

基于互为主体的电子系统架构与任务决策

王玉冰¹, 梁晓龙¹, 柏 鹏¹, 王维佳², 张佳强¹

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 军事科学院系统工程研究院, 北京, 100101)

摘要 针对传统电子系统架构和任务决策机制无法满足航空集群遂行复杂任务需求的现状,提出一种基于互为主体的电子系统架构与任务决策机制。首先,从航空集群电子系统的实际应用需求出发,分析了电子系统的物理组成基础和电子资源的柔性聚合;其次,建立基于互为主体的电子系统架构模型,实现电子系统在物理域、信息域和认知域等不同层次能力之间的有机结合;然后,提出基于互为主体的信息交互与决策方法,提高航空集群作战运用的灵活性和整体效能;最后,给出了互为主体在航空集群作战中的应用实例。

关键词 互为主体;电子系统架构;任务决策;航空集群

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.03.008

中图分类号 TN971.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)03-0044-07

An Electronic System Architecture and Task Decision Based on Mutual Subject

WANG Yubing¹, LIANG Xiaolong¹, BAI Peng¹, WANG Weijia², ZHANG Jiaqiang¹

(1. Air Traffic Control and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Institute of Systems Engineering, Military Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Aimed at the current situation that both the traditional electronic system architecture and the task decision mechanism fail to meet the needs of fulfilling complex tasks given by aviation swarms, this paper proposes an electronic system architecture and task decision mechanism based on mutual subject. Firstly, from the point of view of the actual application requirements in aviation swarm electronic system, the physical composition basis of the electronic system and the flexible aggregation of the electronic resources are analyzed. Secondly, an electronic system architecture model based on the mutual subject is established, realizing the organic combination of hierarchical capabilities in among the physical domain, the information domain and the cognitive domain. And then, a mutual information-based interaction and decision-making method is proposed to improve the flexibility and overall effectiveness of aviation swarm operations. Finally, a living example of mutual subject in aviation swarm application is given.

Key words mutual subject; electronic system architecture; task decision; aviation swarm

随着电子信息技术的高速发展,电子设备的种类、功能复杂化使得电子系统中的信息与控制决策

问题愈发突出。同时,现代空战向着集群化趋势发展,面对日益复杂的战场环境和任务需求,电子系统

收稿日期: 2020-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(61703427)

作者简介: 王玉冰(1994—),女,陕西西安人,博士生,主要从事一体化电子系统研究。E-mail: m13940095361@163.com

通信作者: 王维佳(1990—),男,陕西渭南人,博士生,主要从事航空集群研究。E-mail: visionwng@foxmail.com

引用格式: 王玉冰,梁晓龙,柏鹏,等.基于互为主体的电子系统架构与任务决策[J].空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(3):44-50. WANG Yubing, LIANG Xiaolong, BAI Peng, et al. Electronic System Architecture and Task Decision Based on Mutual Subject[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(3): 44-50.

作为战场态势获取和作战任务遂行的关键,必须引入新的设计思想与任务决策方法来构建高性能、可重构的电子系统架构,实现电子系统的认知和能力涌现,从而达到最佳遂行效果^[1]。互为主体是 20 世纪西方哲学中凸现的一个范畴,它的主要内容是研究或规范一个主体怎样与完整的作为主体运作的另一个主体互相作用的^[2]。互为主体使得认识论发生重大转向,从关注主体性和认知上的“主-客体”关系转向关注主体与主体之间的关系,并确认了自我主体与对象主体间的共生性、平等性和交流关系^[3]。

本文在对哲学领域认识论范畴中的互为主体理论进行分析的基础上,将互为主体的概念引申到信息科学领域,研究如何根据不同的任务需求牵引系统在资源和架构的柔性聚合、系统的信息交互和任务决策,实现认知和能力涌现,从而提高电子系统能力和航空集群作战效能。

1 基于互为主体的电子系统架构模型

1.1 电子资源与柔性聚合

电子资源是电子系统的物理组成基础,由硬件

资源、软件资源和关联资源构成^[4]。硬件资源以固态化形式存在,为信号波形的生成、转换以及软件资源的运行提供平台,包括天线资源、信号处理资源、信息处理资源、信息/信号传输资源、信息应用资源和基准资源等。软件资源以程序代码的形式存在于硬件资源中,实现数字信号处理以及应用功能处理,包括公共软件资源、功能软件资源等。关联资源以共享交互形式存在,为软件资源和硬件资源的协调一致提供条件,包括信息资源、信号资源和信道资源等。

