pi^2 \text{SNR} \cdot T_{\text{rms}}^2} \quad (50)$$

5 仿真分析

为了验证所提MIMO-OTFS-NOMA通感控一体化系统在低空UAV集群场景下的性能,我们利用MATLAB搭建了仿真平台。主要仿真参数设置如下:1个主无人机(Master UAV),以及4个分布在空间坐标的从无人机,MIMO配置为 4×4 均匀面阵,载波频率 $f_c = 30$ GHz(毫米波频段),带宽 $B = 10$ MHz,子载波间隔 $\Delta f = 120$ kHz。OTFS网格大小 $M = 64, N = 256$ 。UAV移动速度范围30~100 km/h,信道模型采用3GPP TR 38.901 UMi模型并叠加高动态多普勒频移。系统设定编队飞行总时长为60 s,控制时间步长为0.1 s,UAV集群正弦巡航。设PID($K_p = 10, K_d = 6, K_i = 1.5$),引入噪声干扰 $\sigma = 0.3$ m/s²。

5.1 通信性能分析

首先评估系统的误码率(Bit Error Ratio, BER)性能。图4展示了在30~100 km/h高速移动场景下,四种系统方案的BER对比。

随着信噪比的增加,OFDM系统的BER曲线出现“平层效应”,这是由于高速移动产生的多普勒频移破坏了OFDM子载波的正交性,导致严重的ICI无法通过常规均衡消除。相比之下,OTFS系统利用DD域的信道稀疏性和稳定性,BER曲线随SNR线性下降,未出现平层。在BER = 10^{-3} 时,OTFS方案相比OFDM方案有约7 dB的性能增益。

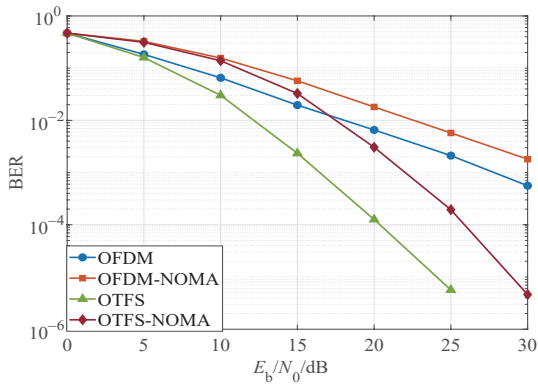


图4 高移动性场景下四种系统方案的误码率性能对比

Figure 4 BER performance comparison of four schemes in high-mobility scenarios

5.2 感知性能分析

首先评估系统的感知性能。图5展示了在MIMO阵列增益辅助下,系统对目标距离、速度、俯仰角及方位角的均方根误差(RMSE)性能。

图5结果显示 OTFS 的感知 RMSE 在低信噪比区域随 SNR 增加而下降,但由于受限于 DD 离散网格的分辨率,其距离与速度估计在 0 dB 附近即出现的“误差底(error floor)”,不再随信噪比进一步提升而线性逼近 CLB。OTFS 通过克服了传统 OFDM 因多普勒频移导致的正交性破坏,在复杂双选信道下展现出比 OFDM 方案更好的参数估计精度。

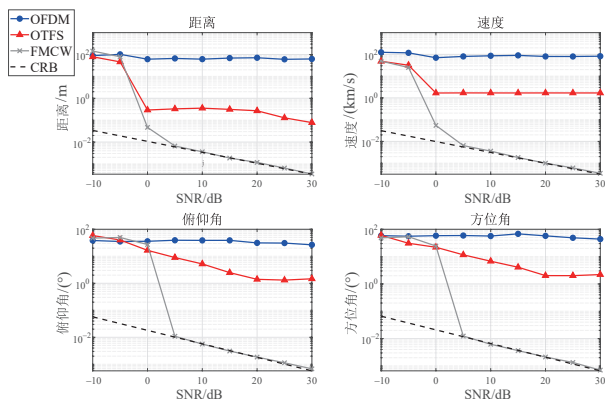


图5 感知系统参数估计RMSE性能对比

Figure 5 Comparison of RMSE performance for sensing parameter estimation

为了验证基于旋翼微多普勒特征的物理层身份识别机制,我们对 UAV 回波信号进行了流程仿真分析。首先,图6展示了四架不同转速(RPM 分别为 3 000、6 400、4 400、7 900)的 UAV 旋翼回波信号的时域波形。

