

多无人机编队自主协同控制架构

Framework of Autonomous Cooperative Control for Multi-UAV Team

李相民^{1,2}, 颜 骥¹, 刘 波²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000)



李相民

海军航空工程学院兵器科学与技术系教授, 博士, 博士生导师, 山东省教学名师, 全军优秀教师, 全军院校育才奖金获得者, 《电光与控制》、《指挥控制与仿真》和《火力与指挥控制》编委; 主持和参与多项全军预研等科研课题, 获得国家科技进步二等奖和军队科技进步一等奖各 1 项, 发表论文 60 余篇, 主要研究方向为武器系统与作战指挥一体化。

0 引言

绝大多数的空战都是机群参与的协同作战, 未来空战的主要模式将是由无人机组成群参与战斗或由有人/无人机组成混合机群协同完成作战任务。由于无人机的智能水平在短期内不可能达到有人机的水平, 因此, 有人/无人机混合编队作战是当前的重点研究问题^[1]。

当前一些项目研究了网络化无人机之间的协作问题, 探讨了集中式和(或)分散式的提升无人机系统自主控制等级的方法^[2-6]。然而, 很多工作专注于单个操作员监控多架协同无人机的战术层面的研究^[7-8], 而网络化的大规模自治无人机与人类

提出了动态环境下多无人机编队执行不同使命任务的自主协同控制系统结构。按照分层递阶的思想, 将多无人机编队作战系统分为两级分层控制结构和五层功能结构, 从不同层级实现无人机群的自主控制, 保证了机群指挥的统一性、控制的灵活性和系统的可扩展性; 采用灵活的系统通信结构以应对战场环境的不确定性; 个体无人平台之间局部相互作用引起的涌现行为及无人机功能编队之间的分布式任务规划, 自下而上地驱动作战系统的资源优化配置, 结合自上而下的系统指控组织动态适应性优化, 优化了系统指控组织结构, 有效地整合了战场资源。

