



研究与开发

意图驱动的无人机集群网络： 管理架构、关键技术与未来展望

李璇, 李海岩, 张璐, 张雨航, 张豪杰
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘 要: 作为空天地一体化网络的重要组成部分, 无人机集群已在紧急搜救、攻防对抗、情报侦察与监视等复杂任务中展示出广阔的应用前景。无人系统技术的升级革新和多机协同智能应用的日益丰富对无人机集群网络的信息交互能力提出新的要求。意图驱动网络架构下, 无人机集群自主管理网络, 简化了网络管理的复杂性。将意图驱动网络引入无人机集群系统, 亟须突破智慧自治网络技术, 提升智能群体面对高动态性和不确定性环境的适应能力, 这为无人机集群的协同操作和智能决策提供了新的视角和方法。围绕意图驱动的无人机集群网络管理架构、关键技术和未来展望展开了深入的分析 and 讨论, 旨在为无人机集群网络的未来发展提供坚实的理论基础和技术参考。

关键词: 无人机集群; 意图驱动网络; 智能策略

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024176

Intent-based UAV swarm network: management architecture, key technologies, and future vision

LI Xuan, LI Haiyan, ZHANG Lu, ZHANG Yuhang, ZHANG Haojie
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: As an integral part to the air, space and ground integrated network, unmanned aerial vehicle (UAV) swarms have shown broad application prospects in complex tasks such as emergency search and rescue, offensive and defensive confrontation, intelligence reconnaissance and surveillance. The advancements in unmanned technology, coupled with the increasingly rich applications of multi-UAV collaborative intelligence, have engendered new requisites for the information exchange capabilities within UAV swarm networks. Under the umbrella of intent-based network architecture, UAV swarms are capable of autonomously managing the network, thereby mitigating the intricacies inherent in network management. Introducing intent-driven network into UAV swarm systems urgently requires breakthroughs in smart autonomous network technology to enhance the adaptability of intelligent groups in high-dynamic and uncertain environments. A new perspective and method for the collaborative operation and intelligent decision-making of UAV swarms was provided. The architecture, key technologies, and prospects of intent-based UAV swarm networks

management were reviewed. Through in-depth analysis and discussion, a solid theoretical foundation and technical reference were aimed to be provided for the future development of UAV swarms.

Key words: UAV swarm, intent-based network, intelligent strategy

0 引言

随着空天地一体化的发展,通过非地面平台组建的大规模网络成为 6G 系统的重要组成部分^[1]。无人机具有高机动、强视距、易部署等优势,增强了空天地一体化网络的灵活性、稳健性和适应性。多机协同的无人机集群已成为国防、安全、制造等领域的变革性战略技术,并在紧急搜救、攻防对抗、情报侦察与监视等复杂任务中展示出广阔的应用前景。多个无人机通过高效的信息交互,构成多机协同的无人机集群,拓展了单机的物理域、信息域和作业范围,可显著提升单机在面对复杂环境和任务时的综合效能。在拥有一定智能水平的无人机集群系统中,具备部分或完全自主能力的无人机可在操作员监控下,通过分布式智能决策,以低成本、高分散的组织形式满足集群的功能需求,以去中心化自组网提升系统高效信息共享、抗故障与自愈能力,以功能分布化提高体系生存率和效率交换比,从而引发了集群代替机动、数量增加能力、成本创造优势的颠覆性变革^[2]。

随着单机异构性、环境动态性的增强,各类智能应用对无人机集群间的信息交互网络提出新的挑战。传统基于规则式算法及预编程行为的网络运维方式效率低、敏捷性差、通用性弱,服务质量难以保障,无法满足未来海量、复杂、高并发的智能业务需求。在传统网络管理与运维中,往往需要大量的人工监督和干预。然而,无人机集群通常需要自主运行,或在难以接近的拒止环境下执行任务,基于人工的集中式网络管理方式是不切实际的。总体来说,当前针对无人机集群网络管理的研究工作还停留在外挂式设计阶段,

仅采用人工智能技术解决特定的网络优化问题,通过补丁式、增量式增强现有网络功能,将难以满足未来无人机集群网络动态、复杂的业务需求。

意图驱动网络是未来网络实现智能化的关键技术之一,可基于人类意愿智能搭建和操作网络,有效提升网络运维效率^[3-6]。将意图驱动网络架构引入无人机集群系统,还具有以下优势。

- 高效集成跨域服务应用:将服务应用与底层网络基础设施之间解耦,引入软件定义网络 (software defined network, SDN) 和网络功能虚拟化等技术,可有效支撑跨域服务需求的高效集成。
- 提升网络性能和策略鲁棒性:引入反馈机制,通过数据驱动的方式持续优化策略模型,确保无人机集群网络面对不可预测环境时的高度可靠性和适应能力。
- 倍增人机群组智能:利用先进的 AI 算法将其转化为具体的网络操作和集群控制策略,确保了无人机集群的网络配置与操作员的目标保持一致,实现人机群组智能的协同释放。

目前,对于意图驱动网络的研究和探索主要聚焦于静态网络^[7-10]。意图驱动的无人机集群网络还面临诸多挑战,包括人机语义难统一、集群自组织行为难建模、意图与策略难匹配等,亟须突破相关技术,提升集群系统面对高动态性和不确定性环境的适应能力,支持业务的敏捷性,最大限度地满足用户的意图。本文提出了意图驱动的无人机集群网络管理架构,该架构主要由意图编排器、意图引擎、智能策略映射引擎、意图及策略反馈层构成,讨论了意图驱动的无人机集群



网络的关键支撑技术，并展望了未来的发展方向及面临的挑战。

1 意图驱动的无人机集群网络管理架构

意图驱动的无人机集群网络管理通过泛化的意图解析与策略映射模型，实现动态集群编队与资源调配，促进无人机集群自主行为进化。本文提出了一种意图驱动的无人机集群网络管理架构，如图1所示。首先，操作员通过用户界面输入任务指令。意图编排器主要解决意图理解及任务分配的问题，得到分配清单后将子意图分发至各无人机。各无人机作为单智能体，配备意图引擎、智能策略映射引擎，将分配的子意图进一步解析，映射为集群编队策略与网络策略。利用相机和传感器、雷达、全球定位系统（global positioning system, GPS）、计算单元、通信设备等各