分析图6可知,旋翼的高速旋转对时域信号包络产生了周期性的幅度调制(闪烁效应),且调制频率

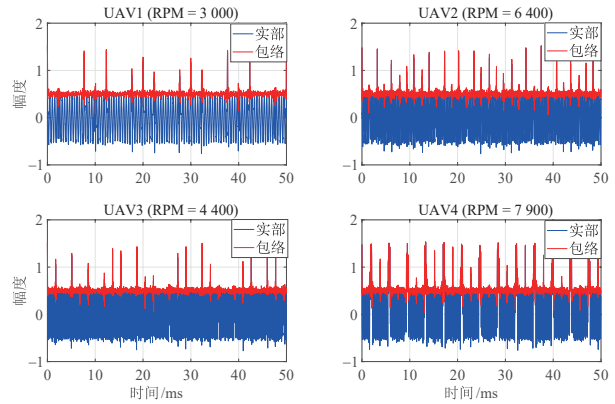


图6 不同转速下 UAV 旋翼回波信号的时域波形

Figure 6 Time-domain waveforms of UAV rotor echo signals under different rotational speeds

与转速严格对应。下方的相位历程图展示了目标的主体运动产生的线性相位变化,以及叠加其上的由旋翼微动引起的非线性相位波动。这些细微的波动正是进行物理层指纹识别的基础数据来源。

如图7所示,系统在 STFT 时频域展现了对四架具有不同物理特性的从无人机的精细表征能力。在主体多普勒频率(图中红线)两侧,清晰可见由各 UAV 旋翼高速旋转产生的周期性微多普勒边带分量。具体而言,针对仿真场景中转速分别为 3 000、6 400、4 400 及 7 900 rpm 的四个目标,OTFS 调制通过 SFFT 变换将时变相位波动映射为 DD 网格中特定间隔的离散谱线。这验证了系统能够有效提取微多普勒“指纹”,从而在物理层实现对不同 UAV 个体的精确区分。

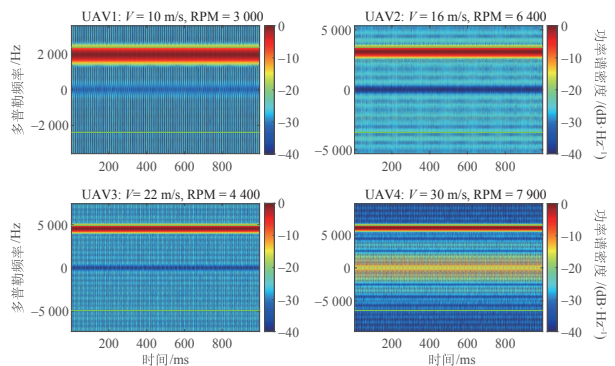


图7 基于STFT的多UAV旋翼微多普勒时频特征谱图

Figure 7 STFT-based time-frequency spectrograms of rotor-induced micro-Doppler features for UAVs

图8进一步展示了 MIMO-OTFS-NOMA 系统对低空 UAV 集群的三维空间定位与感知效果。在存在强烈双选衰落的无人机集群场景下,系统对四个随机分布的从无人机进行感知得到的距离、速度及俯仰/方位角信息转化为笛卡尔坐标系中的 3D 位置坐标,估

计位置(叉号)与真实位置(圆点)高度重合,验证了该方案在密集集群环境下抑制层间干扰并保持稳定定位精度的能力。

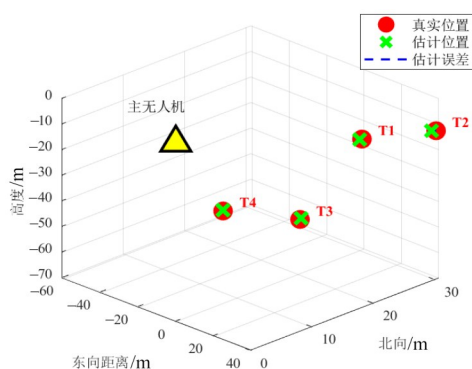


图8 多目标角度估计与3D空间定位可视化

Figure 8 Visualization of multi-target angle estimation and 3D spatial localization

