

# 面向有人/无人协同的智能通信与组网关键技术：现状与趋势

尹浩<sup>1,2</sup>, 魏急波<sup>2</sup>, 赵海涛<sup>2</sup>, 张姣<sup>2</sup>, 王海军<sup>2</sup>, 任保全<sup>1</sup>

(1. 军事科学院, 北京 100076; 2. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 系统总结了有人/无人协同的智能通信与组网领域的研究成果。首先, 从有人/无人协同的应用场景出发, 具体分析了其对通信组网的需求。然后, 自底而上按照物理层、链路层、网络层的层次划分, 深入阐述了通信信道建模、通信波形设计、组网架构与协议、智能协同等关键问题, 分析了研究现状和代表性技术的特点。最后, 面向更加智能、高效、灵活的有人/无人协同通信与组网, 展望了可能的发展趋势和极具潜力的技术方向。

**关键词:** 有人/无人系统; 智能通信; 智能组网; 群体智能

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024037

## Intelligent communication and networking key technologies for manned/unmanned cooperation: states-of-the-art and trends

YIN Hao<sup>1,2</sup>, WEI Jibo<sup>2</sup>, ZHAO Haitao<sup>2</sup>, ZHANG Jiao<sup>2</sup>, WANG Haijun<sup>2</sup>, REN Baoquan<sup>1</sup>

1. Academy of Military Sciences, Beijing 100076, China

2. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

**Abstract:** The intelligent communication and networking technologies for manned/unmanned cooperation was comprehensively surveyed. Firstly, the requirements on communication and networking were analyzed from the application scenarios of manned/unmanned cooperation. Then, in context of physical layer, link layer and network layer respectively, the key issues regarding channel modeling, waveform design, networking protocol and intelligent collaboration were analyzed. And the states-of-the-art in this research area and the characteristics of representative technologies were deeply studied. In the end, the possible development trends and promising technologies were prospected on the way to make the manned/unmanned cooperative communication and networking more intelligent, more efficient and more flexible.

**Keywords:** manned/unmanned systems, intelligent communication, intelligent networking, swarm intelligence

## 0 引言

近年来, 以无人机、无人车等为代表的无人系统迅速发展, 将成为推动人类生产生活方式转型的重要力量<sup>[1]</sup>。相较于独立工作的单无人系统, 协同工作的无人集群具有更稳健的分布式体系架构、更高的效费比和更广的作用范围<sup>[2]</sup>。然而, 受限于当前无人系统的智能化水平, 在未来相当长的时期

内, 无人系统全自主协同执行任务的实现难度较大。因此, 现阶段将人的智慧和综合判断能力融入无人系统, 有人系统和无人系统发挥各自优势, 形成有人/无人混合编队协同执行任务, 是当前国内外广泛关注的研究方向<sup>[3]</sup>。有人/无人协同工作方式具有广泛的应用前景, 可以显著提高搜索效率、探测精度, 为农林防护、搜索救援等赢取宝贵时间。

实现有人系统与无人系统高效、稳健协同的关键

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-26

通信作者: 赵海涛, haitaozhao@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61931020); 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2022JJ10068)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61931020), The Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2022JJ10068)

是在它们之间建立信息交互的通道,实现态势数据回传、编队控制信息交互和控制指令分发等功能。然而,要达成这个目标却并非易事。目前,无人系统相关技术的不断发展使无人系统的形态越来越多样化,个体的传感、计算能力和移动控制性能等都不断增强,承担无人系统和无人系统之间,以及有人系统和无人系统之间纽带作用的通信组网已成为严重制约其进一步发展的瓶颈,因此也吸引了越来越多学者的研究。现有的综述文章<sup>[1,4-5]</sup>通常从更宽泛的角度对有人/无人协同进行调研,内容涵盖发展现状、应用模式、关键技术、发展趋势等,忽视了针对某一项关键问题进行调研的深度。智能通信和组网作为有人/无人协同中的一项关键技术,是实现有人系统和无人系统间高效协同的重要手段,值得系统和深入总结,然而目前还没有相关的综述文章。

本文针对未来有人/无人协同工作的发展趋势,分析其中的通信与组网基础问题和关键技术。由于有人/无人协同是受应用场景驱动的,它与通信环境紧密相关,从而使学术界和工业界发展出适应不同通信场景和应用需求的通信波形、组网技术和智能协同等相关技术。因此,本文首先从有人/无人协同的应用场景出发,具体分析了其对通信组网的需求;然后,按照物理层、链路层、网络层的层次划分,从通信信道建模、通信波形设计、组网架构与协议、智能协同等几个方面深入分析了有人/无人协同智能通信与组网所需的关键技术,总结了研究现状和代表性技术的特点。进一步地,对发展趋势进行展望,特别是面向更加智能、高效、灵活的有人/无人协同通信与组网,展望了可能的发展趋势和有潜力的技术方向,希望为有人/无人协同通信组网的顶层架构规划与关键技术实现提供参考。

### 1 应用场景与需求

在有人/无人协同任务中,有人系统负责指挥决

策和任务分配,无人系统则通过自主协同控制,执行单项危险任务。根据现有国内外案例分析,有人/无人协同通信网络的应用场景主要包括热点区域覆盖<sup>[6-7]</sup>、灾害救援<sup>[8-9]</sup>、侦察监视<sup>[10]</sup>和联合行动<sup>[4]</sup>等,如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

#### 1) 有人/无人协同热点区域覆盖

在大型聚集活动等需要临时通信服务覆盖和增强的场景下,可以部署无人机作为空中基站为地面用户提供通信接入服务。相比搭建固定基站,无人系统具有低成本、即时部署和回收的优势。在该场景下,为了实现灵活、大范围、高质量的覆盖,无人系统之间需要组成稳健的主干网,并根据地面用户的通信需求和位置变化,实时地实现部署优化。此外,无人机也可以嵌入空天地一体化网络中,是空基网络的重要组成部分。该场景下需要实现大带宽、广覆盖和低功耗通信。

#### 2) 有人/无人协同灾害救援

在火灾、地震等危险救援场景中,施救人员联合无人系统组成编队,通过搭载在无人系统上的传感器和救灾设备对人员实时搜索、定位和救援。无人系统负责采集前方灾害信息并回传,帮助后方指挥人员掌握灾情并制定救援方案。该场景下的有人/无人协同是遥控级别的协同,对通信和组网的可靠性和实时性要求较高,因此,需要实现大带宽、高可靠和低时延通信。

#### 3) 有人/无人协同侦察监视

有人平台通过对不同类型的无人侦察系统进行合理的任务分工,完成对地面目标的远距离搜索、探测与成像等,同时完成对低截获概率、低辐射功率、低旁瓣能量信号的侦收,实现对威胁目标高精度定位。该场景下需要实现大带宽和低功耗通信,支撑长航时、高精度目标探测和信息回传。

#### 4) 有人/无人协同联合行动

利用有人系统与无人系统组成编队执行任务,

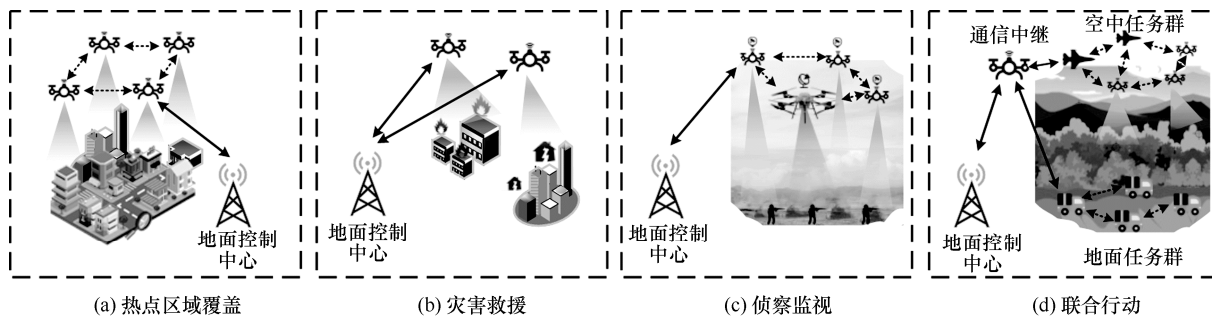


图 1 有人/无人协同通信网络应用模式

由无人系统深入危险区域进行作业，有人系统则可在安全区域承担控制、通信中继和空中掩护等任务。在此场景下，有人系统与无人系统可构建 Ad Hoc 网络或者 Mesh 网络，各无人系统可通过自组织网络进行分工合作、灵活编队、密切协同，有人系统则可通过指挥控制通信链路来指挥无人集群。该场景下需要实现高可靠、低时延通信。