类感知、计算与通信载荷，实时感知无人机集群态势与周围环境变化。引入意图验证和策略验证机制，结合当前态势评估策略执行结果，反馈至意图引擎、智能策略映射引擎以及意图构建层，优化涵盖意图拆解、分发及执行的各流程。下面对意图驱动的无人机集群网络管理架构的关键步骤进行说明。

1.1 意图输入和情景化

首先，通过用户界面获取操作员的意图，包括配置动态网络、优化资源管理、提升服务质量和执行安全策略等不同任务目标。意图编排器的主要功能是意图情景化，即将人类操作员的高级指令意图转化为更具体、可操作的任务，以适应具体的情景和环境。在无人机集群网络管理中，意图情景化可以理解为由操作员输入的高层业务目标，转化为各无人机单机可执行的网络策略目

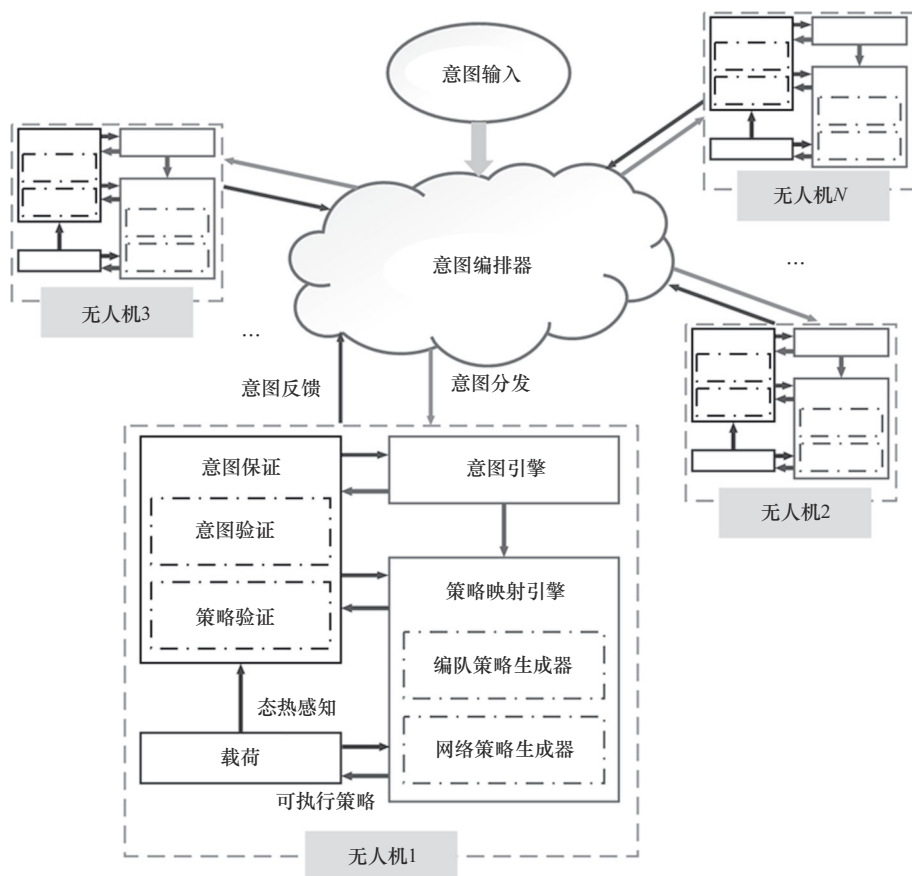


图1 意图驱动的无人机集群网络管理架构

标,实现集群网络的自适应性和灵活性。上述过程需要考虑网络的实时状态、资源可用性、环境变化等因素,确保单机能够有效地执行各自的任務,同时能够协调合作执行复杂的群体任务。意图编排器将操作员的高级指令意图转化为结构化的可操作任务,分配给各无人机进行分布式执行。

意图编排器将操作员的原始意图进行情景化解码,并将其与集群网络能力和约束对齐,目标是将以操作员为中心的意图,翻译成可以被每架无人机内的意图引擎有效处理的技术指令,并规划所有指令的执行顺序,定义指令间复杂的输入输出关系。基于意图反馈机制,意图构建层可动态更新其知识库,确保在集群层面解决意图冲突问题。在跨域集群应用中,异构无人机对于分解和结构化的意图理解应具有-致性,从而维护操作员意图的完整性和准确性,避免对同一意图翻译理解不同而引起策略映射差异和冲突。

1.2 分布式意图转译与策略生成

意图编排器根据集群中各个无人机的位置、状态和载荷等因素,将子意图分发给各个无人机。其间,可以引入SDN辅助子意图进行信息下发^[11]。SDN是一种高效的网络管理架构,它将网络的控制层(决策层)与数据层(转发层)分离,通过中央控制器(SDN控制器)来统一管理网络设备的行为。这种分离使得网络用户可以从中心点根据其意图快速调整网络配置,以适应不同的应用需求。在子意图下发至各无人机后,意图引擎和智能策略映射引擎共同完成意图转译功能,根据子意图的内容以及当前网络和自身状态将意图转化为相应的网络配置策略、集群编队策略。静态网络中的意图转译主要采用自然语言处理技术,进行关键字提取、词法分析、语义挖掘等操作,获取用户期望的网络运行状态,并使用智能化的方法生成网络策略。该部分与意图输入情景化共同构成了用户意图向可执行策略转化的主要过程。无人机集群网络的意图情景化与转译