关键词: 多无人机编队; 自主协同控制; 分层递阶; 指控组织

中图分类号: E837; TP29

文章编号: 1671-637X(2015)03-0001-06

操作员组成的相互协作的多编队有人/无人机群执行动态环境中使命任务的研究尚不多见。本文针对该问题, 提出多无人机编队自主协同控制框架。

1 体系结构描述

采用分层递阶结构的思想来分解问题, 是解决多智能体自主协同

控制和决策中的复杂性的有效手段^[9-10], 本文将多智能体自主协同控制框架划为两级五层的指挥控制结构。

1.1 组织控制结构

设计了两级的组织控制结构, 如图 1 所示。

1.1.1 战役级控制结构

战役级控制结构主要由使命指

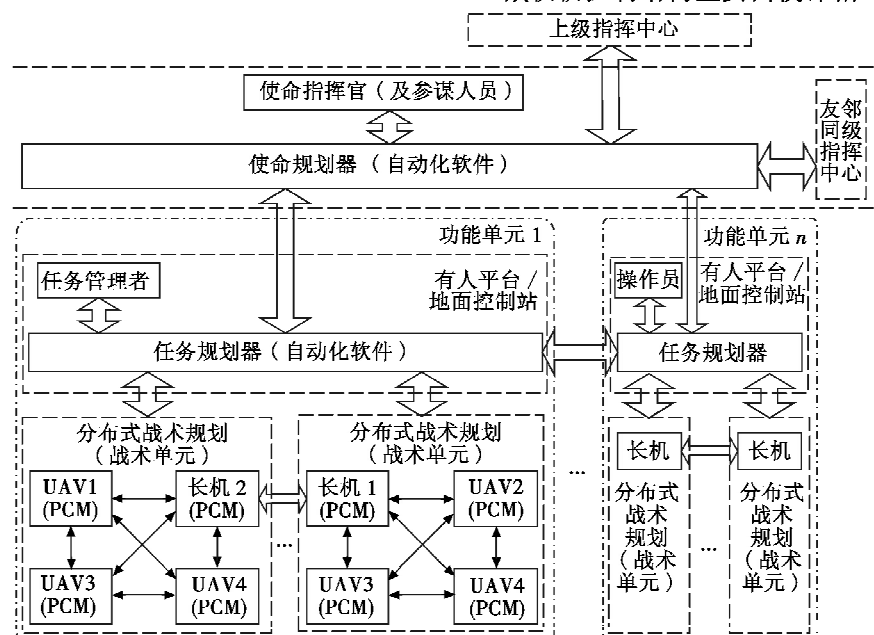


图 1 两级组织控制结构

Fig. 1 Two-layer organizational control architecture

挥官和参谋人员构成,该级并不直接指挥兵力,而是根据上级指挥中心的指令和本级对作战过程的评估结果来规划下一步的作战行动。该级的工作过程关注于整个任务目标,即指挥官的意图,其职能是:在任务开始之前将所属作战资源在合适的时间投放到正确的位置从而生成初始的兵力结构;任务执行时,实时监控任务执行过程,并在需要时调整初始计划和指控组织结构,以保证使命能够成功完成。

1.1.2 战术级控制结构

战术级控制结构包含了所有执行所分配子任务的低层决策者。战术级控制结构能拥有多于一个的实体(亦称功能单元, functional unit),而功能单元又可以包含一个或多个战术单元(无人机编队),实体的个数由战役级的初步规划决定。战术单元可根据感知的态势,动态地加入或移除。提供了一个协商机制,以便战术单元在协同行动中解决冲突。两级体系结构是相互耦合的,来自战术级控制结构的下级决策者将所属资源状态和感知的战场态势呈报给战役级控制结构的决策者;上级决策者对使命的整个执行过程进行监督和控制,对战术行动的调整自上而下地被逐级执行。

提出的体系结构是介于层级式结构和变态分层结构之间的中间结构:它是两层的层级式结构,但又具备大量的扁平联系;它是整体与部分的结构,但每个部分自身又是一个整体,每个部分具备完整的内部结构,这个特征使得该指控组织控制结构具备如下特征。

1) 自治。权力和控制在决策者或决策单元(决策者群)中分布,使其具有局部的识别、决策和行动选择的能力,因此,具备行动的反应性和主动性。

2) 集成。指挥和控制从最高层往最底层流动。位于低层次的决策

单元或决策者需要遵从来自高层次决策单元和决策者的指令,从而确保指挥的统一。

3) 协作。命令式的协作和协商机制使得决策单元和决策者能与其他决策单元和决策者以最小的无序度柔性地交互。

4) 自组织。当环境状况改变或出现较大的扰动时,决策单元或决策者可以自动地或依据来自上级的命令重组织作战行动。

5) 可重配置。功能单元或战术单元可根据演进的使命计划复制或删除,各决策单元和决策者可通过有差别的规划和调度重新配置自身。

1.2 组织功能结构

提出五层组织功能结构如图 2 所示。最高的两层位于战役级指挥中心,分别是使命规划层和使命执行层。操作员在网络传感器、使命反馈及智能决策算法的帮助下,生成使命的全局视图并监督其执行。其他三层位于有人或无人作战平台上,操作员可以调整单个或某类飞行器的自主等级,从而使这些飞行器可利用指令触发或事件触发的行为,对不同类型的紧急情况做出反应。

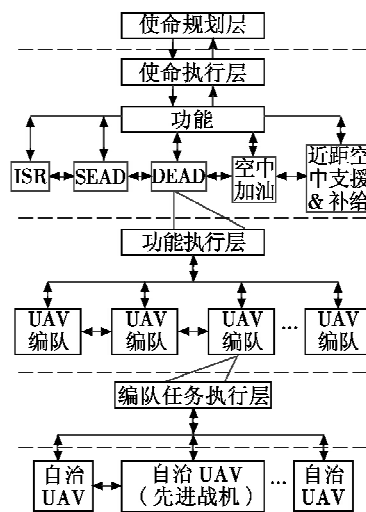


图 2 功能结构分层

Fig. 2 Layered functional level

1.2.1 使命规划层

使命规划层位于战役级指挥中心,包括使命预规划(高层次目标、

作战概念、使命分解与任务参数化等),兵力单元模块化描述和兵力构成优化^[11]。该层任务主要由规划人员实现,兵力构成优化将辅助指挥官决定执行特定的使命任务的兵力集成。使命规划的结果是作战单元集合以及它们对使命执行的影响。

1.2.2 使命执行层

使命执行层也位于战役级指挥中心,包括指控结构与角色的优化和使命执行的优化^[11]。一旦确定了执行给定使命的作战单元和资源,下一步就是根据使命对兵力进行裁剪,甚至是动态重构以适应环境。指控结构和角色优化允许指挥官将作战单元最优化地组织为内聚的指挥与控制组织,定义使命中各指挥官的角色,并定义他们之间支援与被支援的关系。模型可用算法驱动或指挥官指定的作战单元到战术任务分配的方式来确定作战单元之间的依赖关系。这些依赖关系说明了作战单元之间为成功完成使命的协同需求,这些协同行为与同步作战单元的行动相关。