有人/无人协同应用场景下的通信组网需求和关键技术对比如表 1 所示。有人/无人协同系统面临多样化的通信环境和任务需求，因此需要针对不同的场景进行通信和组网规划，主要包括信道建模、通信波形设计、组网技术以及通信与智能协同优化等。信道建模方面，上述场景均涉及无人机间的协同信息交互、无人机与地面之间的数据回传和指控指令分发，因此需要对空-空、空-地信道进行建模。联合行动场景还涉及地面无人系统间的通信，因此需要对地-地信道进行建模。通信波形方面，以上场景中的无人系统面临拓扑动态变化、通信环境复杂、资源受限等难题，因此需要高可靠性、高速率、低功耗和低时延的通信波形，常见的包括正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）波形、基于滤波的多载波波形、正交时频空间（OTFS, orthogonal time frequency space）波形等。此外，在侦察监视和联合行动这 2 个场景中，存在对目标进行探测和感知的需求，因此，也可以采用目前关注度比较高的通感一体（ISAC, integrated sensing and communication）波形。组网技术方面，需要根据任务和通信性能需求设计网络架构、网络协议和资源分配方案。此外，随着未来人工智能技术在无人系统中的应用，无人系统面临复杂、对抗的通信环境，如何实现弱通信和部分观测下的智能协同也是一个被广泛研究的方向。

## 2 信道建模

有人/无人协同集群通常由飞行器、地面车辆、控制站等构成，不同于传统的无线通信系统，其节点构成类型复杂、分布范围广，可能的任务区域涵盖城市、丛林、山区、海岛等多种复杂地域环境。集群节点间的通信链路包括空-地、空-空和地-地 3 种类型。

### 2.1 空-地信道

无人机飞行高度范围通常为数十米到数千米，其与地面节点之间的信道主要受到地面散射环境、遮挡情况以及传播损耗的影响。由于无人机所处空间具有开放性，散射体分布情况相对容易描述，因此，现有信道建模的主要方法为基于几何的随机模型（GBSM, geometry-based stochastic model）。考虑点对点单入单出（SISO, single input single output）通信系统，接收端处的时变信道冲激响应可以表示为<sup>[11]</sup>

$$h(t, \tau) = h_{\text{LoS}}(t, \tau) + h_{\text{NLoS}}(t, \tau) \quad (1)$$

其中

$$h_{\text{LoS}}(t, \tau) = \sqrt{\frac{K(t)}{K(t)+1}} \delta(\tau - \tau_{\text{LoS}}(t)) e^{-\frac{j2\pi d(t)}{\lambda}} \quad (2)$$

$$h_{\text{NLoS}}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K(t)+1}} \sum_{m=1}^{M(t)} P_m(t) \delta(\tau - \tau_m(t)) \cdot e^{-\frac{j2\pi d_{\text{TR},m}(t)}{\lambda}} e^{j\phi_m(t)} e^{j2\pi f_m(t)t} \quad (3)$$

其中， $K(t)$  为时变的莱斯  $K$  因子， $M(t)$  为  $t$  时刻 NLoS(non-line-of-sight) 路径的数量， $\tau_m(t)$ 、 $f_m(t)$ 、 $d_{\text{TR},m}(t)$  和  $\phi_m(t)$  分别为第  $m$  条 NLoS 路径的时延、多普勒频移、传播路程和附加相位。通过假设散射体的不同空间分布，可以推导得到空-地、空-空

表 1 有人/无人协同应用场景下的通信组网需求和关键技术对比

场景	组网性能需求	信道建模	通信波形	网络架构	网络协议
有人/无人协同热点区域覆盖	大带宽、广覆盖、低功耗	空-空信道、空-地信道	正交频分复用波形、基于滤波的多载波波形、正交时频空间波形	分布式	自组织网络协议
有人/无人协同灾害救援	大带宽、高可靠、低时延	空-空信道、空-地信道	正交频分复用波形、基于滤波的多载波波形、正交时频空间波形	集中式	自组织网络协议
有人/无人协同侦察监视	大带宽、低功耗	空-空信道、空-地信道	正交频分复用波形、基于滤波的多载波波形、正交时频空间波形、通感一体波形	分布式	自组织网络协议
有人/无人协同联合行动	高可靠、低时延	空-空信道、空-地信道、地-地信道	正交频分复用波形、基于滤波的多载波波形、正交时频空间波形、通感一体波形	分层分簇 Mesh	自组织网络协议

各种场景下的角度功率谱、时延功率谱等多维信道特征。

早期的空-地信道建模通常假设飞行器高度较高,此时散射体主要分布在地面节点的周围<sup>[12]</sup>。但实际上,传播机制将随飞行器高度发生变化,尤其在集群前突节点执行感知、侦查、支持等任务时,无人机需要接近地面或建筑物目标。因此,有人/无人协同场景下,需要重点关注低空条件下的空-地信道建模。此时空-地信道特性同时受到空中节点和地面节点周围散射体分布的影响<sup>[13]</sup>,接收功率、多径数量等信道特征将随高度区间发生明显变化。文献[14]首次提出了一种面向毫米波多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)信道的双圆柱体 GBSM,同时考虑了 LoS (line-of-sight) 路径分量和基站与无人机附近的单次反射分量,仿真得到的时频相关性与实测数据较好地吻合。另一方面,空-地通信场景物理环境复杂多样,进一步丰富了信道模型的形式<sup>[15-16]</sup>。例如,在无人机海面测绘等场景下,传播环境中存在水面或平整的地面,此时水面/地面反射径和 LoS 径将占主导地位,曲面地球双径(CE2R, curve-earth two-rays)模型能够取得更好的建模效果<sup>[17-18]</sup>。在实际应用中,无人机与地面基站之间的部分散射体,如车辆、行人或集群内其他无人机等,均处于随机运动过程<sup>[11]</sup>,通过这些散射体的分量将导致信道产生非平稳性,信道统计特性将随时间快速变化。已有研究引入马尔可夫模型<sup>[19]</sup>或非广义平稳模型<sup>[14]</sup>来模拟多径的生灭现象,通过概率分布和时间上的相关性来描述空-地信道的非平稳特征,其部分信道统计参数,如相关函数、二阶统计参数等,能够与测量结果较好地吻合。然而,人们对非平稳现象的内在机理尚缺乏深入认识,现有非平稳空-地信道仅实现了统计参数层面在特定场景下的建模,模型精度和通用性仍面临巨大挑战。

相比于地面节点,无人机具有独特的物理结构和飞行特性,其机身形状材料、天线放置方式、螺旋桨和机身姿态(如俯仰角、倾斜度等)均会影响信号的传播。假设无人机竖直安装鞭状全向天线,机身姿态的变化将引起竖直方向的天线增益图产生旋转,导致接收信号强度变化。文献[17]首次在空中-地信道测量中发现了机体俯仰角对路径损耗的影响。文献[20]验证了无人机结构与姿态对多普勒相位、阴影衰落因子等信道参数的影响。通过在路

径损耗的经验模型中引入无人机姿态和位置信息,能够在一定程度上补偿飞行过程引起的空-地信道变化,符合实际信道统计特点。

## 2.2 空-空信道

空-空链路是有人/无人协同系统网络的重要组成部分。受制于信道测量设备的体积和重量,空-空信道测量活动难以基于无人平台开展,现有测量数据和经验模型十分匮乏,目前的空-空信道模型主要为基于几何的随机模型。相较于空-地链路,空-空链路受到遮挡的概率很小,LoS 分量占据接收功率中的绝大部分比重,其余分量经过以收发节点为焦点的椭球表面<sup>[21]</sup>散射、反射后到达接收机。这也使空-空信道的散射体区域相对于空-地信道更广,具有显著的额外传播时延。空-地信道和空-空信道建模方法及所考虑的信道特征如表 2 所示。其中,非几何的随机模型(NGSM, non-geometry-based stochastic model)使用若干随机变量及其概率密度函数表示信道特征,模型复杂度和精度相对于 GBSM 较低,但在模型所针对的场景下具有较好的泛用性<sup>[22]</sup>。

无人机节点最高移动速度最高可达每小时几百千米<sup>[23]</sup>,其相对运动造成的多普勒效应是空-空信道模型必须考虑的重要特征。节点的快速运动会导致空域信道特性,如到达角(AoA, angle of arrival)和离去角(AoD, angle of departure)快速变化<sup>[24]</sup>,多普勒谱也将随运动过程迅速演进,这对通信链路的稳健性提出了较大的挑战。对此,部分研究基于所提出的 GBSM,对多普勒功率谱进行了推导<sup>[25-26]</sup>。同时,运动速度和运动方向的变化会对时域的非平稳性产生影响。文献[27]利用高斯马尔可夫模型对无人机终端和运动方向进行了建模,推导了匀速、加速、随机多种运动模式下的空时频相关函数。此外,飞行器集群协同交互时,相邻无人机将作为散射体构成物理信道的一部分。机身姿态、抖动、天线类型等因素将引起接收功率的变化,螺旋桨散射效应、机身几何形状等也可能影响通信链路质量。因此,有必要研究上述因素对无线信号传播机理的影响,以科学准确地表征空中集群的信道特征。