策略生成架构如图2所示。

相比静态网络,无人机集群网络通常在高动态、不确定的环境中运行,这对意图转译的输出策略提出了新的挑战^[12]。首先,系统需要有效地控制网络拓扑结构和编队队形,包括自主规划路径并避免碰撞和强干扰区等。其次,集群中的无人机间需要保持无缝高吞吐量数据共享,相应的策略包括低开销路由协议、传输层拥塞控制、基于位置预测的中继通信节点选择以及簇内簇间通信策略等。此外,无人机集群网络利用自主感知实现智能决策,在大规模集群网络中通常需要配置基于深度学习算法的自主控制模型。因此,意图转译模型的设计需要充分考虑无人机集群网络中的独特挑战,生成可靠性高、适应性强的集群网络及自主控制策略。

1.3 意图保证及反馈机制

意图保证机制的主要功能是确保网络在其整个生命周期内符合意图^[13]。具体来说,由于网络状态的动态变化,系统可能会检测到意图的偏移,自动采取措施将网络恢复到符合意图的状态^[14]。因此,意图保证主要基于网络状态监控、遥测和数据分析等进行服务。采用这种方式,系统可以在意图不满足时,通过学习用户和网络行为来预测未来的变化,适应性地调整其配置。但是,策略调整不应只在监测到意图偏移后才触发。例如,可以利用监控日志的历史数据对未来网络状态进行高精度预测,实现主动调整策略,从而对意图偏移采取预防措施。

在无人机集群网络策略和控制策略下发到网络后,意图保证机制对系统的状态信息进行实时监控,确保转换后的策略与基于意图的预期行为相符。意图保证机制与意图转译组件进行交互,检验各无人机执行的子意图的相似度并解决意图映射的冲突问题。同时,意图保证机制根据网络及周围环境的变化,对智能策略映射引擎进行动态反馈,保证系统执行的动作满足操作员的意图。此外,保

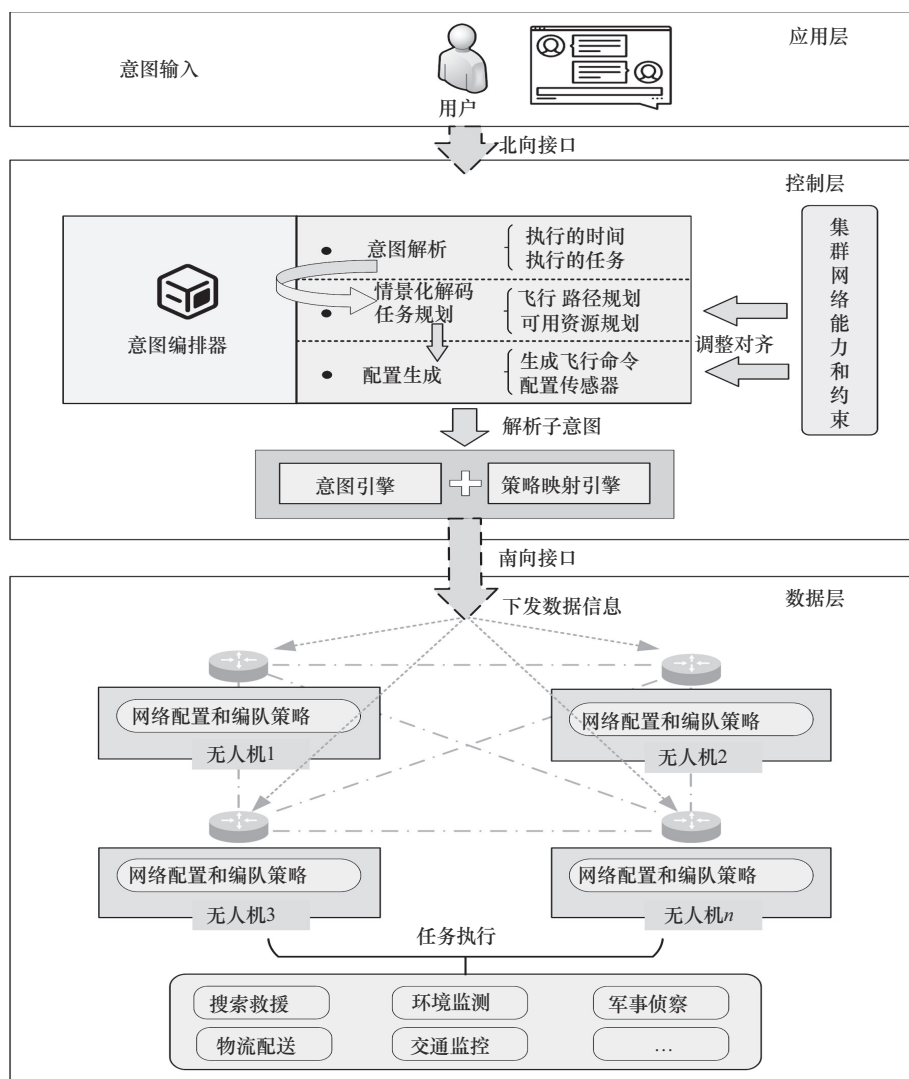


图2 无人机集群网络的意图情景化与转译策略生成架构

证机制与意图编排器密切交互，为意图编排器及时反馈意图执行结果、实时的网络态势及集群中无人机的状态信息，评估当前意图情景化效能，并根据系统态势感知信息做出及时的调整和优化。

1.4 无人机载荷与态势感知

态势感知组件为意图情景化、意图编排和意图保证等流程提供集群状态信息（包括位置、速度、航向等）、网络性能指标（包括吞吐量、时延、丢包等）。例如，当无人机节点加入或离开集群导致网络拓扑发生变化时，如果控制器检测到相应事件并确认当前通信质量低于预期，则通过动态地更新流规则执行流量迁移，

以满足意图需求。通过提供实时的集群状态信息，态势感知组件能够与意图保证反馈机制相结合，用于无人机集群网络的意图偏移检测和集群网络配置调整。意图保证反馈机制与态势感知相结合的集群网络配置调整架构如图3所示。

集群系统可利用每架无人机的有效载荷，实现对态势与周围环境变化的自主感知。有效载荷可能包括多种传感器和通信模块，用于监控和分析网络的健康状况和性能。引入相关的机器学习算法，可用于处理和分析感知数据、识别网络拥塞模式、预测潜在的通信链路故障等。配备传感