目前,电子系统多采用“模块”概念作为电子系统综合的物理单元和功能单元。模块指相对独立的功能划分,以及一种先进的封装及安装形式,包括硬件模块和软件模块。模块是一个相对独立的功能单元,尽量减少模块间的信息交联,多个模块构成更大的功能的单元组件,通过信息交联构成系统。软件模块概念类似。模块是重构、共享、故障定位及现场更换的最小单位。

各类资源的层次划分如图 1 所示,与电子系统结构关系如图 2 所示。通常信号处理资源、信息处理资源、信息应用资源均包含软件和硬件资源,为便于区分,将软件资源单独列出。

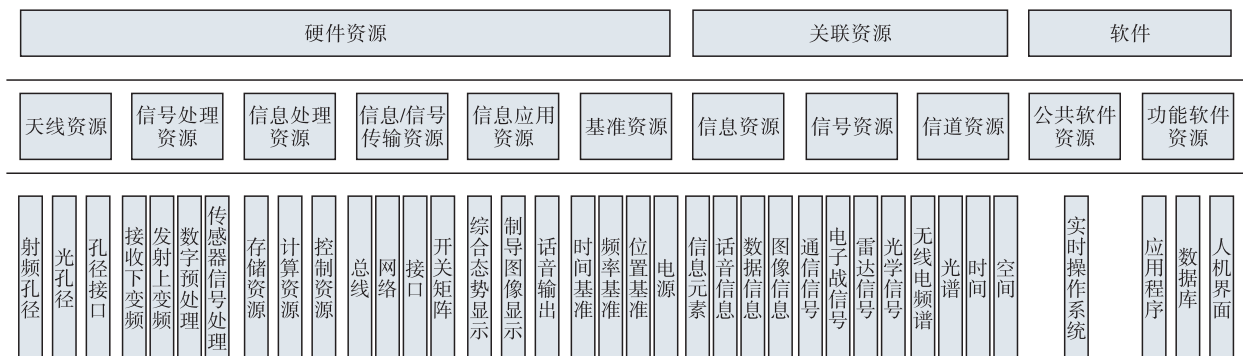


图 1 电子资源组成关系图

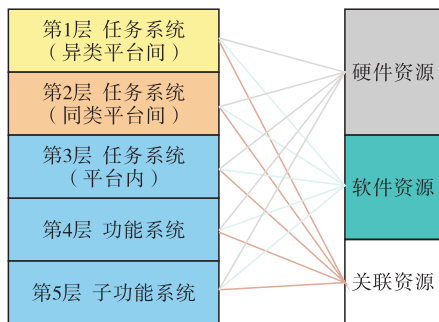


图 2 电子系统结构与电子资源关系

电子系统中的“电子资源”概念不同于已有的“模块”概念,其内涵更丰富、形式更灵活。“模块”是目前对电子系统进行综合的物理单元和功能单元。对标准模块按照“功能单元-单元组件-系统”

的过程进行综合,实践证明是一种有效的软硬件设计和系统综合方法。但标准模块功能单元固定、呈现形态(封装及安装形式)固定以及组合模式固定的特点却极大地限制了柔性组合的实施。由于协同作战、联合作战的任务多、任务转换快,不同任务对电子系统性能要求的差异性大,电子系统需要采用具有灵活性的新型单元分级与组合标准。因此,电子系统采用“电子资源”作为系统的物理基础。电子资源的基本单元具有多种形态,是一个多元素的资源形态集合,根据资源组合需求(图 2 中同类或不同类资源组合、同层次或不同层次资源组合),动态选取最佳资源形态,进行资源的最优组合,形成最优物理构型。

柔性聚合^[5]指电子系统根据任务需求以及对象相互间的关联性需求,以一定的规则建立任务/功能/子功能与电子资源之间的映射关系,生成匹配任务功能的最优资源集;并基于资源共享、动态重构、高效利用等原则,采用技术可行的物理构型对电子资源进行组合,形成性能最优或次优的任务系统,实现作战效能最优。

如图 2 所示,软硬件及关联资源对所有层级开放,每层可选用资源完全相同,不存在某些资源被某层级固定使用的限制。

综上所述,电子系统以多重颗粒度的综合单元——电子资源,以多态灵巧的综合模式——柔性聚合,以可重定义的综合体系——结构层次,构建满足未来任务需求的适应性强、扩展能力强、灵活性强、共享能力强的综合系统,大幅减少平台上重复的电子资源,降低电子系统的体积、重量及故障率等,提高系统整体综合效能。