在获取目标身份与状态感知结果后,系统进一步执行闭环协同轨迹控制。图9展示了由1架主UAV与4架从UAV组成的集群在整个飞行周期内的3D编队轨迹跟踪情况。在主UAV沿预设轨迹(如正弦摆动的复杂巡航轨迹)飞行时,从UAV利用反馈的相对位置数据(距离、俯仰角与方位角)实时生成期望轨迹。

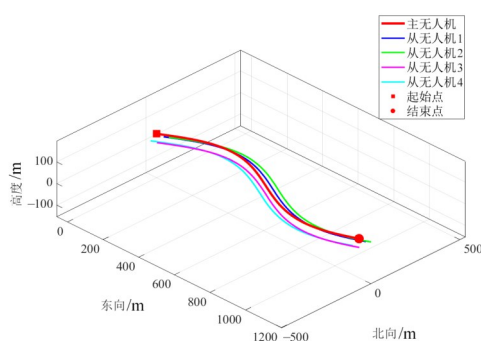


图9 基于感知辅助的UAV集群3D协同编队轨迹规划可视化

Figure 9 Visualization of sensing-assisted 3D cooperative formation trajectory planning for UAV swarms

图10进一步给出了4架从UAV在协同飞行过程中的相对位置误差随时间的变化曲线。在持续巡航过程中,受到过程噪声与感知观测噪声的叠加影响,相对误差会在某一极小范围内发生波动,四架从UAV位置的RMSE分别为0.13、0.15、0.19和0.23 m,整体编队误差始终维持在较低水平,未出现发散现象。上述结果表明,所提MIMO-OTFS-NOMA系统能够在高移动、双选信道下保障可靠的通感性能,并为后续的控制补偿提供有效索引,从而在仿真层面上初步验证了“通-感-控”一体化流程的可行性与闭环稳定性。

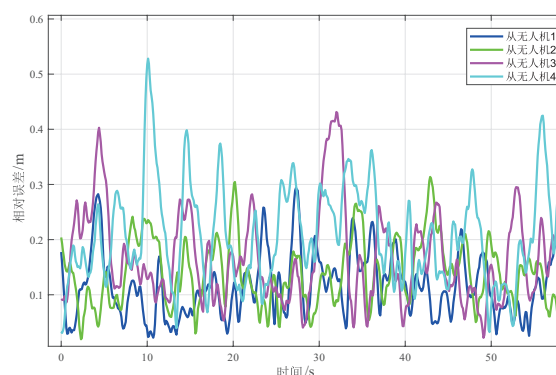


图10 无人机集群协同编队位置规划相对误差

Figure 10 Relative error of cooperative formation position planning for UAV swarms

6 结束语

本文面向低空UAV集群高动态场景,提出了一种基于MIMO-OTFS-NOMA的通感控一体化系统框架。该框架利用OTFS在DD域的准静态表征能力,增强了双选信道下通信与感知处理的稳健性;在此基础上,在上行回传链路中引入功率域NOMA,构建主UAV全频复用与从UAV分频接入的叠加传输架构,将复杂集群干扰解耦为若干并行的双用户NOMA模型,同时结合UAV集群通信特性设计了基于MPA与SIC的迭代接收机制,提升了有限频谱条件下的复用效率与远距离空地回传能力。与此同时,构建了基于DD域微多普勒结构化映射的物理层身份感知机制,并通过微多普勒特征的可分性仿真验证实现“感知即识别”的目标身份关联,为密集/交叉航迹条件下的鲁棒跟踪与协同控制提供可靠索引。仿真结果表明,在30~100 km/h高速移动条件下,所提方案可保持稳定的链路可靠性,BER性能相较OFDM-NOMA基线具有明显优势;感知侧的距离/速度等参数估计随SNR变化趋势与CRLB分析结论一致。最后,基于主UAV获取的运动参数与身份关联结果,实现了感知辅助的协同轨迹控制闭环设计,验证了“通-感-控”一体化方案的初步可行性。