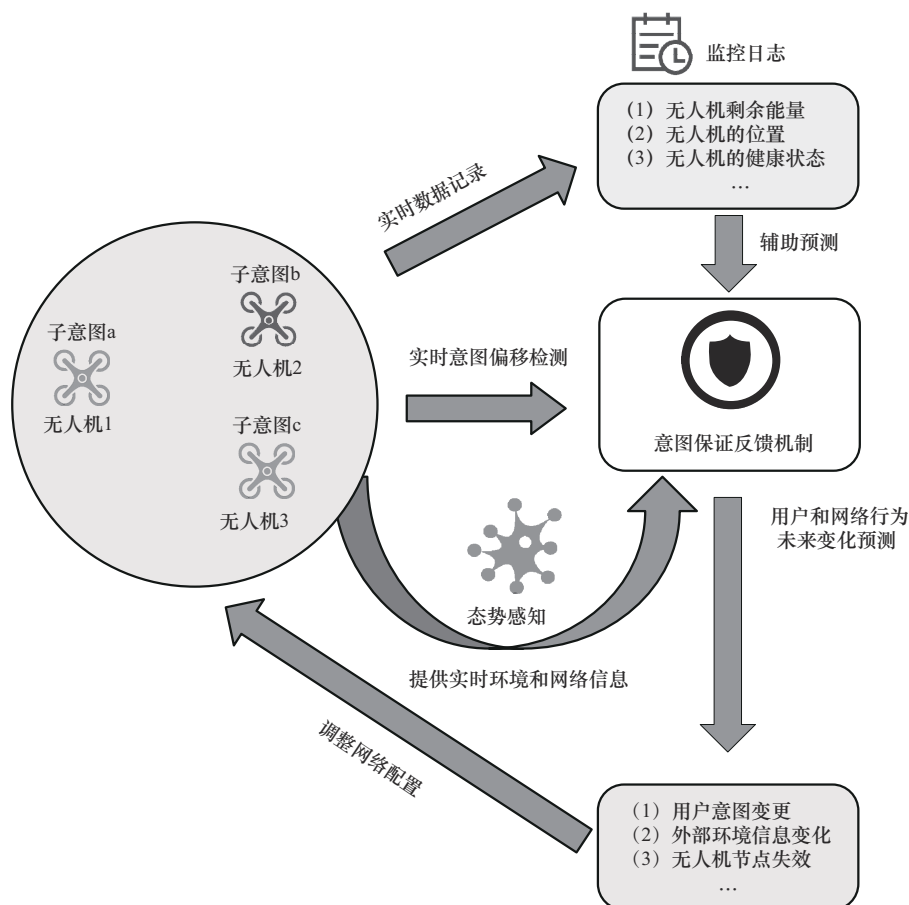


图3 意图保证反馈机制与态势感知相结合的集群网络配置调整架构

器和算法能使集群保持高度的网络态势感知能力，主动应对潜在挑战。因此，有效载荷不仅仅是为了实现单机的功能，还有助于增强无人机集群适应和响应网络当前状态的能力，确保网络行为的稳健性、弹性以及响应与分布式意图保持一致。

1.5 自主性分级

结合意图抽象的级别及无人机集群自主控制能力，基于意图的无人机集群网络管理的自主性可用如下5个等级进行评价，并按照相应阶段逐步向前演进。

(1) 基础群控制：与手动网络管理相对应，操作员使用预置操作配置集群网络，没有自主的差异化服务。

(2) 协助式群智能：意图的功能主要体现在

辅助操作员进行网络管理任务分解，操作员仍然手动管理网络，需要持续参与配置和纠错。

(3) 自适应群自治：从静态到动态的过渡，集群网络开始自主理解意图，处理特定情景的网络配置和验证，减少了对操作员干预的需求。在特定情况下，集群网络开始提供差异化服务。

(4) 高级群协同：集群网络具备识别和自主解释各种形式的意图输入的能力，包括图像、文本、语音等，通过不断学习进化智能，能够准确地将意图转化为网络管理的策略，但仍可能需要人为干预来指导和纠正网络行为。

(5) 全面群自治：集群网络实现了完全的自主性和动态性，不需要人为干预，能够自主识别和处理任务，具有智能配置、纠错和实时验证的特点。在不同情景下，均能自动适应、自主调



整,提供高效、可靠和个性化的服务。

2 关键技术

为了促进无人机集群通信网络向全面群自治演进,发展复杂高动态环境下的人-集群高效交互技术是实现意图驱动无人机集群网络管理的基础与前提条件;动态集群及路径联合编队是确保系统完成意图编排、意图验证与反馈等任务的关键环节;利用多无人机智能体的分布式算力,实现通-感-算多维资源智能调配,可在保障意图需求的同时,根据意图保证与反馈机制的结果灵活调整网络资源分配策略,是优化无人机集群网络性能的重要支撑技术。下面从人-集群高效交互、动态集群及路径联合编队和通-感-算多维资源智能调配3个方面,重点介绍支撑意图驱动的无人机集群网络的关键技术。

2.1 人-集群高效交互

意图理解是人机高效交互的基础。无人机集群系统通常在复杂且快速变化的环境中运行,因此,建立兼具准确性与泛化能力的意图解析与集群行为映射模型,成为构建意图编排器的关键。针对意图解析复杂性较高的难题,引入基于大语言模型的意图解析方法,能够从陈述性的高度抽象的语言中提取关键信息,并通过关系抽取形成操作和条件的集合,再将意图映射为知识图谱,以实体和关系的图结构形式呈现,从而将解析出的意图转化为结构化的命令格式。大模型和提示工程的结合,将意图中的操作、条件和其他相关信息映射到特定的命令语法中。这种基于大语言模型的意图解析方法有效减少了人为干预,提高了意图解析模型的准确率。基于大语言模型的人-集群交互流程如图4所示。引入基于大语言模型的意图表征与映射技术,可以实现将用户初始意图依照集群任务情景化,提取意图中的实体关系结构并映射为特定格式的无人机可执行命令,以此实现网络管理架构中的意图转译和策略生成