## 2.3 地-地信道

有人/无人协同系统模型地面部分由控制平台、传感器终端、有人/无人车辆等资源组成,可以分为动态和静态 2 种节点。当网络存在架高天线的基础

表 2 空-地信道和空-空信道建模方法及所考虑的信道特征

信道	文献	模型类型	建模方法及模型特点	非平稳性	移动性	信道特征
空-地信道	文献[17]	NGSM MIMO	基于水域上空通信场景 L/C 波段测量结果，建立随机模型，使用 CE2R 模型和多径生灭模型分别表征路径损耗和小尺度衰落	否	否	路径损耗、阴影衰落、多普勒谱
	文献[15]	射线追踪 SISO	针对山区通信场景，建立山体物理模型；考虑 LoS 径和一次、二次反射路径，推导路径损耗解析表达式	否	否	路径损耗、功率时延谱
	文献[13]	GBSM MIMO	假设散射体分布于地面端附近的圆柱面上，且同时考虑了收发两端移动性	是	是	信道时空相关函数、平稳区间
	文献[14]	GBSM MIMO	考虑低空无人机通信情况，假设散射体分布于收发端周围，即双圆柱面模型	是	是	信道时变传递函数、空时相关函数
	文献[16]	GBSM MIMO	针对海面通信场景，考虑波导效应造成的多次反射，所建立模型与 C 波段信道实测数据吻合	是	是	时延拓展、平稳区间间隔
空-空信道	文献[22]	NGSM SISO	基于 L 波段信道测量结果，校准了传播路径上建筑物表面材料的电磁参数；通过广泛的射线追踪模拟结果建立了随机模型	否	否	衰落类型、功率时延谱、多普勒谱
	文献[25]	GBSM SISO	考虑 LoS 径和一次、二次反射分量；支持模拟无人机轨迹和速度的变化	是	是	时频相关函数、多普勒谱

设施时，通信节点可以视作基站和移动设备两种类型，此时的地-地信道考虑使用蜂窝通信场景下的信道模型，例如 LTE-Advanced、5G New Radio 等标准模型进行频率外插得到。当链路双方没有显著升高的基站天线，如车对车、车对人等情况时，NLoS 传播发生的概率将明显增加。尤其当无人车辆在建筑、城市街道、地下等非开阔地区执行任务时，信号的非视距传播将严重影响传输距离和信道的衰减特性。通过基于建筑、障碍物等地理位置信息随机地生成 LoS/NLoS 信道<sup>[28]</sup>，或使用马尔可夫模型描述 LoS 与 NLoS 状态之间的转移概率<sup>[29]</sup>，能够有效模拟地-地信道的非视距效应。另一方面，以无人车为代表的地面节点具有较强的移动性，信道环境变化造成的非平稳性同样不容忽视。典型的基于 NGSM 的非平稳地-地信道模型可以表示为<sup>[30]</sup>

$$h(t, \tau) = \sum_{l=1}^L a_l(t) s_l(t) \delta(\tau - \tau_l(t)) \quad (4)$$

其中， $a_l(t)$  和  $\tau_l(t)$  分别表示第  $l$  条多径的复系数和时延， $s_l(t) \in \{0, 1\}$  表示多径的出现和消失。该模型包含  $L$  条多径，通过将  $s_l(t)$  建模为马尔可夫过程，能够在一定程度上模拟信道的时域非平稳特性。针对 MIMO 信道，已有研究基于散射体在空间和时间

域的演变过程建立了非平稳的 GBSM，所考虑的场景包括街道<sup>[31]</sup>、高速公路<sup>[32]</sup>、隧道<sup>[33]</sup>等。然而，针对丛林、山地、水面等有人/无人协同系统典型场景，尤其是 NLoS 条件下的非平稳信道模型仍较有限，亟待开展广泛研究。

### 3 通信波形

有人/无人协同通信组网面临拓扑动态变化、通信环境复杂、资源受限等挑战，通信波形作为信息传递的载体，对于构建高效、稳定和可靠的智能通信网络具有重要意义。因此，需明确不同波形特征，充分利用通信波形的灵活性和可配置性，提高通信组网过程中的资源利用效率、抗干扰能力等性能，以满足特定场景中传播环境制约下的通信需求问题。本节选取了可以应用于有人/无人协同的几种典型通信波形，它们各有特点，可满足不同场景下的通信需求。

#### 3.1 正交频复用波形

针对低空通信环境或者低速移动的无人机通信场景，大部分研究采用 OFDM 波形。不同于地面无线通信，该场景存在时变衰落信道的不稳定性问题，节点移动下频偏会造成子载波间干扰（ICI, inter-carrier interference），而多径环境会带来符号间干

扰 (ISI, inter-symbol interference), 因此, 对通信波形的抗干扰性和适应性要求更高。对此, 可通过调整 OFDM 子载波的方式解决, 如使用较少的子信道来提高对 ICI 的稳健性, 以及通过增加子载波来提高对多径环境的稳健性<sup>[34]</sup>。OFDM 波形可以灵活地调整子载波参数以提升组网性能, 不过这种方式会带来一定的导频开销、功率损失和带宽损失等不利影响。基于此, 文献[35]提出了一种自适应的 OFDM 空-地通信导频配置机制; 文献[36]则引入 MIMO 辅助 OFDM 通信, 在不增加功率和牺牲带宽的情况下减少多径衰落的影响, 将不稳定的无线时变衰落信道转化为无明显下降衰落的稳定信道。

### 3.2 基于滤波的多载波波形

在多无人机场景下, 由于无人机的高机动性, 保持多架无人机之间精确的时间同步非常困难, 这可能会导致严重的异步干扰, 从而降低多无人机通信系统的链路性能和可靠性。此时, 传统的 OFDM 波形由于强烈的带外辐射 (OOBE, out-of-band emission) 会带来干扰, 不再适用。同时, 不同于地面无线通信, 无人机空中频谱资源相对有限, 针对多无人机场景则需要频谱资源更加高效地利用, 因此通信波形需要具备更好的频谱利用效率。基于此, 现有研究主要将滤波正交频分复用 (F-OFDM, filtered OFDM) 和滤波器组多载波 (FBMC, filter bank multi-carrier) 2 种基于滤波的波形应用于多无人机系统。OFDM 波形与基于滤波的多载波波形对比如表 3 所示。与 OFDM 最大的不同在于, F-OFDM 针对多个子带增加滤波处理, 这一操作可有效减轻相邻子带的干扰强度, 提高频谱利用率。研究表明, F-OFDM 可以实现更好的 OOBE 抑制性能, 且通过 OOBE 抑制, F-OFDM 的误码率和吞吐量性能均能得到提升<sup>[37]</sup>。而 FBMC 波形则在每个子载波上应用滤波器, 使不同节点的信号在频域上更好地分离, 减少多址干扰, 实现多点协作的高效通信。相比于 OFDM, FBMC 可以带来更高的吞吐量, 在高速移动环境中具有良好的抗干扰性能<sup>[38]</sup>。目前, 此类波

形技术在有人/无人协同系统中的研究还比较有限, 但由于灵活的滤波器设计和配置, 其具有更好的频谱效率、多点精确同步和抗干扰能力等优势, 可能成为未来智能通信组网研究的重点。

### 3.3 正交时频空间波形

当有人/无人机高速移动时, 由于存在严重多普勒效应, 传统的 OFDM 等多载波波形无法保证高质量的数据传输。OTFS 波形技术是一种基于时延-多普勒域的二维调制方案, 在整个时频域进行扩展。其允许高速移动的无人机在时频双选择信道中实现高可靠性、高数据传输速率<sup>[39]</sup>和低能耗通信<sup>[40]</sup>。尽管 OTFS 可根据移动速度和多径传输情况灵活地调整波形参数, 具有对抗信道波动的优势, 但由于其基于块进行数据检测, 可能导致比 OFDM 更高的检测时延<sup>[41-42]</sup>。此外, 针对网络中不同移动速度的节点异构问题, 可借助非正交多址 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术辅助 OTFS<sup>[43]</sup>以及 OTFS-OFDM 多波形共存<sup>[44]</sup>等方式予以解决。当然, 将 OTFS 和 MIMO 结合也是一种潜在的研究方向。然而, 需要实现复杂的波束成形/预编码设计和低复杂度的检测算法等关键技术以充分利用所有可用的空间自由度。

### 3.4 通感一体波形

近年来, 通信感知一体化技术迅速发展<sup>[45]</sup>, 其通过同一束射频信号实现通信和感知功能, 提升能量效率。针对有人/无人协同系统, 一方面, 通感一体波形可以灵活地调整传输功率和感知参数, 适应不同的通信覆盖范围和功耗要求; 另一方面, 通感一体波形有助于有人/无人协同系统感知环境实现更恰当的组网。在通信感知一体波形方面, 一种思路是通过调频 (FM, frequency modulation)、调相 (PM, phase modulation)、调幅 (AM, amplitude modulation) 等方式将通信符号嵌入感知波形中, 如调频连续波 (FMCW, frequency modulated continuous wave)<sup>[46]</sup>。虽然这种以感知波形实现通信功能的方式功耗低且实现简单, 但只能支持非常低的

表 3 OFDM 波形与基于滤波的多载波波形对比

通信波形	多载波	循环前缀	时域正交性	频域正交性	滤波粒度	OOBE
OFDM	是	是	正交	正交	全频带	高
F-OFDM	是	是	非正交	准正交	子带	低
FBMC	是	否	实域正交	实域正交	子载波	较低