参考文献

- [1] Liu Fan, Cui Yuanhao, Masouros C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [2] Wei Zhiqing, Qu Hanyang, Wang Yuan, et al. Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: A survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(13): 11068-11092.
- [3] González-Prelcic N, Furkan Keskin M, Kaltiokallio O, et

- al. The integrated sensing and communication revolution for 6G: Vision, techniques, and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2024, 112(7): 676-723.
- [4] Cheng Gaoyuan, Song Xianxin, Lyu Zhonghao, et al. Networked ISAC for low-altitude economy: Coordinated transmit beamforming and UAV trajectory design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(8): 5832-5847.
- [5] Liu An, Huang Zhe, Li Min, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 994-1034.
- [6] Zhang J A, Rahman M L, Wu Kai, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(1): 306-345.
- [7] Meng Kaitao, Wu Qingqing, Xu Jie, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(2): 97-104.
- [8] Shi Jia, Li Zan, Hu Junfan, et al. OTFS enabled LEO satellite communications: A promising solution to severe Doppler effects[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(1): 203-209.
- [9] 蔡穗华, 王义文, 白宝明, 等. 面向高可靠低时延通信的信道编码技术研究综述[J]. *电子学报*, 2025, 53(2): 629-644.
- Cai Suihua, Wang Yiwen, Bai Baoming, et al. Channel coding techniques for ultra-reliable and low-latency communication[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(2): 629-644. (in Chinese)
- [10] Aldababsa M, Özyurt S, Kurt G K, et al. A survey on orthogonal time frequency space modulation[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 4483-4518.
- [11] Yuan Weijie, Wei Zhiqiang, Li Shuangyang, et al. Orthogonal time frequency space modulation: Part III: ISAC and potential applications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(1): 14-18.
- [12] Li Shuangyang, Yuan Weijie, Liu Chang, et al. A novel ISAC transmission framework based on spatially-spread orthogonal time frequency space modulation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1854-1872.
- [13] Keskin M F, Marcus C, Eriksson O, et al. Integrated sensing and communications with MIMO-OTFS: ISI/ICI exploitation and delay-Doppler multiplexing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 10229-10246.
- [14] Xiang Luping, Xu Ke, Hu Jie, et al. Robust NOMA-assisted OTFS-ISAC network design with 3-D motion prediction topology[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 15909-15918.
- [15] Shi Yunmei, Huang Yi. Integrated sensing and communication-assisted user state refinement for OTFS systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(2): 922-936.
- [16] Li Buyi, Yuan Weijie, Liu Fan, et al. OTFS-based ISAC: How delay Doppler channel estimation assists environment sensing[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(12): 3563-3567.
- [17] Mu Xidong, Wang Zhaolin, Liu Yuanwei. NOMA for integrating sensing and communications toward 6G: A multiple access perspective[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(3): 316-323.
- [18] Zhou Jiajie, Yang Chao, Huang Junlin, et al. NOMA-ISAC empowered UAV networks: Joint clustering and power allocation optimization[J]. *IEEE Networking Letters*, 2025, 7(4): 279-283.
- [19] Eslami L, Kianfar G, Abouei J, et al. Hierarchical resource optimization in multi-UAV RIS-assisted ISAC networks with uplink NOMA[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2026, 13(2): 3389-3407.
- [20] Li Jingfu, Chen Gaojie, Zhang Tong, et al. UAV-RIS-aided space-air-ground integrated network: Interference alignment design and DoF analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(9): 11678-11692.
- [21] 郭伟然, 张书哲, 魏萌, 等. 毫米波辅助机载激光通信[J]. *电子学报*, 2025, 53(8): 2985-2992.
- Guo Weiran, Zhang Shuzhe, Wei Meng, et al. Millimeter-wave-assisted airborne laser communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(8): 2985-2992. (in Chinese)
- [22] Huang Chong, Chen Xuyang, Chen Gaojie, et al. Deep reinforcement learning-based resource allocation for hybrid bit and generative semantic communications in space-air-ground integrated networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(12): 3942-3954.
- [23] Yue Hanxue, Guo Cheng, Li Quanzhong, et al. Power allocation optimization for secure OFDM-NOMA downlink systems[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 7555-7566.
- [24] Liu Zechen, Liu Xin, Liu Yuemin, et al. UAV assisted integrated sensing and communications for Internet of Things: 3D trajectory optimization and resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 8654-8667.
- [25] Cheng Sike, Lin Xiangbo, Li Xuanheng, et al. Joint UAV trajectory and RadCom task schedule for IVNs: A game-embedding multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(1): 181-196.
- [26] Abdissa Bayessa G, Chai Rong, Liang Chengchao, et al. Joint UAV deployment and precoder optimization for mul-