功能^[15]。

针对意图映射和解析模型轻量化的问题,需要减少意图源语编排和策略映射模型的特征。例如,提取意图的词组、实体及属性的语义链接,在生成的知识图谱上进行映射和渲染,通过语义关联性和特征融合实现维度降低,提高意图解析的效率和性能。具体来说,首先,对用户输入的文本进行意图映射,提取出语句中的关键动词、意图实体及其之间的关系,并输出特定结构来构建意图知识图谱。其次,利用预训练的语言模型,将自然语言转化为结构化查询语句,在知识图谱中进行映射。最后,通过意图渲染,利用知识图谱中的参数实例化,把映射后的意图输出为无人机集群的控制指令及网络策略。

对于融合大模型的意图驱动网络,模型提取出的实体需要在知识库中进行搜索和映射。针对意图映射中关键意图信息表述的差异性问题,以及多实体与操作员意图相似度较高导致的冲突,设计多特征融合的意图相似度检测模型^[16],如图5所示。综合考虑意图文本在结构和语义层面的不同计算方式,将不同的特征进行加权融合,并通过实验和评估来调优阈值,以适应在不同场景下的性能表现。选择最优实体参数映射输出,并采用知识图谱的图结构网络进行推理,可避免多实体与意图相似度较高导致的映射冲突问题。该策略对应于意图驱动网络管理架构中的意图保证及反馈机制部分,引入意图冲突缓解机制,可有效提高系统整体意图映射的准确性和稳定性。

2.2 动态集群及路径联合编队

在大规模、高速移动的环境中,无人机动态集群技术将网络节点划分为若干子群,是优化无人机网络管理的有效手段。路径联合编队技术是保证集群编队安全性和任务执行高效性的重要基础,通常与动态集群技术联合使用,无人机集群能够环境自适应、故障自修复以及信息高效共