数据速率<sup>[47]</sup>。另一种思路是将感知和通信 2 种波形联合设计。例如，文献[48-49]将感知和通信波形加权组合，并优化得到的发射波束图矢量使通信速率最大。文献[50]提出了一种将 OTFS 和 FMCW 波形正交叠加的波形技术，通过推导 OTFS 和 FMCW 波形之间的关系，发现 FMCW 信号在从时频域转换到时延-多普勒域时被压缩并具有类似特征值的特性，即可以在时延-多普勒域中对 FMCW 信号进行压缩和改变参数，从而实现对信号的灵活处理和优化，因此，对 FMCW 信号进行 OTFS 调制为改善通信系统性能提供了新的可能性。但是，针对具有一定规模的无人机集群，必须充分考虑 ISAC 波形级别上的自干扰和多无人机级别上的互干扰。同时，基于 ISAC 波形通信也极大可能带来被窃听或者干扰机攻击的问题，解决这个问题的一种常见方法是将人工噪声嵌入 ISAC 波形中<sup>[51-52]</sup>。特别地，文献[52]在传输通信符号的基础上加入人工噪声以干扰窃听器，通过联合设计数据波束和人工噪声，在雷达感知所需的最小信干噪比约束、反射系数和总发射功率的约束下，最大化可实现的总保密速率。此外，还可以结合加密技术、隐蔽通信、频谱管理和物理层安全等方法来确保通信的安全性和机密性。综上所述，本节阐述了现有可以应用于有人/无人协同系统的几种主流通信波形技术，典型通信波形技术对比如表 4 所示。在实际应用中需要综合考虑场景需求、波形特征、优劣等因素，选择合

适的通信波形技术来实现高效可靠的有人/无人协同通信。

## 4 有人/无人协同混合组网技术

有人/无人协同系统通过自组织网络构建有人/无人集群网络，使有人系统与无人系统在决策、行动上形成互补，与单纯的有人或无人系统相比，其在任务管理、协同控制与平台互操作等方面更具有自主优势。然而，有人系统与无人系统在行为上的差异也使两者在网络部署中存在区别，有人系统作为指挥控制中心连接地面控制站与无人系统，无人系统在有人系统的指控牵引下作为前突集群完成目标识别、跟踪监视等任务。在不同的任务需求下，有人/无人系统运动姿态与组网拓扑也不断发生变化，带来的节点间链路频繁变化与资源动态配置，使有人/无人协同系统的网络管理变得困难。因此，如何基于有人系统和无人系统构建高可靠、稳健的智能集群网络成为亟待解决的关键问题，具体包括网络架构设计、传输协议、资源分配等问题。

### 4.1 网络架构

有人/无人平台类型繁多、任务各异、区域分散，为了形成有序、高效的指控体系，需要构建稳健、灵活的网络架构。一般来说，有人/无人协同系统由地面控制站、有人平台和无人平台等关键节点组成。地面控制站负责汇聚战场态势信息并进行指挥决策，是整个系统的“大脑”。有人平台在地面控

表 4 典型通信波形技术对比

通信波形	适用场景	多径补偿	多普勒补偿	优点	缺点
OFDM	低空、低移动性、单无人机	是	否	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 误码率较低</li> <li>• 抗多径衰落</li> <li>• 时延较小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 带来导频开销、功率和带宽损失</li> </ul>
F-OFDM	低移动性、多无人机	是	否	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 误码率低</li> <li>• 吞吐量大</li> <li>• 频谱利用率高</li> <li>• 同步信令开销小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可能出现子带间干扰问题</li> <li>• 滤波操作复杂度较高</li> <li>• 时延较大</li> </ul>
FBMC	低移动性、多无人机	是	否	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 抗多径干扰能力较强</li> <li>• 可多点同步，同步信令开销较小</li> <li>• 吞吐量大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对频偏和时域扩展比较敏感</li> <li>• 时延大</li> </ul>
OTFS	高移动性	是	是	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 避免频偏问题</li> <li>• 抑制符号间干扰</li> <li>• 谱效较高</li> <li>• 能耗低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 复杂度高</li> <li>• 时延大</li> </ul>
通感一体	载荷轻量化、资源受限	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 时延小</li> <li>• 能耗低</li> <li>• 简单易实现</li> <li>• 高频谱利用率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 传输速率较低</li> <li>• 抗干扰、安全性较差</li> <li>• 尚在起步阶段</li> </ul>

制站的信息支援和指挥引导下，负责对无人平台进行实时监控、任务重规划、任务支援等，是地面控制站与无人平台之间的网关，是整个系统的“躯干”。无人平台负责末端的信息侦察、编队控制、协同攻击等，是整个系统的“眼睛”和“手”。

根据平台的任务分工并结合指挥控制流程，有人/无人协同通信网络架构应为“地面控制站-有人平台-无人平台”的分层分簇的自组织网络架构<sup>[53]</sup>，如图 2 所示。有人平台作为簇首和网关节点，与地面控制站进行信息交互，并作为网络管理节点，进行簇内网络拓扑更新和无人平台出入簇管理等；无人平台作为普通簇成员节点，初始时保持与地面控制站通信，在完成组网后其通信业务经簇首节点转发。有人平台之间采用宽带自组织主干网连接，因为有人平台相对安全，且通信能力较强，建立稳定或近似稳定链路条件成熟，采用主干网结构，有利于形成移动信息环路。此外，为了进一步扩大任务覆盖范围，在地面控制站和有人平台之间可以部署通信中继，它们既可以是有人平台也可以是无人平台。

簇内网络架构则更灵活，根据任务不同既可以是集中式网络，由有人平台担任中心控制节点，也可以是分布式自组织网络，有人平台和无人平台角色对等，簇内节点可以直接通信。集中式网络中，有人平台统一协调其他无人节点的通信，如图 3(a)

所示。中心节点收集和处理簇内所有无人平台的信息，然后统一进行通信决策，网络管理效率较高。这种自组织网络方式要求中心节点具有较多的资源，而有人平台正好可以满足。其不足之处是中心节点易成为网络瓶颈，网络稳健性不高。相比于集中式网络架构，分布式自组织网络中节点能够根据邻居信息或全网信息自主进行决策和行动，对于网络或环境变化具有更高的稳健性<sup>[54]</sup>，如图 3(b)所示。无人平台之间可以通过直连链路或路由方式获取所需的决策信息。这种思路可以有限地支持一般无人系统组网，但随着系统规模的增大、突发性业务的增加，信道的接入竞争与数据包冲突加剧，通信性能会受到极大影响。特别是还可能存在着物理打击和恶意干扰的情况，就更需要利用灵活的通信组网机制。为此，文献[55]提出了一种网络结构自适应算法，使网络根据链路连接情况自动在集中式、分布式和协同中继等网络结构中进行自主切换。

现有的网络，例如蜂窝网络、地面互联网和空中无人机网络等，网络架构比较单一和固定，而有人/无人协同组网的架构更多样和灵活，可根据任务进行调整。另外，两者之间也具有很强的关联性，有人/无人协同组网是以传统网络为基本单元，按照任务和需求进行编排和组合。从架构上来说，传统的网络可以融入有人/无人协同组网架构中。

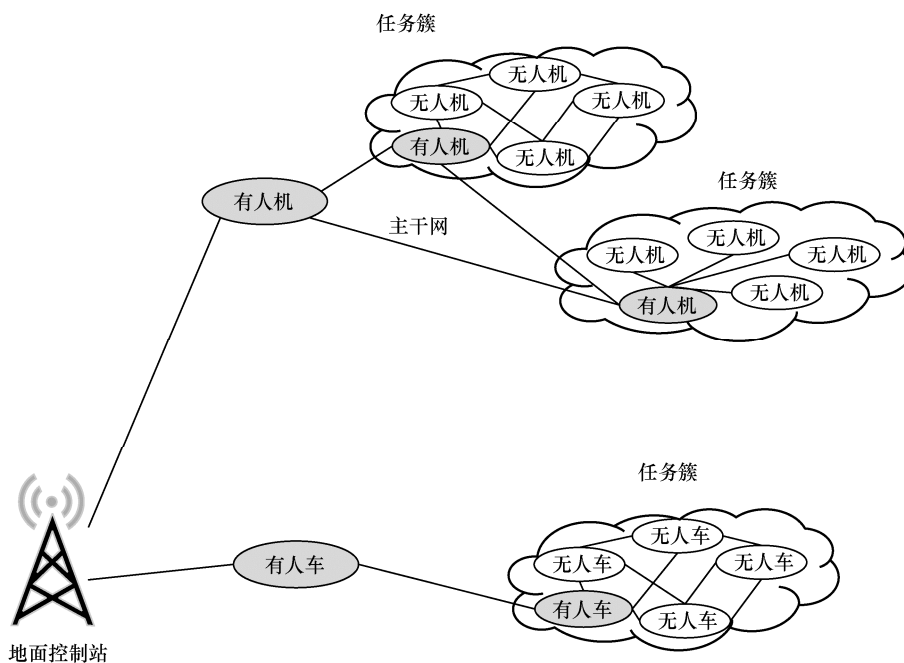
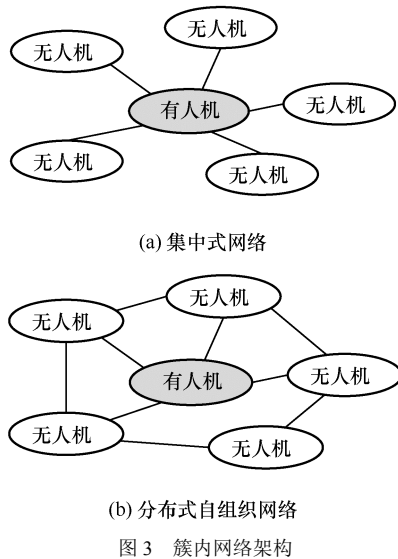