1.2.3 功能执行层

功能执行层位于一个或多个有人作战资源之上,功能包括ISR, SEAD, DEAD, 近距空中支援等。所有执行相应功能的作战资源构成功能单元,每个功能单元都有其半全局的决策者,若环境中或编队能力出现较大的变化,如大量的作战资源被摧毁而需要作战资源在功能层进行重分配时,其将与使命规划层进行交互,由使命执行层调整组织结构和组织过程。

1.2.4 编队任务执行层

编队任务执行层位于一架或多架编队长机之上,各项功能被指派给一个或多个编队,并被分割成编队任务序列。每个编队指派一架长机,每个编队任务又被分割成单架 UAV 任务序列和航迹。该层协调编队任务,如有必要,可在编队之间,

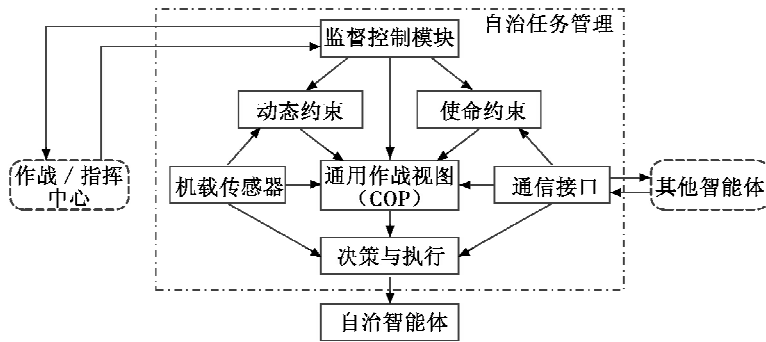


图3 UAV的自主任务管理结构

Fig.3 Structure of the autonomous task manager for UAV

通过编队长机进行交互,一个编队形成一个战术单元。

1.2.5 飞行器任务执行层

飞行器任务执行层位于每架飞行器之上,对应于图2最底层的自治UAV。任务包括动态路径重规划、障碍规避、局部任务执行和航迹跟踪。

1.3 相关功能模块

1.3.1 UAV 自主任务管理结构

单架UAV的自主任务管理结构如图3所示,监督控制模块协调通用作战视图(Common Operating Picture, COP)的建立与决策、任务的管理和执行。COP概念的基础是所有智能体具有关于环境和关于其他智能体的相同信息需求。若某个智能体检测到某个事件的发生,相关信息被传送到更高层次的智能体,再由其来决定是否将信息在低层级智能体间分发,并决定是否将该信息向更高层级的决策者传送。

智能体之间共享的信息类型取决于其执行的功能和任务。如在摧毁敌防空系统任务中,与已发射导弹及各智能体能力有关的信息在编队中共享,由此他们可以在紧急情况下动态地进行任务重指派。通用作战视图在预定的时间间隔内更新,相对而言其更新频率较低,在该时间间隔内,可用扩展的卡尔曼滤波器或粒子滤波器估计环境状态,并解决可能的冲突。

1.3.2 UAV 任务决策结构

决策架构如图4所示,可以看

出,决策是基于传感器信号、通用作战视图COP、与其他智能体和(或)指挥中心的通信信息做出的。协作的自治是各智能体通过利用共同的IF-THEN规则集合及算法计算获得的。

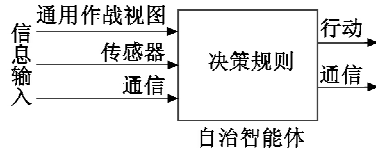


图4 决策架构

Fig.4 Decision-making framework

1.4 通信结构

本框架采用多种通信结构,图1定义了指挥中心和功能决策者或决策单元之间的交互方式,而功能决策者又与编队长机之间存在通信,后者则与编队内其他智能体通信。

编队内存在3种通信结构。双向通信包括长机和僚机之间的信息交换,编队长机发送给僚机的主要信息是长机位置、速度和航向,以及给僚机的指令;僚机发送给长机的信息包括当前可用的传感器和武器、剩余燃料、距目标距离、新发现的威胁、飞行器健康状况等与僚机当前能力相关的信息;僚机之间若存在通信,则交互的信息与直接作战区域及相邻飞行器相关的通用作战视图有关。若僚机收集目标信息,则信息的处理如信息融合、分割、自动目标识别交由编队长机或更高级别的决策者处理;决策者之间交流的信息与他们的通用作战视图相关,由其所在层级决定,如功能