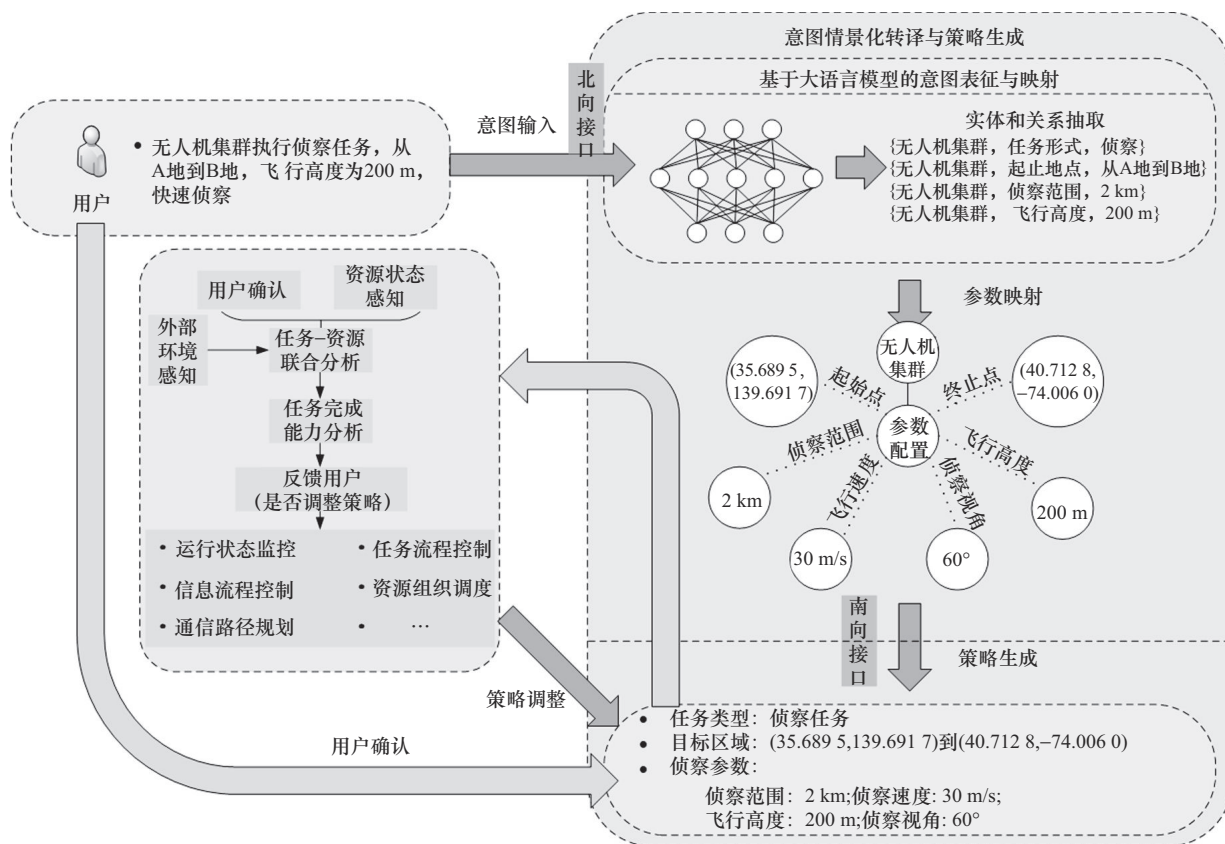


图4 基于大语言模型的人-集群交互流程

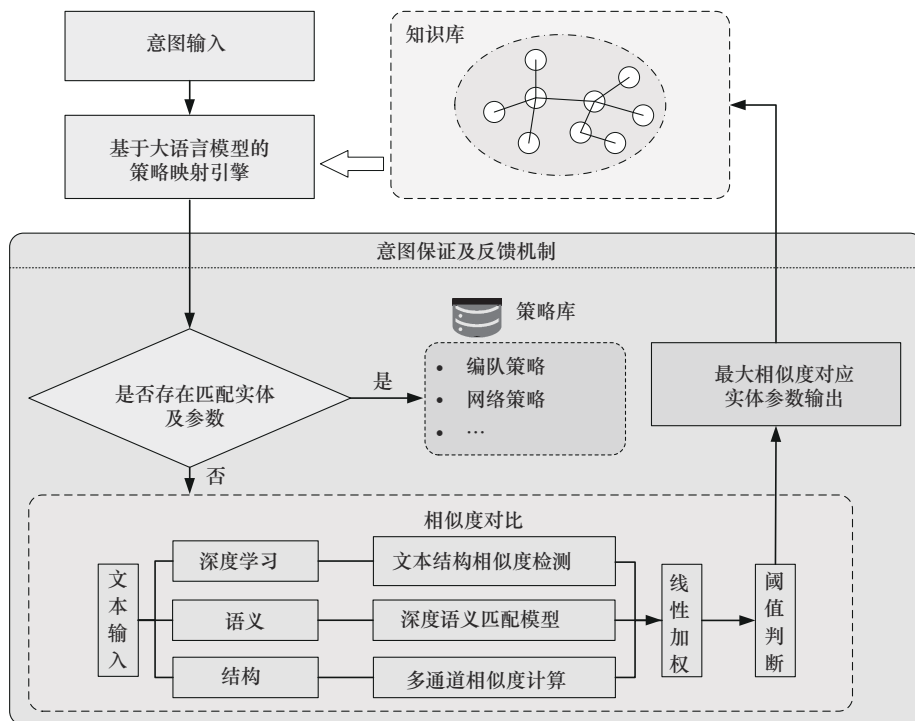


图5 多特征融合的意图相似度检测模型示意图



享,具备动态自主愈合的能力,能够在高度分散形式下完成任务。因此,动态集群及路径联合编队是意图驱动的无人机集群网络的基础保障。然而,随着网络规模的扩大,意图驱动的无人机集群网络面临传输时延、资源分配等一系列挑战。具体来说,意图编排需要与集群网络能力和约束对齐,充分考虑网络的时延和资源瓶颈等因素,以确保集群行为的协调和有效执行。此外,集群网络是保证准确且及时进行意图验证与反馈的关键保障,直接影响集群的响应速度和任务执行效率。因此,高效的动态集群及路径联合编队是确保系统完成意图编排、意图保证及反馈等任务的关键环节。

用户意图指明了无人机集群网络未来时刻的任务目标,在经由意图情景化、转译以及保证反馈调整处理后,原始用户意图转化为无人机集群网络能够识别和执行的最终行动策略。接下来,无人机集群按照该策略执行具体的侦察搜索等任务,可通过通信运动联合规划以及通-感-算多维资源智能调配技术自动规划集群任务执行期间的飞行轨迹和通信方式,确保无人机在资源受限条件下的飞行安全和通信可靠性。无人机集群通过信息交互和行为交互在时间、空间和任务等多维度进行智能协同,拓展信息域和作业范围,并显著提升复杂环境中任务的执行效能。当集群被外派执行目标侦察跟踪任务时,在未知环境中可能受到来自外部干扰器和障碍物的多重影响,这些因素极大影响了集群的通信效率、安全性以及任务完成效果。传统的无人机资源分配和轨迹规划方案仅关注通信性能的提升,意图驱动的无人机集群网络则需要考虑任务意图的整体达成度,这为策略生成模型带来了复杂约束和多个耦合的优化指标。因此,建立基于意图的动态集群和路径联合编队模型,可实现以满足意图为目标的联合优化方法,构建集群自主行为策略,实现以任务意图为核心的策略优化。

以侦察任务场景为例,研究在有限能量和通信质量约束的条件下,最大化无人机集群目标数据收集量指标,建立基于深度强化学习和启发式的混合规划求解方法,在满足模型约束的前提下,以最大化智能群体目标数据收集量为目标,联合规划求解合理的无人机目标关联、发射功率和飞行路径方案。首先,围绕任务目标构建集群目标关联模型以及集群所收集到的目标数据量公式。在外部存在干扰器以及集群内部通信存在干扰的情况下,设计集群通信相应的信干噪比表达式和向基站回传数据所需要的通信能耗。由于不断地动态运动,集群运动能耗同样被加入总能耗中。在任务意图驱动下,构建以最大化无人机集群能量利用率为目标的总优化模型。

在无人机集群执行任务动态运动的过程中,路径上的障碍物以及周围其他运动物体都将会对当前单机的运动构成安全威胁。为了确保单机按照预期目标顺利到达终点位置,需要设计出合理的路线躲避路径上的各种障碍物。针对该问题,研究无人机集群根据当前目标位置以及周围安全威胁因素自适应调整未来时刻的运动情况。具体来说,以粒子群优化算法、人工势场法以及蚁群算法3种启发式方法为出发点,综合考虑了3种算法在规划智能群体路径时的原理,并构建出对应的未来路径调整公式,以确保集群能够动态避障并顺利到达目的地。例如,无人机目标关联、发射功率和飞行路径的联合优化问题可分解为无人机目标关联和发射功率优化(transmit power optimization, TPO)子问题以及无人机路径优化(path optimization, PO)子问题。首先,可利用启发式方法生成无人机初始的飞行路径和发射功率等参数,快速确定初始的合理解。其次,对于无人机目标关联和发射功率优化子问题,可采用具有 K 均值(K -means)和变维机制(dimension-varying mechanism)的遗传算法(GA-KDM)来解决;利用结合遗传机制和寻优算子的粒子群优

化 (particle swarm optimization and genetic operators, PSO-GO) 算法, 可以跳出局部最优解, 提高算法的全局搜索能力, 有效处理无人机路径规划问题。最后, 以最大化集群能量利用率为目标, 构建的模型中可包含地面目标关联、单机发射功率以及运动路径3种优化变量。优化变量形式不同, 分为离散型和连续型两种, 对应的维度和处理复杂度较高, 可利用基于深度强化学习的多变量联合优化方法进行求解。为便于简化求解, 可将单机发射功率离散化为预定区间中的多个固定值, 路径问题以方法库处理的形式提供选择项, 并结合地面目标关联变量综合构成深度强化学习网络的动作空间输入。通过网络权值参数的更新, 优化深度强化网络的预测效果, 以此获取多变量联合规划的最优解。