- ticasting and target sensing in UAV-assisted ISAC networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(20): 33392-33405.
- [27] Khalili A, Rezaei A, Xu Dongfang, et al. Efficient UAV hovering, resource allocation, and trajectory design for ISAC with limited backhaul capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(11): 17635-17650.
- [28] Wu Zhongqing, Li Xuehua, Cai Yuanxi, 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.
- [29] Gao Qian, Zhong Ruikang, Shin H, et al. MARL-based UAV trajectory and beamforming optimization for ISAC system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(24): 40492-40505.
- [30] Zhang Hongyun, Li Bin, Rong Yue, et al. Joint optimization of transmit power and trajectory for UAV-enabled data collection with dynamic constraints[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(9): 8080-8091.
- [31] Chen Kejin, Gong Xiaodong, Yang Feng, et al. Joint beamforming and waveform optimization in 4-D antenna arrays for integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(10): 7787-7799.
- [32] Zhu Qi, Li Ming, Liu Rang, et al. Cramér-Rao bound optimization for active RIS-empowered ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11723-11736.
- [33] Liu Yaxi, Mao Wencan, He Boxin, et al. Radar probing optimization for joint beamforming and UAV trajectory design in UAV-enabled integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(6): 4469-4485.
- [34] Fei Chen, Lu Zhuo, Gao Lan, et al. Game-theoretic optimization for multi-UAV integrated sensing and communication networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(20): 42741-42753.

作者简介



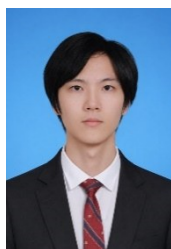
李劲夫 男, 1993年7月出生于四川省成都市。现为西南交通大学信息科学与技术学院助理教授。主要研究方向为空地一体化网络、通感一体化、低空智能网络与自动驾驶等。
E-mail: jingfuli@swjtu.edu.cn



鲁佳星 男, 2002年4月出生于四川省广安市。现为西南交通大学信息科学与技术学院硕士研究生。主要研究方向为低空经济、通感控一体化等。
E-mail: jiagXinLu@my.swjtu.edu.cn



邹应全 男, 1975年3月出生于江苏省兴化市。现为西南交通大学信息科学与技术学院副教授。主要研究方向为智能信息采集与控制、自动驾驶技术及新能源技术等。
E-mail: zouyingq@home.swjtu.edu.cn



黄 翀 男, 1989年4月出生于福建省漳州市。现为中山大学柔性电子学院副教授。主要研究方向为智能化无线通信网络、卫星通信、大模型集群推理等。
E-mail: huangch277@mail.sysu.edu.cn



王千里 男, 1990年12月出生于四川省南充市。现为西南交通大学信息科学与技术学院副教授。主要研究方向为参数估计与检测理论、通感一体化等。中国电子学会会员编号: E190199501M。
E-mail: qlwang@swjtu.edu.cn



陈高洁 男, 1983年1月出生于陕西省西安市。现为中山大学柔性电子学院副院长、教授。主要研究方向为柔性电子智能感知通信一体化、柔性光电感知与通信、人工智能赋能柔性电子智能系统、空地一体化通信网络等。中国电子学会会员编号: E190157826S。
E-mail: chengj235@mail.sysu.edu.cn



范平志 男, 1955年12月生于四川省广汉市。现为西南交通大学信息科学与技术学院首席教授、利兹学院荣誉院长、英国利兹大学客座教授、IEEE终身会士。主要研究方向为高移动性无线通信、多址接入技术、通感一体化、信号设计与编码等。中国电子学会会员编号: E190003399F。
E-mail: pzf@swjtu.edu.cn