图 2 有人/无人协同通信网络架构



需要说明的是，高效的有人/无人协同需要开放、灵活的网络架构的支持。图 2 和图 3 所示的分层分簇的网络架构只是一种基本的形态，实际任务中应依据有人/无人协同的典型应用模式（一般可分为主从式、协作式、混合式<sup>[56]</sup>），在此基础上进行扩展和调整。因此需要针对不同的任务和场景，采用相应的协同模式和网络架构，才能发挥最大的网络效能。此外，随着以“星链”为代表的卫星互联网的兴起和国家战略需要，卫星网络-无人平台网络-地面网络组成的空天地一体化网络架构也是未来有人/无人协同组网架构的一种重要发展趋势。

#### 4.2 组网协议

有人/无人协同组网中，传输协议决定着网络资源的接入、分配和调度，对于保证网络性能至关重要<sup>[57]</sup>。协议设计需要综合考虑节点的移动性、数据传输的时效性、通信开销等关键因素，以实现有人/无人节点稳定可靠的信息交互，更好地完成复杂的协作任务。有人/无人协同构建的无线通信网络通常可以分为全向通信网络和定向通信网络。全向通信网络通常采用低频频段（Sub-6 GHz），无线节点可以在各个方向上同时辐射信号，并在通信范围内的各个方向上接收到其他节点的信号。全向通信虽然便于网络拓扑的管理，但也带来了严重的干扰问题。因此，如何避免冲突成为全向通信网络协议设计的关键。在文献[58]提出的混合载波监听多址接入（CSMA, carrier sensing multiple access）/时分多址接入（TDMA, time division multiple access）的介质访问控制（MAC, medium access control）协议中，

每个节点通过监听和分析邻居节点的帧信息来构建自己的帧信息，再根据帧信息中的区域标记选择时间槽进行访问。如果节点发现自己的邻居节点的区域标记与自己不同，它将选择一个随机的空闲时间槽接入信道，实现了信道快速接入和零碰撞概率。此外，当分布式无人网络存在外部恶意干扰时，需要解决节点如何可靠地接入信道的问题。文献[59]提出了一种基于信道跳变的盲交汇算法，该算法设计了一种发送节点快速跳变、接收节点信道等待的盲交汇机制，并对接收节点的信道停留时隙数的最优值进行了理论分析与验证。在有限时间内无人节点可以实现保证性交汇，有效解决了多无人机网络的分布式交汇问题。为了进一步缓解频谱资源的竞争问题，一些学者研究了能实现空域复用的高频段、定向组网问题。文献[60]通过结合波束成形技术，有效提高毫米波的空间复用、抑制干扰能力。但是对于高速移动的无人机，其网络拓扑会随着时间快速变化。因此，如何在保证服务质量（QoS, quality of service）的前提下，快速地建立或可靠地维护通信链路是影响系统性能的关键问题<sup>[61]</sup>。文献[62]提出了一种利用角域信息的波束管理方案，首先，基于高斯过程机器学习算法预测邻居节点的位置，以进行角度域的粗略获取；然后，利用无人机聚类算法实现了对角度域信息的粗校准，减少了波束的搜索空间，在限定的角度内进行单波束或多波束追踪，进一步加快了搜索过程。虽然该研究提出的算法旨在降低计算复杂性，但其性能依赖于角度域信息的获取，当通信环境发生较大变化时，难以实现精准的波束跟踪。网络定向传输时，依据先验知识辅助建立通信链路能够加快收敛速度，因此，文献[63]提出了一种基于强化学习的 MAC 协议，利用当前和过去的先验知识以及邻居信息来构建环境的奖励，自适应地调整扫描的波束数量和 Quorum 序列大小，以减少预期发现周期中的时隙数量，加快节点的邻居发现过程。但是由于 Quorum 机制固有的缺陷，当网络规模增加时，收敛时间呈线性增长，难以满足时延敏感任务对于时延的要求。由于全向通信在拓扑维护方面具备优势，高频定向通信在高速传输、抗干扰方面具备更好的性能，可以结合两者的优势，采用双频协作的方式提升网络的传输性能。例如，文献[64]针对毫米波网络分布式架构管理效率低、稳健性不佳等问题，提出了一种同时支持高低频的 MAC

协议。该协议通过低频信号承载控制面，高频信号承载数据面，实现了控制面与数据面的解耦。由一个中心控制节点通过低频全向链路控制其周围的无线接入节点与终端，两者的数据传输则可以通过高频定向链路完成。当高频定向链路质量下降时，低频全向链路依旧可以保持连接。因此，可以利用低频全向链路传输的控制信息辅助高频定向链路的重建与恢复。

### 4.3 资源分配

在有人/无人协同智能组网中，节点通常需要共享有限的通信资源，以传输节点的指挥控制、协同信息和业务数据。无人机网络中的时空高动态性和任务复杂性使通信需求随着时间和空间发生快速变化。因此，如何快速、合理地分配时间、频率、空域、功率等资源，避免冲突和干扰，实现网络效用的最大化，是有人/无人协同智能组网中需要重点考虑的问题。在时域方面，需要针对性地设计帧结构和合理地分配时隙资源，以提高频谱效率、减少等待时延。例如，可以根据业务需求和网络状态动态调整时隙大小和分配方式，以满足不同优先级业务的时域需求。在频域方面，需要对频率资源合理划分，以在提升频谱利用率的同时减少干扰。例如，可以根据业务类型和网络负载情况，动态调整带宽的划分和频率资源的分配。在空域方面，波束管理机制仍是制约定向通信网络性能的关键因素，需要对空间资源进行合理划分，保证不同优先级的业务能够按需获取最优的链路调度方案，同时降低冲突和开销。例如，可以利用波束成形技术，动态调整波束指向和大小，以优化空间资源的利用并提高链路质量。此外，由于无人机间链路干扰的存在，可以通过合理调整功率大小，在满足 QoS 要求的前提下，提高能量效率。

针对多无人机与地面用户下行通信的需求，文献[65]提出了一种基于多智能体强化学习 (MARL, multi-agent reinforcement learning) 的资源分配框架，每个无人机的目标是找到一个资源分配策略，以最大化预期回报。在优化过程中，将每个无人机作为一个独立的智能体，根据其局部观察结果通过学习来发现其最佳策略，通过最大化长期奖励来优化用户、功率和子信道的选择策略，实现了在期望奖励与信息交换开销之间的平衡。针对图 1 中的热点区域覆盖场景，文献[66]根据无人机网络时空动态通信特性，将通信资源分配问题建模为链路公平

因子加权下的网络总容量最大化问题，并分别提出了基于对偶的迭代搜索算法和序贯穷举分配算法来联合优化时隙分配、天线指向和发射功率。无人机通过控制链路，将自身的状态信息和通信需求发送给地面控制中心。地面控制中心将计算出的决策信息下发给各个节点，每个节点根据所分配到的时、空、功率资源完成数据的传输。结果表明，该资源分配算法有效提升了平均吞吐量、时隙分配公平性方面的性能。

随着有人/无人协同执行任务的种类以及场景的复杂化、多样化，资源优化的计算复杂度也呈指数级增长，对适应性、时效性提出了挑战。传统的资源分配方案，大多数基于静态场景的假设，或者在信道状态信息已知的情况下进行资源优化方案的求解，难以适应动态变化的场景。而基于机器学习的方法计算复杂度较高且短时间内难以收敛，难以保证实时性。因此，设计有效的资源分配方案也是未来有人/无人协同智能组网实现高效、可靠和可持续运行的关键。

## 5 通信与智能协同的融合

无人机集群、无人车集群和智能机器人集群等设备具有机动性高、组织灵活和抗打击等一系列优点，将多个具备自主学习和决策能力的无人节点和有人设备以自组织网络的形式相互连接构成大规模的有人/无人集群网络，协同完成态势感知、目标侦查和集群对抗等任务，可以有效发挥群体智能协同优势。然而，面对复杂多变且呈强对抗特性的外部电磁环境，集群系统中异构设备的感知、通信和计算等能力受限，难以观测全局环境状态信息进行优化决策，制约了有人/无人集群网络协同应用的实际效能。因此，构建高效的通信与智能协同融合策略成为提升有人/无人集群平台整体效能的关键。

### 5.1 智能适变通信机制构建

针对强对抗、通信压制等外部复杂电磁环境对多个网络节点协作带来的通信瓶颈问题，有人/无人集群系统需要构建完备的基于场景驱动的智能适变引擎，使有人/无人节点能够具备“理解-学习-适变”的自适应通信能力<sup>[67]</sup>。首先，智能引擎感知外部实时动态变化的频谱资源、信道状态和网络拓扑等信息，并通过多维特征提取与信息融合生成准确的通信模型；其次，针对特定的通信环境，智能

引擎通过人工智能算法构建网络参数与环境的匹配机理，并决策出最优的通信波形和网络结构参数；最后，基于历史数据和经验知识的积累，智能节点能够将智能学习模型迁移到未知的环境中，并可不断生长与变异，从而促使节点完成从“被动调节”到“主动适变”的能力转变。强化学习作为一类特殊的人工智能算法，可以有效构建智能体与外界环境之间的交互策略，实现对通信环境的理解、识别和网络参数适配。进一步地，对于大规模的有人/无人系统，网络中存在多个通信节点，此时，简单的强化学习已经无法满足需求，需要将其扩展为多智能体强化学习模型。在多智能体强化学习模型中，每个智能体获得的增益除了取决于自身的动作，还会受到其他智能体动作的影响。因此，设计多智能体协作学习模型，实现网络整体效能提升成为关键<sup>[65,68]</sup>。