2.3 通-感-算多维资源智能调配

面对高动态、不确定的复杂任务, 无人机集群通信环境多变、资源种类多样, 但资源总量有限。资源受限条件下, 基于对意图的深层理解, 建立感知、通信、计算等多维资源协作的网络策略表示与优化, 缩小智能群体系统性能与实际需求间的差距, 能够解决资源调配策略通用性弱、协同效率低、鲁棒性差等问题。利用多无人机智能体的分布式算力, 实现通-感-算多维资源智能调配, 可在保障意图需求的同时, 根据意图保证与反馈机制的结果灵活调整网络资源分配策略, 是优化无人机集群网络性能的重要支撑技术。例如, 联邦学习利用无线感知和无线传输功能的分布式深度学习系统, 通过在边缘设备上进行模型训练, 避免数据集中存储在中央服务器上, 可有效解决分布式决策的无人机集群中的数据安全性问题。在高动态环境下, 通过感知预测和机器学习方法, 实时更新资源节点的位置和状态信息, 根据意图需求自适应生成资源调度策略。同时, 分布式算力分配协作和基于深度强化学习的多目标服务质量优化机制, 可实现算力资源的自适应

分配和计算任务的快速分派。在无人机集群中, 解决多维资源之间的权衡问题, 找到它们之间的相互平衡关系, 是提高分布式决策性能, 确保意图高效执行的关键。

尽管依靠分布式算力支撑高效的意图策略生成前景光明, 但还面临诸多挑战。首先, 由大量异构无人机组成的网络中, 传统同步联邦学习面临的节点存在性能差异大、数量多导致全局模型聚合延迟的问题, 可采用异步联邦学习框架接入网络, 根据节点的本地训练结束时间进行即时更新, 并引入通-算融合的空中计算技术来提高聚合效率。该技术利用多址信道特性叠加信号, 减少通信开销并提高通信效率, 但会引起模型传输精度与模型传输数量之间的冲突。设计自适应节点调度算法和天线波束成形工作模式, 均衡两者之间的差异, 生成满足信号失真要求条件下最大化参与节点数量的模型聚合方案, 可以提高通信效率和模型性能。

其次, 相比地面网络设备, 无人机机载设备在功率、质量、尺寸方面存在严格的限制, 导致其运算及存储能力均有一定的局限性, 加之空间频谱资源紧张, 基于分布式学习的无人机集群网络面临功率、计算和通信资源受限的问题。对于面向分布式智能的通-感-算融合多维资源调配问题, 可以将通信、感知、计算资源联合优化问题建模为最大化效用函数问题, 并满足用户所能容忍的最小数据传输速率、所有用户与基站占用的资源不超过系统总资源等约束。上述问题可归属为通信资源管理建模和优化设计领域, 经典的博弈论和凸优化理论已被广泛应用于解决该类问题, 但存在适用性局限、建模复杂、需要精确的问题描述和数据输入等问题。近年来, 深度强化学习方法飞速发展, 为设计智能网络资源管理方案带来了新的机遇。深度强化学习的优势在于能够从高维度的感知输入中获得环境的有效表征, 通过与环境交互学习经验, 利用深度神经网络分



析环境中的变化规律,从而做出最佳决策。例如,对分布式智能的通-感-算融合多维资源调配问题进行求解,可将感知信息、通信信息和计算信息作为状态集;将资源分配策略中资源块数、发射功率、基站的计算资源作为动作集;将所有用户的时延、频谱效率及执行动作成本的加权和作为奖励值,以降低传输时延、处理时延和资源分配动作执行的成本。

在常规的集中式机器学习系统中,训练数据一般呈独立同分布,能够使模型均衡提高对各类数据的预测能力,但在无人机集群网络中,数据通常以非独立同分布的形式存在于各单机设备上,且这种分布因为数据的不可共享原则不可改变。非独立同分布数据使得本地模型产生梯度偏差,最终使得全局模型偏离理想优化路径,得到低精度、低收敛速度的全局模型。为解决该问题,可在无人机的选择和模型聚合两个环节增强模型面向非独立同分布数据的鲁棒性。在中心节点无法感知单机节点本地模型时,如何评估单机节点本地模型以调整其参与全局聚合时的聚合权重,也是提升模型精度的重要支撑技术。

3 未来展望

目前,学术界和工业界对意图驱动网络技术的研究和验证工作大多集中在移动通信网络^[17]。对于无人机集群网络的智能化研究工作大多停留在外挂式设计阶段。本文提出将意图驱动网络管理技术与无人机集群系统深度融合,提升集群系统面对高动态性和不确定性环境的适应能力,支持业务的敏捷性,最大限度地满足操作员的意图。然而,意图驱动网络管理架构下,无人机集群智能组网以及多维资源协作机理还面临诸多挑战,需要创新性的研究和大量细致完善的工作。

3.1 意图表达与情景化的语义一致性

无人机集群感知的信息异构多源、高维、复杂,难以直接进行自主分析并生成从底层控制到

高层群体行为的多机协同网络策略。人类根据无人机的感知数据,输入操控意图并进行意图是否达成的反馈。因此,高效、准确的人机交互使无人机集群通过借鉴人类智能所擅长的知识演化与智能推理能力,提升自主学习与自适应能力。然而,以人为中心的意图表达具有形式多样、非结构化、上下文依赖等特点,这就需要揭示人机交互过程中的语义交互机制,重点解决动态场景、复杂任务下操作员意图表达与无人机集群意图编排的语义一致性问题,保证人类操控意图与无人机集群网络策略的语义关系一致,实现人机回路的知识交互、综合与增强。