层决策者之间建立的通用作战视图所覆盖的区域要大于编队COP覆盖的区域。

半隐蔽通信的情况下,长机给僚机发送指令,但不从僚机那里接受任何信息。隐蔽通信情况下,所有僚机在使命开始之前接收预先定义的4维航迹,并按照航迹飞行而不与长机及编队内其他僚机通信。

2 自适应机制

2.1 基于黑板结构的战役级任务规划

在资源需求和任务外在依赖关系约束下,恰当地将任务分配给可用的组织资源(平台),是组织性能的决定性因素。任务规划和执行问题是复杂的、地理上分布的,其已超出单个智能体的处理能力。分布式的规划架构因能提供鲁棒的、并行的操作能力,并具备与遗留系统的互操作能力,从而比集中式的规划架构更具适应性。

2.1.1 战役级任务规划问题

使命规划层和使命执行层给出了作战资源到使命任务的初始分配,分配的结果为每个决策者拥有的资源列表及资源能力向量,分配的任务列表及其资源需求。战役级任务规划的目标是最大化任务执行精度(以任务需求与资源能力的匹配程度度量),最小化任务完成时间或寻求准确性和及时性的折中^[7]。

2.1.2 分布式协同规划结构

本文采用基于黑板结构^[12]的分布式协同规划架构,该架构由3部分组成,如图5所示。

黑板结构用于求解各功能单元的战术任务规划问题,由位于战役级控制结构的任务规划人员及辅助软件,与位于战术级控制结构功能层的任务执行人员及辅助软件相互协作完成。组成部分与结构描述如下所述。

决策者:决策者是操作人员及其

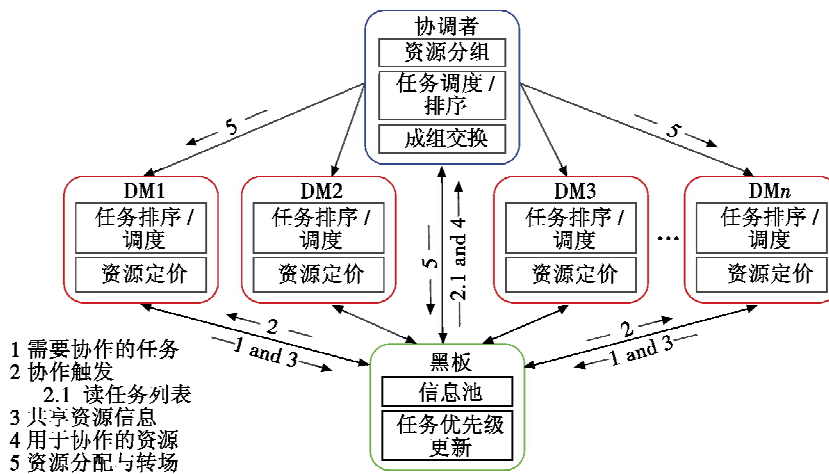


图5 基于黑板结构的分布式任务规划框架

Fig. 5 Distributed task planning framework based on blackboard structure

辅助决策软件的总和,具备信息处理、决策和操作能力,本节指位于功能层的决策者。根据其专长,每个决策者分配了一系列的任务和资源集合。决策者可以和其他决策者共享资源并通信。假设一个决策者用所分配的资源,可以完成大部分所分配的任务,然而,由于资源所有权的限制,当某个任务的资源需求超出决策者能力时,就需要和其他决策者协作来完成。

协调者:协调者是决策者的一类,位于指挥中心,主要控制共享的资源以执行使命任务并使得同等地位的决策者之间可以协作和协商。协调者扮演着监控和管理黑板,将共享资源分配给黑板结构上需要协作的任务的角色。

黑板:黑板是为信息收集和处理而设置的异步实体,其为中心信息仓库,使能智能体之间的协同。黑板可以位于指挥中心,也可位于作战资源平台,依战场环境和通信条件而定。智能体通过黑板结构通信以交换任务和资源信息,并对黑板结构基于时间的触发机制做出响应。黑板结构同样为智能体提交的信息隐藏提供便利,除非用于协同的信息在黑板结构上提出,参与协作过程的智能体并不了解其他智能体要解决的问题。