此外，要实现细粒度的通信波形匹配并对网络参数进行灵活配置，其首要前提是有人/无人设备需要具备软件定义和可重构的能力，软件无线电技术为其实现提供了可能。但是，现有的软件无线电平台软硬件异构性强且算力受限，不足以支撑高性能智能算法的实现。因此，突破软件定义无线电平台与智能适变引擎之间的瓶颈约束，研究基于软件定义无线电架构的智能通信设备是一个重要发展方向<sup>[69]</sup>。

## 5.2 部分观测下的通信协作

考虑在实际的应用场景中，各有人设备和无人设备受发射功率、物理尺寸等因素的影响，观测范围受限，无法获取完整的环境状态信息。为了实现多集群单元分布式控制，将各单元作为独立的智能决策个体，采用多智能体强化学习策略对自身的动作进行自适应调整。然而，在多智能体强化学习过程中，各智能体根据自身观测做出的动作将会对其他智能体的策略产生密切的影响，从而造成多智能体环境存在非平稳性，严重威胁训练的稳定性。为了缓解非平稳性问题，文献[70]提出了最广泛应用的中心评价方法，其采用集中式训练、分布式执行方案：在训练过程中，通过智能体间的参数共享将全局状态信息集中输入评价或混合网络中以提升训练的稳定性；在执行阶段，各智能体仍然独立进行决策，例如多智能体深度确定性策略梯度(MADDPG, multi-agent deep deterministic policy gradient)算法<sup>[68]</sup>和基于值学习的多智能体强化学习

协作 QMIX (Q-decomposition multi-agent independent extension) 算法<sup>[71]</sup>均采用了该框架。以上机制需要专门的控制中心进行集中式训练，对于小规模数据，其训练效率较高、效果较好；对于大规模数据或者计算资源受限的训练器，其训练时间将呈指数级增加，并且对控制中心的依赖较大，网络不够稳健。

为了提升大规模数据训练的效率，现有工作致力于研究基于消息传递机制的多智能体协作。针对多智能体在部分观测环境中执行协作任务的场景，文献[72]提出了一种基于注意力机制的多智能体通信协议，该方案允许智能体之间通过发送-接收软注意力机制和多轮协作推理进行针对性的持续通信来获得更高的任务奖励。但是，其复杂的实现步骤和连续消息传输也加重了智能体间通信协作的负担。文献[73]利用时间消息控制机制来改进基于代理间消息交换的多智能体强化学习框架，在有损网络环境下相比于基准算法可以获得更优的传输开销和稳健性。为了解决部分观测限制和分布式架构引起的多智能体联合决策性能恶化的问题，文献[74]提出了一种多智能体离散通信方案促进无人机集群间的协作决策，相比于 QMIX 等主流多智能体算法获得了显著的性能提升。在部分观测的实际应用场景中，基于消息传递机制的多智能体协作通信比观测信息共享更具有对非平稳环境的自适应能力。多个智能体以消息为纽带，相互形成了一种介于完全集中和完全独立之间的状态<sup>[75]</sup>，不仅可以抵消分布式决策过程中的非平稳性，还额外提升了智能体的协作程度。但是，由于多智能体通信协作过程中涉及复杂的信息交互与传递，该框架下的神经网络模型结构和通信协议的设计成为影响多智能体协作效果的关键。此外，需要说明的是，集中式学习方法、分布式学习方法和其他学习方法都有其自身的优缺点和场景适用性，因此，需要根据实际应用选择相应的学习方法。

## 5.3 弱通信下的信息协同

有人/无人集群的可用频段有限，随着集群规模的增大，其频谱资源会愈发匮乏。此外，复杂环境中可能出现的强对抗、通信压制等情况也为集群协作通信与组网带来了严重的威胁。因此，以频谱受限、电磁干扰、强对抗等为典型特征的弱通信环境成为有人/无人集群协作的掣肘。为了缓解这个问题，现有研究主要从两方面来增强弱通信条件下的

集群协作能力：一方面，通过主动减少通信的方式来降低多智能体通信的频率和限制冗余信息的交互，减少带宽占用；另一方面，从信息熵的角度衡量所构建消息的信息量，通过信息压缩的方式使智能体构建的消息低于可用信道容量，提升传输效率。为了减少冗余信息的传输，文献[76]采用完全图对智能体之间的交互关系进行建模，并提出了一种基于两阶段注意网络的博弈抽象机制，决定智能体之间是否存在交互以及各交互信息的重要程度。针对受限带宽对通信传输带来的瓶颈问题，文献[77]提出了一种门控机制来自适应地剔除冗余信息，仿真结果表明，所提方法可以在不影响系统性能的情况下减少 80%以上的冗余信息传输。文献[78]提出了一种信息多代理通信方法来实现多智能体通信协议与调度，并从通信理论的角度证明了有限带宽约束条件下低熵信息传输的必要性。文献[79]提出多智能体通信需要一种公共的语言进行信息交互，通过自动编码学习表征，多智能体之间可以相互理解和响应彼此实现分布式协作。进一步地，文献[80]提出了一种面向智能体的语义通信架构与范例，并从有效性和可靠性两方面分析了语义通信性能指标和评估方法。然而，语义通信作为一种新型的通信方式研究起步较晚，要将其应用到有人/无人集群协作通信中仍然存在有待完善的方面，例如，如何在弱通信条件下提取文本、图像、声音等多模态信息的语义特征，设计符合有人/无人集群网络的语义组网协议等。

## 6 未来展望

随着人工智能、云/边缘计算和智能通信等技术的快速发展，有人系统与无人集群协同将能完成感知、判断、决策和行动上的智能闭环，但是目前仍然有很多问题值得深入研究，需要进一步发展的方向包括以下几个方面。

### 6.1 场景认知与建模

有人/无人集群网络是由多种功能各异的智能体设备混合互连而成的集合，其面临的用户需求、电磁环境以及网络状态等多域信息均会随着时间和空间的不同发生显著的动态变化。为推动有人/无人集群网络智能化的发展需求，赋予其场景认知的能力成为必要前提。有人/无人设备通过对复杂动态变化的多域信息进行快速感知，主动识别和构建强对抗、高时敏、高动态等复杂通信场景，为基于

场景驱动的资源分配、自适应组网等决策提供了输入条件。此外，基于构建的通信场景和场景驱动下的网络行为，系统可以将网络物理空间映射到网络知识空间，综合运用语义理解与知识挖掘等技术，将大量孤立、异构、碎片的网络空间数据有机融合到易于智能体理解的网络知识体系中，从而有效提升系统的自主推理与演绎进化的能力。然而，用户需求、电磁环境与网络状态等多域信息之间存在不同程度的耦合效应，如何利用大数据技术对不同维度空间的状态、信息和数据进行采集、融合和知识表征成为关键。

### 6.2 信息物理融合通信

与传统通信网络节点相比，有人/无人节点在任务场景、平台能力和性能需求等方面都有本质区别，其通信组网一方面要应对由节点高速移动、大规模集群导致的网络资源竞争难题，另一方面可利用其独特的自主性和移动性来改善通信效能。因此，可以利用信息物理融合的思想<sup>[81]</sup>，即将信息域的通信组网、计算与物理域的移动控制（如轨迹规划）进行联合设计，跳出传统通信决策维度单一的固化思维，即只优化通信波形或组网协议参数，挖掘信息域和物理域紧密耦合对通信组网的指导作用，即将通信波形、组网协议、轨迹规划等进行一体化优化调度，从而达到提升通信组网性能，增强节点智能化水平的目标。然而，目前信息物理融合的通信组网方法还面临信息域与物理域的异质性导致耦合模型难以量化、瞬变的信息域与缓变的物理域难以匹配等核心难题，亟待从信息物理融合组网理论架构、面向信息物理融合的网络构建和支撑信息物理融合的资源分配等方面进行研究。

### 6.3 语义通信

有人/无人通信系统依赖多智能体间协同解决一系列复杂任务，需要不同智能体间频繁、高效和可靠地交换与任务相关的信息。现有的通信系统仅关注通信符号的准确传输，不关注传输信息中与任务相关的内容，浪费了通信资源，难以满足数据密集型 and 时延敏感型的有人/无人系统对多智能体间协同通信的要求<sup>[82]</sup>。而以准确传达信息内容含义为核心，语义通信<sup>[83]</sup>有潜力在有人/无人通信系统中发挥巨大作用。通过增强通信终端对传输信息内容的语义理解与推理能力，在部分数据错误的情况下仍能准确传达信息含义给对方，实现强对抗、恶劣