3.2 意图输入的最佳时机

与无人机集群控制面临的挑战类似,确定向集群网络输入意图的时机也是一个需要深入研究的关键挑战。面向集群的网络策略通过不断调整成员之间的相互作用和行为,促使集群在动态过程中实现收敛和稳定,以应对不断变化的环境。随着时间的推移,集群状态会发生动态变化,因此在最有效的时机输入意图对于网络的响应速度和效率至关重要。为了实现这一目标,需要准确分析甚至预测集群网络状态的变化情况,以便在合适的时机输入意图来操控集群网络。考虑无人机集群操控的动态特性,建立模型来确定意图输入的最佳时机需要进一步的研究和探索。这将有助于进一步提高网络管理的效率,使无人机集群能够更好地适应复杂的环境并实现高效的任务执行。

3.3 集群网络性能评估

目前,无人机集群领域还缺乏准确、可靠的系统性能评估指标,帮助操作员全面地了解集群系统的运行状态。具体来说,这些指标应该能够反映无人机集群在不同任务和环境条件下的表现,通常包括任务完成率、任务执行时间、能源消耗、通信效率、系统稳定性等。对于无人机集群网络性能的评估,还应包括其受到扰动时可以

自发进行适应性调整,从而恢复群体性能的能力,包括鲁棒性、脆弱性、可靠性和弹性等^[18]。对于无人机集群网络的操作员来说,实用的网络性能评估指标可以显著帮助他们管理任务并评估服务质量。因此,合理的指标对于基于意图的无人机集群系统非常重要,有助于操控员或智能算法及时做出操控意图的优化和调整。

4 结束语

总体来说,传统忽略用户意图的网络管理需要消耗大量的时间、人力资源,且受到自身经验、认知和偏见的影响,会导致网络部署过程中出现混乱。基于意图的网络可以实现将高层业务目标转变为可操作的网络策略来超越传统网络范式,从完全静态的手动网络管理过渡到完全动态的自主意图网络管理。本文提出了一种意图驱动的无人机集群网络管理架构,探讨了实现该体系架构的重要组件及相互关系。在此基础上,明确了基于意图管理无人机集群网络需要突破的关键技术。最后,对意图驱动的无人机集群网络的未来发展方向及面临的挑战进行了展望。

参考文献:

- [1] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 1-9.
LIU C X, MAR, PENG M G. UAV-enabled integrated sensing and communication: architecture, techniques, and future vision[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 1-9.
- [2] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
DUAN H B, QIU H X. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [3] 李福亮, 范广宇, 王兴伟, 等. 基于意图的网络研究综述[J]. 软件学报, 2020, 31(8): 2574-2587.
LI F L, FAN G Y, WANG X W, et al. State-of-the-art survey of intent-based networking[J]. Journal of Software, 2020, 31(8): 2574-2587.
- [4] MCNAMARA J, CAMPS-MUR D, GOODARZI M, et al. NLP powered intent based network management for private 5G networks[J]. IEEE Access, 2023(11): 36642-36657.
- [5] 詹勇, 吴枫. 5G网络自动化: 从人工运维到全自治[J]. 电信科学, 2022, 38(8): 140-150.
ZHAN Y, WU F. 5G network automation: from manual operating to full autonomous[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(8): 140-150.
- [6] VELASCO L, SIGNORELLI M, DE DIOS O G, et al. End-to-end intent-based networking[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(10): 106-112.
- [7] 郭令奇, 褚智贤, 廖建新, 等. 意图驱动的自智网络资源按需服务[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 82-88.
GUO L Q, CHU Z X, LIAO J X, et al. Intent-driven demand-aware resource service in autonomous networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 82-88.
- [8] YANG C G, MI X R, OUYANG Y, et al. SMART intent-driven network management[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(1): 106-112.
- [9] ZHANG J W, YANG C G, DONG R, et al. Intent-driven closed-loop control and management framework for 6G open RAN[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(4): 6314-6327.
- [10] 赵晓雪, 薛富国, 张露露, 等. 意图驱动端到端网络切片编排与控制[J]. 电信科学, 2023, 39(9): 1-11.
ZHAO X X, XUE F G, ZHANG L L, et al. Intent-driven end-to-end network slicing orchestration and control[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(9): 1-11.
- [11] SINGH A, AUJLA G S, BALI R S. Intent-based network for data dissemination in software-defined vehicular edge computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 5310-5318.
- [12] 胡飞, 欧冬秀, 黄心林. 无人机集群系统网络模型与协议[M]. 北京: 国防工业出版社, 2023.
HU F, OU D X, HUANG X L. UVA swarm system network model and protocol[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2023.
- [13] LEIVADEAS A, FALKNER M. A survey on intent-based networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 625-655.
- [14] CLEMM A, CIAVAGLIA L, GRANVILLE L, et al. Intent-based networking - concepts and definitions[J]. RFC, 2020, 9315: 1-23.



- [15] WANG J Y, ZHANG L, YANG Y R, et al. Network meets Chat-GPT: intent autonomous management, control and operation[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2023, 8(3): 239-255.
- [16] 邹丽强. 多特征融合的文本相似度计算方法[D]. 抚州: 东华理工大学, 2023.
- ZOU L Q. Method for calculating text similarity based on multi-feature fusion[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2023.
- [17] LI F L, HEI C Y, SHEN J X, et al. Human-intent-driven cellular configuration generation using program synthesis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(3): 658-668.
- [18] 刘继新, 张新珏, 蒋伶潇, 等. 低空无人机群自组织网络弹性综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20): 8504-8514.
- LIU J X, ZHANG X J, JIANG L X, et al. Review of self-organizing UAV swarm network resilience in low altitude airspace[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20): 8504-8514.

[作者简介]



李璇 (1989-), 女, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院副研究员、博士生导师, 主要研究方向为智能无人网络管理。



李海岩 (1997-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为无人机集群分簇管理和资源规划分配。



张璐 (2002-), 女, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为意图驱动网络和无人机集群控制。



张雨航 (2002-), 男, 北京邮电大学国际学院在读, 主要研究方向为无人机集群态势感知及网络管理。



张豪杰 (1989-), 男, 博士, 北京邮电大学电子工程学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为智能测量与传感。