2.1.3 方法

调度问题一般说来是 NP-hard 问题。典型的任务调度方法^[9,12-15]包括分支定界法、动态规划、动态列表规划、局部搜索技术如成对交换,以及 M-best 资源分配算法,这些方法可以用于战役级和战术级的任务调度。对于分布式的规划形式,协同的资源重部署、最大化(或最小化)战役级目标、将局部计划装配为全局计划、解决局部计划之间的冲突并保证全局计划的可行性是必须予以考虑的因素。

2.2 战术级协同任务规划与执行

为方便操作员和自治无人机在任务执行上的协作,战术单元的基本系统结构被划分为主要的两部分^[16],如图6所示。

2.2.1 地面控制站

第一部分是和无人机网络远程

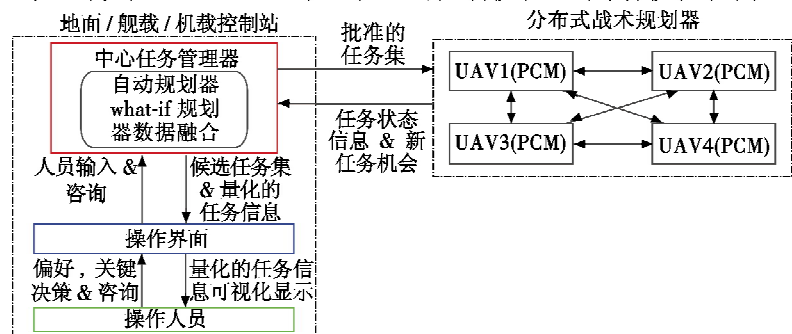


图6 分布式多无人机系统体系结构

Fig. 6 High-level architecture of decentralized multi-UAV system

连接的地面/舰载/机载控制站,由被称作中心使命管理器的集中式策略规划器、操作人员及操作人机界面组成。中心任务管理器决定给定的任务子集分配方案的可行性。操作员可以改变分配的任务,在将新计划发送给无人机编队之前,通过“what-if”规划器评估新计划的影响。每个自动生成的计划必须经操作员批准后,才能发布给分布式战术规划器。操作员并不关心任务的实现细节,如由哪架无人机执行哪项任务,但操作员可以决定计划中应该包含的任务。这种基于目标的方法,极大地减少了操作员负载,方便了单操作员对多架无人机的控制。

量化的信息(无人机位置和燃油水平,目标位置估计等)和候选方案经中心任务管理器传送给操作界面,以操作者可理解的可视化方式显示。操作者可通过“what-if”的方式咨询规划器,以决定将新的任务插入到当前任务列表中的可行性。一旦操作者决定了一项计划,该获准的任务集将经由中心任务管理器分发给分布式战术规划器执行。

2.2.2 分布式战术规划器

第二部分是分布式战术规划器,由网络化的机载规划与控制模块(onboard Planning and Control Module, PCM)构成,各机载处理器上运行相同的规划与控制模块,为无人机之间提供协作的自主权。分布式战术规划器实质上是一个机载规划控制模块网络,各模块协同工作

以实现共同的使命目标。分布式的任务分配采用基于一致性的包算法及其扩展求解^[17-20]。基于操作员对任务优先级的输入,确定算法中各任务的价值,由于算法是在异构无人机编队中运行,通过对不同使命场景中的不同任务适当地编码,可使得只具备相应能力的无人机才能对相应任务投标。一旦分布式算法在分配集上达成一致,各无人机会转入各自的分布式路径规划阶段以计算其飞行路径。无人机的航迹以一系列的航路点表示,并被发送给底层控制的飞行器自动驾驶仪。

在适当时候,分布式任务规划器将在不影响整个计划质量的前提下,修改任务分配,相比需要等待来自操作人员或中心规划器决策指令的方法,分布式规划通过无人机间相互通信可更快速地进行局部修复。此外,在与地面控制中心间歇性通信或中断通信的情况下,计划仍能执行。该结构是可扩展的,加入的无人机增加了系统计算能力,因不存在为整个编队进行全局规划的单架无人机,该分布式框架对单点失效是鲁棒的。