通信环境中高效、可靠的信息传输。另外,在相同的信道容量下,语义通信发送端根据任务目标分析、个性化语义特征提取和情感分析对待传输的信息进行信息新鲜度分析、信息内容含义重要度排序以及对与任务相关的数据进行语义特征提取等处理。通过直接传输必要的信息语义代替传输信息数据的方式,在信息压缩的技术上进一步减少信息传输所需的比特数量,用更少的数据量传输更多的信息含义,这有助于支撑有人系统和无人系统间的高效协同通信。更重要的是,语义通信主要是基于收发双方的上下文知识建立的,同样的一句话,对于了解背景的合法接收方而言可能包含重大信息,而对于不了解背景的窃听者而言可能毫无意义,因此语义通信还能在了解背景知识的无人系统间达到更好的隐蔽通信效果。此外,结合语义传输的有人/无人通信系统面临诸多挑战,例如,目前还没有成熟的语义传输理论模型作为指导;当有人/无人通信系统处理特定任务时,面向任务的语义传输策略可能极其复杂;学习出的语义特征的不可解释性为进一步优化模型制造了困难等。

## 7 结束语

本文从应用场景与需求、信道建模、通信波形、有人/无人协同混合组网技术、通信与智能协同的融合和未来展望 6 个方面对有人/无人协同的智能通信与组网技术进行了总结与思考。首先,有人/无人协同通信网络因其自主性和灵活性可广泛应用于热点区域覆盖、应急救援、侦察监视和联合行动等领域,发展前景可观。其次,从通信传输的角度介绍了有人/无人机间信道建模和新型通信波形关键技术研究和挑战。随后,提出有人/无人平台固有的设备异构性需要灵活、高效的自组织网络技术,包括网络架构、组网协议、资源分配等。此外,针对有人/无人平台在实际应用中可能面临的强对抗、弱通信等复杂环境,从通信与智能协同融合的角度研究了部分观测下的通信协作和弱通信下的信息协同,以实现物理域与信息域的能力转换与增强。最后,为了应对现有有人/无人系统在通信传输、混合组网技术以及群体智能等方面智能能力不足的缺陷,从场景认知与建模、信息物理融合通信以及语义通信等角度进行了展望,以期有人/无人系统智能化发展赋能。

## 参考文献:

- [1] 陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1270-1274.  
CHEN J, XIN B. Key scientific problems in the autonomous cooperation of manned-unmanned systems[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(9): 1270-1274.
- [2] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [3] 刘树光, 王欢. 有人/无人机协同编队控制研究综述[J]. 飞行力学, 2022, 40(5): 1-8.  
LIU S G, WANG H. Review on cooperative formation control for manned/unmanned aerial vehicles[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(5): 1-8.
- [4] 于星棋, 陈春, 王渊. 联合作战条件下有人机与无人机蜂群协同作战研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(10): 5-6, 29.  
YU X Q, CHEN C, WANG Y. Research on the cooperative operation of drones and man-machine swarm under the condition of joint operation[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(10): 5-6, 29.
- [5] 黄松华. 有人/无人作战体系架构和协同机制研究[C]//2019 第七届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2019: 171-175.  
HUANG S H. Research on the architecture and collaborative mechanism of manned/unmanned combat systems [C]//Proceedings of the 7th China Command and Control Conference. Beijing: Chinese Institute of Command and Control, 2019: 171-175.
- [6] ZHAO H T, WANG H J, WU W Y, et al. Deployment algorithms for UAV airborne networks toward on-demand coverage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 2015-2031.
- [7] YUN W J, PARK S, KIM J, et al. Cooperative multiagent deep reinforcement learning for reliable surveillance via autonomous multi-UAV control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(10): 7086-7096.
- [8] YANG H L, RUBY R, PHAM Q V, et al. Aiding a disaster spot via multi-UAV-based IoT networks: energy and mission completion time-aware trajectory optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5853-5867.
- [9] LIN L, XU W J, CHEN W, et al. Prioritized delay optimization for NOMA-based multi-UAV emergency networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(10): 11222-11227.
- [10] 叶海军, 王国峰, 冯志勇. 有人无人网络化信息系统动态协同技术研究[J]. 通信学报, 2023, 44(7): 185-196.  
YE H J, WANG G F, FENG Z Y. Research on dynamic cooperative technology of manned and unmanned networked information system[J]. Journal on Communications, 2023, 44(7): 185-196.

- [11] GE C L, ZHANG R N, JIANG Y, et al. A 3-D dynamic non-WSS cluster geometrical-based stochastic model for UAV MIMO channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(7): 6884-6899.
- [12] MICHAILEDIS E T, NOMIKOS N, TRAKADAS P, et al. Three-dimensional modeling of mmWave doubly massive MIMO aerial fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1190-1202.
- [13] CHANG H T, BIAN J, WANG C X, et al. A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 70719-70732.
- [14] XU J P, CHENG X, BAI L. A 3-D space-time-frequency non-stationary model for low-altitude UAV mmWave and massive MIMO aerial fading channels[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(11): 10936-10950.
- [15] CUI Z Z, GUAN K, HE D P, et al. Propagation modeling for UAV air-to-ground channel over the simple mountain terrain[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [16] LIU Y, WANG C X, CHANG H T, et al. A novel non-stationary 6G UAV channel model for maritime communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 2992-3005.
- [17] MATOLAK D W, SUN R Y. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—part I: methods, measurements, and models for over-water settings[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 26-44.
- [18] CHIU C C, TSAI A H, LIN H P, et al. Channel modeling of air-to-ground signal measurement with two-ray ground-reflection model for UAV communication systems[C]//*Proceedings of the 30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 251-256.
- [19] LI Y P, WANG W M, GAO H Q, et al. Air-to-ground 3D channel modeling for UAV based on Gauss-Markov mobile model[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 114: 152995.
- [20] HUA B Y, NI H R, ZHU Q M, et al. Channel modeling for UAV-to-ground communications with posture variation and fuselage scattering effect[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(5): 3103-3116.
- [21] ZHANG X C, LIU J, GU F L, et al. An extended 3-D ellipsoid model for characterization of UAV air-to-air channel[C]//*Proceedings of the ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [22] AN H, GUAN K, LI W B, et al. Measurement and ray-tracing for UAV air-to-air channel modeling[C]//*Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 415-420.
- [23] 肖振宇, 刘珂, 朱立鹏. 无人机机间毫米波阵列通信技术[J]. *通信学报*, 2022, 43(10): 196-209.
- XIAO Z Y, LIU K, ZHU L P. Millimeter-wave array enabled UAV-to-UAV communication technology[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(10): 196-209.
- [24] CHENG X, LI Y R. A 3-D geometry-based stochastic model for UAV-MIMO wideband nonstationary channels[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1654-1662.
- [25] MA Z F, AI B, HE R S, et al. A wideband non-stationary air-to-air channel model for UAV communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(2): 1214-1226.
- [26] MAO X C, WANG C X, CHANG H T. A 3D non-stationary geometry-based stochastic model for 6G UAV air-to-air channels[C]//*Proceedings of the 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [27] 马张枫. 面向 B5G/6G 无线网络的无人机信道建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- MA Z F. Research on UAV channel modeling for B5G/6G wireless network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [28] ALEKSIEJUNAS R, CESIUL A, SVIRSKAS K. Spatially consistent LOS/NLOS model for time-varying MIMO channels[C]//*Proceedings of the 2018 Baltic URSI Symposium (URSI)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 61-64.
- [29] MATOLAK D W, SEN I, XIONG W H. The 5-GHz airport surface area channel—part I: measurement and modeling results for large airports[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2014-2026.
- [30] 谢诗昂, 张晓瀛, 孔凌劲, 等. 战术自组网下非平稳信道测量与建模[J]. *信号处理*, 2022, 38(8): 1719-1727.
- XIE S A, ZHANG X Y, KONG L J, et al. Measurement and modeling of non-stationary channel in tactical mobile ad hoc network[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(8): 1719-1727.
- [31] LIANG X L, ZHAO X W, LI Y T, et al. A non-stationary geometry-based street scattering model for vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[J]. *Wireless Personal Communications*, 2016, 90(1): 325-338.
- [32] HONG J Y, KIM C S, LIM J S, et al. Non-stationarity of vehicle to vehicle channels using correlation or covariance in highway scenarios[C]//*Proceedings of the 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1546-1548.
- [33] 邓炳光, 秦启航, 孟凡军. 隧道场景下非平稳多簇 V2V 信道建模与分析[J]. *无线电工程*, 2022, 52(8): 1361-1367.