2.2.3 人机协作方式

不同于直接操纵单架无人机,操作员负责确定无人机编队的高层目标,而自动规划器则负责任务分配问题优化的大量计算。操作人员通过直接在人机交互界面创建和确定任务优先级来指导规划过程。在任务执行过程中,弹出窗口提示操作人员对目标识别、武器发射许可、战损评估确认等需要人为干预的任务做出响应,以进一步指导自动任务规划。获准的计划并不将相应的任务指派给无人机,而是将这些任务分发给无人机编队实施分布式的任务规划和执行。

2.3 指控组织适应性机制

2.3.1 指控组织结构的动态适应性优化方法

面对复杂多变的战场环境,适

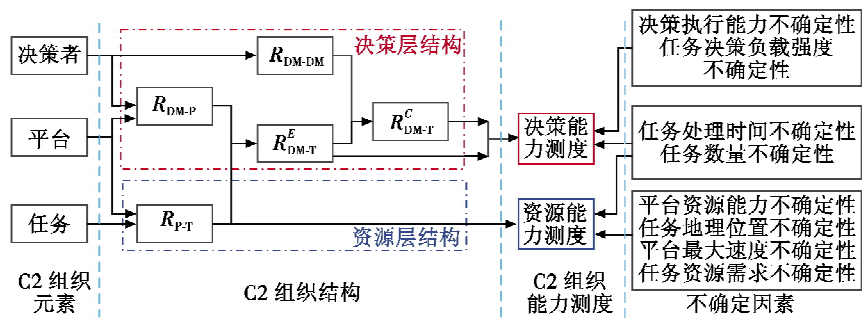


图7 基于能力测度的C2组织结构分层与适应性优化

Fig. 7 C2 organization structure and adaptive optimization

时地对当前C2组织结构进行优化调整是获取战争对抗优势的关键之一。本文采用文献[21]提出的指控组织结构的分层动态适应性优化方法,来解决不确定使命环境下的指控组织结构动态适应性问题。

如图7所示,文献[21]将指控组织结构分为决策层结构和资源层结构两部分,分别建立了指控组织决策能力测度和资源能力测度的数学模型;在分析各类不确定因素对这两种能力影响的基础上,分别构建了组织决策层结构适应性优化模型和基于滚动时域的决策层结构适应性优化方法,组织资源层结构适应性优化模型和基于关键事件的资源层结构两阶段适应性优化方法,通过调整相应的结构变量以提升组织能力。具体方法详见文献[21],此处不再赘述。

2.3.2 指控组织结构优化与任务规划

2.2节与2.3节分别从功能粒度和编队粒度对机群任务进行了规划,从不同的层次确定了任务与作战平台间的分配关系 R_{P-T} 、决策者与平台间的控制关系 R_{DM-P} ;与文献[21]自上而下的集中式优化方法不同的是,本文的指控组织设计及其适应性优化是以自下而上的分布式优化驱动自上而下的集中式指导的方式实现的。在建立初始的指控结构后,编队内各无人机按照全分布的方式进行任务规划和执行,并和其他编队协作完成本编队不能独立完成的任务;功能单元所辖无人机

在本单元内可通过编队间的协商动态地调整关系 R_{P-T} ,功能单元指挥官实时监控本单元的任务执行能力和任务执行需求,当环境态势发生变化时,与其他功能单元及指挥中心决策者通过黑板结构协调关系 R_{P-T} 和 R_{DM-P} ;指挥中心决策者再按照文献[21]的方法,在由机群及其决策者自主确定的部分结构关系的基础上,对机群指控组织结构进行优化和调整。

3 结论

按照分层递阶控制的思想,从指挥控制结构、功能结构和通信结构3个方面描述了多无人机编队自主协同控制体系结构,通过对多无人机系统分级分层,从不同层级实现无人机群的自主控制;无人机功能编队之间的分布式任务规划和个体无人平台之间局部相互作用引起的涌现行为,自下而上地驱动作战系统的资源优化配置;结合自上而下的系统指控组织的动态适应性优化机制,有效地整合了战场资源。

参考文献

- [1] 赵敏. 分布式多类型无人机协同任务分配研究及仿真[D]. 南京:南京理工大学,2009. (ZHAO M. Simulation and research on distribute cooperative task allocation of multi-type UAVs [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.)
- [2] HOW J P, FRASER C, KULLING K C, et al. Increasing autonomy of UAVs: Decentralized CSAT mission ma-

- agement algorithm [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2009, 16(2):43-51.
- [3] STRENZKE R, UHRMAN J, BENZLER A, et al. Managing cockpit crew excess task load in military manned-unmanned teaming missions by dual-mode cognitive automation approaches [R]. Portland, Oregon: AIAA-2011-6237, 2011.
- [4] CUMMINGS M L, HOW J P, WHITTEN A, et al. The impact of human-automation collaboration in decentralized multiple unmanned vehicle control [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(3):660-671.
- [5] SARLES C, BYRD A, DUARTE R, et al. UV sentry: A collaborative approach to creating a collaborative system [C]//ASNE Day 2012: Naval Warfare-Critical Engineering Challenges, Arlington: ASNE, 2012:1-14.
- [6] MADDALUNO M B. A multi-UAS cooperative mission over non-segregated civil areas [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 70:275-291.
- [7] GRANDE D E, STELZER E M, LEE D J, et al. Supporting adaptive C2 structures in time-critical environments [C]// The 13th International Command and Control Research and Technology Symposium, Bellevue: CCRP, 2008:1-13.
- [8] CLARE A S. Modeling real-time human-automation collaborative scheduling of unmanned vehicles [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [9] YU F L, FANG T, PATTIPATI K R. Integration of a holonic organization control architecture and multi-objective evolutionary algorithm for flexible distributed scheduling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2008, 38(5):1001-1017.
- [10] JOVAN D, BOSKOVI. Collaborative mission planning & autonomous control technology (CoMPACT) system employing swarms of UAVs [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois: AIAA 2009-5653.
- [11] LEVCHUK G M, LEVCHUK Y N, WEIL S A, et al. Persuade: Modeling framework for the design of modular army organizations [C]// Proceedings of the 2006 Command and Control Research and Technology Symposium, San Diego: CCRP, 2006:1-24.
- [12] MANDAL S, XU H, RETTIPATI K R, et al. Agent-based distributed framework for collaborative planning [C]//Aerospace Conference, IEEE Big, 2010:1-11.
- [13] BUI H N, HAN X, MANDAL S, et al. Optimization-based decision support algorithms for a team-in-the-loop planning experiment [C]//Systems, Man and Cybernetics, San Antonio: 2009:4684-4689.
- [14] HAN X, MANDAL S, BUI H N, et al. An optimization-based multilevel asset allocation model for collaborative planning [EB/OL]. [2014-11-18]. http://dodccrp.org/events/16th_icerts_2011/presentations/125.pdf.
- [15] XU H, BUI H N, MANDAL S, et al. Optimization-based decision support software for a team-in-the-loop experiment: Asset package selection and planning [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(2):237-251.
- [16] SOUTHERN D N. Human-guided management of collaborating unmanned vehicles in degraded communication environments [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [17] REDDING J D. Approximate multi-agent planning in dynamic and uncertain environments [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [18] LUKE B, SAMEERA S P, HAN L C, et al. Asynchronous decentralized task allocation for dynamic environments [R]. Louis: AIAA-2011-1441, 2011.
- [19] KOPEIKIN A N. Dynamic mission planning for communication control in multiple unmanned aircraft teams [D]. Cambridge: Massachusetts institute of technology, 2012.
- [20] PONDA S S, JOSH R, HAN L C, et al. Decentralized planning for complex missions with dynamic communication constraints [C]//Marriott Waterfront, Baltimore: ACC, 2010:3998-4003.
- [21] 牟亮. 不确定使命环境下 C2 组织结构动态适应性优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. (MU L. Dynamic adaptive optimization methodology of C2 organization structure under uncertainty mission environment [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.)

Abstract: A self-organizing framework is proposed for collaborative multi-UAV teams working with a small group of human operators to execute a range of military missions under dynamic environment. The combat system is consisted of a two-layer hierarchical control architecture and a five-layer function architecture, which facilitates the autonomous cooperative control of UAV groups at different levels, and insures the unity of command, the flexibility of control and the expandability of system. A flexible communication structure is adopted to respond to the uncertainty of battlefield. The optimal configuration of resources is driven by the emergent behaviors resulted from local interactions among the unmanned assets and the distributed task planning among functional formations from bottom to top, while dynamic adaptive optimization of C2 organization structure is realized from top to bottom, thus can optimize the C2 structure and integrate the battlefield resources effectively.

Key words: multi-UAV team; autonomous cooperative control; hierarchical system; C2 organization