- DENG B G, QIN Q H, MENG F J. Modelling and analysis of nonstationary multi-cluster V2V channel in tunnel scenario[J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(8): 1361-1367.
- [34] JACOVIC M, BSHARA O, DANDEKAR K R. Waveform design of UAV data links in urban environments for interference mitigation[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [35] RAO R M, MAROJEVIC V, REED J H. Rate-maximizing OFDM pilot patterns for UAV communications in nonstationary A2G channels[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [36] TAN X P, SU S J, GUO X J, et al. Application of MIMO-OFDM technology in UAV communication network[C]//*Proceedings of the 2020 2nd World Symposium on Artificial Intelligence (WSAI)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [37] LI Y R, LIN H P, WANG J L, et al. Multi-UAVs payload data communication with asynchronous access[C]//*Proceedings of the 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-2.
- [38] MATOLAK D W, JAMAL H. Aviation multicarrier communication system performance in several 5 GHz band air-ground channels - invited paper[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [39] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//*Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [40] HAN R, MA J H, BAI L. Trajectory planning for OTFS-based UAV communications[J]. *China Communications*, 2023, 20(1): 114-124.
- [41] YUAN W J, LI S Y, WEI Z Q, et al. New delay Doppler communication paradigm in 6G era: a survey of orthogonal time frequency space (OTFS)[J]. *China Communications*, 2023, 20(6): 1-25.
- [42] 桑万超, 高晖. 面向无人网络的通信感知一体化的高效能波形选择方法[J]. *无线电通信技术*, 2023, 49(1): 133-142.
- SANG W C, GAO H. High-efficiency waveform selection method for the integrated sensing and communication system in UAV network[J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(1): 133-142.
- [43] DING Z G, SCHOBER R, FAN P Z, et al. OTFS-NOMA: an efficient approach for exploiting heterogenous user mobility profiles[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(11): 7950-7965.
- [44] WU Y C, ZHANG Z Q. Co-existence analysis of OTFS and OFDM waveforms for multi-mobility scenarios[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [45] ZHOU W X, ZHANG R Y, CHEN G Y, et al. Integrated sensing and communication waveform design: a survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1930-1949.
- [46] LIU Y, LONG W X, CHEN R, et al. Vortex wavefront FMCW ISAC model: a blender-based evaluation[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 431-435.
- [47] 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.
- [48] LYU Z H, ZHU G X, XU J. Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(4): 2424-2440.
- [49] DENG C L, FANG X M, WANG X B. Beamforming design and trajectory optimization for UAV-empowered adaptable integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8512-8526.
- [50] ZEGRAR S E, RAFIQUE S, ARSLAN H. OTFS-FMCW waveform design for low complexity joint sensing and communication[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 988-993.
- [51] FEI Z S, WANG X Y, WU N, et al. Air-ground integrated sensing and communications: opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 55-61.
- [52] JIANG C J, ZHANG C S, HUANG C W, et al. Secure beamforming design for RIS-assisted integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, PP(99): 1.
- [53] 钟赞, 张杰勇, 邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. *指挥信息系统与技术*, 2017, 8(4): 19-25.
- ZHONG Y, ZHANG J Y, DENG C L. Cooperative engagement problems about manned/unmanned aerial vehicles[J]. *Command Information System and Technology*, 2017, 8(4): 19-25.
- [54] CAO X B, YANG P, ALZENAD M, et al. Airborne communication networks: a survey[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 1907-1926.
- [55] WANG H J, ZHAO H T, LI J X, et al. Self-adaptive network architecture reconfiguration in CRNs: demo[C]//*Proceedings of the 17th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2016: 355-356.
- [56] 许莺. 有人机/无人机协同作战技术初探[C]//*第六届中国指挥控制大会论文集*. 北京: 中国指挥与控制学会, 2018: 62-65.
- XU Y. Preliminary study on the technology of cooperative operations between manned and unmanned aerial vehicles[C]//*Proceedings of the 6th China Command and Control Conference*. Beijing: Chinese Institute of Command and Control, 2018: 62-65.

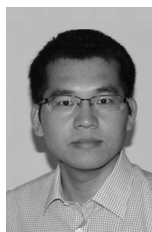
- [57] 董超, 陶婷, 冯斯梦, 等. 面向无人机自组织网络和车联网的媒体接入控制协议研究综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 790-802.  
DONG C, TAO T, FENG S M, et al. Overview on medium access control protocol in flying ad-hoc networks and vehicular ad-hoc networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 790-802.
- [58] JIANG A Z, MI Z C, DONG C, et al. CF-MAC: a collision-free MAC protocol for UAVs Ad-Hoc networks[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [59] LI J X, ZHAO H T, WEI J B, et al. Sender-jump receiver-wait: a simple blind rendezvous algorithm for distributed cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(1): 183-196.
- [60] XIAO Z Y, XIA P F, XIA X G. Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: potentials and approaches[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 66-73.
- [61] 徐鹏政, 于启月, 林泓池, 等. 基于毫米波通信的新型机间数据链系统[J]. 通信学报, 2023, 44(4): 27-37.  
XU P Z, YU Q Y, LIN H C, et al. Novel air-to-air data link system based on millimeter wave communication[J]. Journal on Communications, 2023, 44(4): 27-37.
- [62] XU W J, KE Y N, LEE C H, et al. Data-driven beam management with angular domain information for mmWave UAV networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7040-7056.
- [63] JIANG J F, WANG S H, HAN G J, et al. Reinforcement-learning-based adaptive neighbor discovery algorithm for directional transmission-enabled Internet of underwater things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(10): 9038-9048.
- [64] ZHOU P, FANG X M, WANG X B, et al. Multi-beam transmission and dual-band cooperation for control/data plane decoupled WLANs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9806-9819.
- [65] CUI J J, LIU Y W, NALLANATHAN A. Multi-agent reinforcement learning-based resource allocation for UAV networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 729-743.
- [66] WANG H, JIANG B, ZHAO H, et al. Joint resource allocation on slot, space and power towards concurrent transmissions in UAV ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(10): 8698-8712.
- [67] 尹浩, 魏急波, 赵海涛, 等. 一种面向复杂场景的无线通信节点智能适变架构[J]. 中国科学: 信息科学, 2021, 51(2): 294-304.  
YIN H, WEI J B, ZHAO H T, et al. An intelligent adaptative architecture for wireless communication in complex scenarios[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2021, 51(2): 294-304.
- [68] DING R J, XU Y D, GAO F F, et al. Trajectory design and access control for air-ground coordinated communications system with multiagent deep reinforcement learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5785-5798.
- [69] PENG Q, WANG S, WEI J B. A heterogeneous resource deployment strategy of SDR based on meta-heuristic algorithm[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 516-520.
- [70] PAPOUDAKIS G, CHRISTIANOS F, RAHMAN A, et al. Dealing with non-stationarity in multi-agent deep reinforcement learning[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1906.04737, 2019.
- [71] ZHOU Y, MA X Y, HU S T, et al. QoE-driven adaptive deployment strategy of multi-UAV networks based on hybrid deep reinforcement learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5868-5881.
- [72] DAS A, GERVET T, ROMOFF J, et al. TarMAC: targeted multi-agent communication[C]//International Conference on Machine Learning. New York: PMLR, 2019: 1538-1546.
- [73] ZHANG S Q, ZHANG Q, LIN J. Succinct and robust multi-agent communication with temporal message control[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2020, 33: 17271-17282.
- [74] ZHANG X C, ZHAO H T, WEI J B, et al. Cooperative trajectory design of multiple UAV base stations with heterogeneous graph neural networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(3): 1495-1509.
- [75] SUKHBAATAR S, SZLAM A, FERGUS R. Learning multiagent communication with backpropagation[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1605.07736, 2016.
- [76] LIU Y, WANG W X, HU Y J, et al. Multi-agent game abstraction via graph attention neural network[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(5): 7211-7218.
- [77] MAO H, GONG Z, ZHANG Z, et al. Learning multi-agent communication under limited-bandwidth restriction for internet packet routing[J]. arXiv Preprint, arXiv:1903.05561, 2019.
- [78] WANG R D, HE X, YU R S, et al. Learning efficient multi-agent communication: an information bottleneck approach[C]//Proceedings of the Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. New York: ACM Press, 2020: 9908-9918.
- [79] LIN T, HUH J, STAUFFER C, et al. Learning to ground multi-agent communication with autoencoders[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2021, 34: 15230-15242.
- [80] 张亦弛, 张平, 魏急波, 等. 面向智能体的语义通信: 架构与范例[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(5): 907-921.  
ZHANG Y C, ZHANG P, WEI J B, et al. Semantic communication for intelligent agents: architecture and examples[J]. Science in China (Information Sciences), 2022, 52(5): 907-921.

[81] 王海军, 赵海涛, 任保全, 等. 一种面向无人机智能通信的信息物理融合框架[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(11): 2141-2154.

WANG H J, ZHAO H T, REN B Q, et al. An information physics fusion framework for intelligent communication of unmanned aerial vehicles[J]. Science in China (Information Sciences), 2022, 52(11): 2141-2154.

[82] HE G J, FENG M J, ZHANG Y, et al. Deep reinforcement learning based task-oriented communication in multi-agent systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(3): 112-119.

[83] ZHANG Y C, ZHAO H T, WEI J B, et al. Context-based semantic communication via dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2022, 8(3): 1453-1467.



**赵海涛** (1981-), 男, 山东昌乐人, 博士, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为认知无线网络、自组织网络、协同通信等。

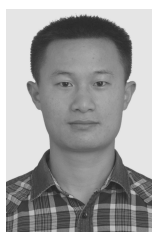


**张姣** (1990-), 女, 湖南汨罗人, 博士, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为无人机组网、边缘计算等。

#### [作者简介]



**尹浩** (1959-), 男, 山东日照人, 博士, 中国科学院院士, 军事科学院研究员、博士生导师, 主要研究方向为军事通信网络、信息系统理论等。



**王海军** (1993-), 男, 安徽濉溪人, 博士, 国防科技大学讲师, 主要研究方向为无人机组网、信息物理融合等。



**魏急波** (1967-), 男, 湖北汉川人, 博士, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信网络协议、通信信号处理、协同通信、认知无线网络等。



**任保全** (1974-), 男, 陕西西安人, 博士, 军事科学院高级工程师, 主要研究方向为物联网、无线通信、移动通信网络技术等。