1.2 信息科学领域的互为主体涵义

如图 3 所示,将认识论和本体论的互为主体与信息科学中的认知过程相对比,存在很多内在联系和相似之处,因此可以将互为主体的哲学概念引申映射到信息科学中,用以解决实际问题^[6]。哲学中的“理解→交流表达→主观与客观意义的同步”即信息科学中的“对环境的认知→信息交互与协同→信息融合、启发与决策”。由此可见,认知过程是具有一致性的,只是在执行过程中,需要根据不同的任务需求和系统特性加以具体分析。

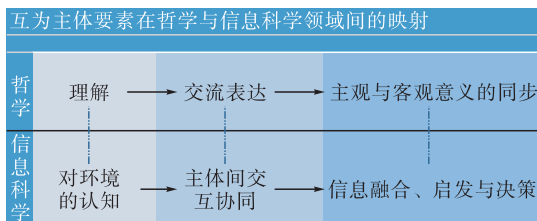


图 3 互为主体要素在哲学与信息科学领域的映射

信息科学领域中对于主体尚未形成统一的定义,霍兰模型中对主体的定义是具备感知能力、目的性、主动性、适应性并能够与环境及其他主体进行交互作用^[7];智能主体指在一定环境下的计算机系统,能够灵活自主地活动和决策^[8];近年来,以 Agent 作为主体的理论受到许多学者的关注^[9];本文中的主体指广义主体,根据划分粒度的不同可以归纳为资源级、信息级、功能级、任务级 4 个层次^[10],其中,资源级主体包括软件资源、硬件资源、关联资源和泛在节点,信息级主体包括同质信息和异质信息,功能级主体包括发射、接收、导航、显示等系统功能,任务

级主体包括侦察、干扰、通信、探测、攻击、管理和评估等任务环节^[11],如图 4 所示。在具体实现层面,贯穿全过程的执行方法是算法,要实现互为主体同层级或跨层级的灵活决策,依靠的是灵活合理地运用算法,即算法的算法。

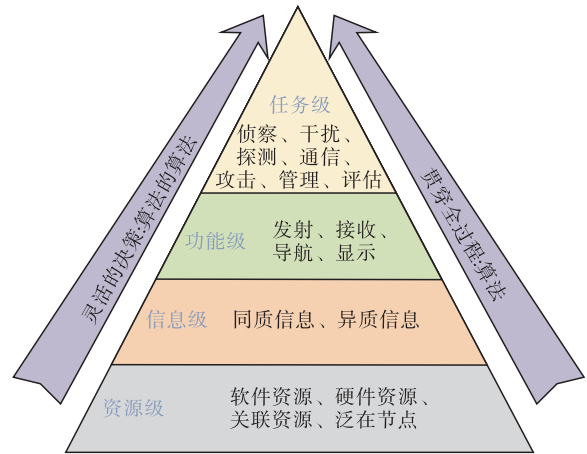


图 4 按不同粒度划分的主体层次

1.3 基于互为主体的电子系统架构模型

基于互为主体的电子系统,立足于未来体系作战总体能力需求,以系统精简、体系强大为设计目标。其中物理域电子资源是物理组成基础,由硬件资源、软件资源和关联资源 3 类资源构成。信息域包括对信号信息处理算法、资源管控调度、不同信息之间的交互协同,以及功能管理配置等。信息域主要以任务为牵引,实现对物理域电子资源的调度与管理。认知域包括认知计算、学习推理、科学决策以及增强进化等。主要通过学习推理与进化,发现战场规则与新知识,从而对战场态势进行自主灵活调整,如图 5 所示。

整个电子系统以统一时空频相基准为基础支撑,通过多维信号交互协同、复杂认知计算和智能信息处理服务,实现在广域范围内物理域的资源统一管理与调度、信息域的协同电磁环境感知与控制、认知域的自主灵活重构与学习进化,打造未来活性化智慧型的电磁频谱作战体系,支持对广域电磁频谱的精准操作和确保全局比较性竞争优势。

传统电子系统体系主要以能力相对固化的电子系统节点间的互联互通为组成架构,通过强化单节点能力和通信网络能力为主要手段实现体系整体能力的提升;互为主体电子系统则通过能力集合的开放式动态、敏捷、智能重塑与聚合,实现自组织自适应的电子系统体系架构,通过物理域、信息域和认知域等不同层次能力的有机结合和协调发展,形成系统总体作战能力的显著提升。

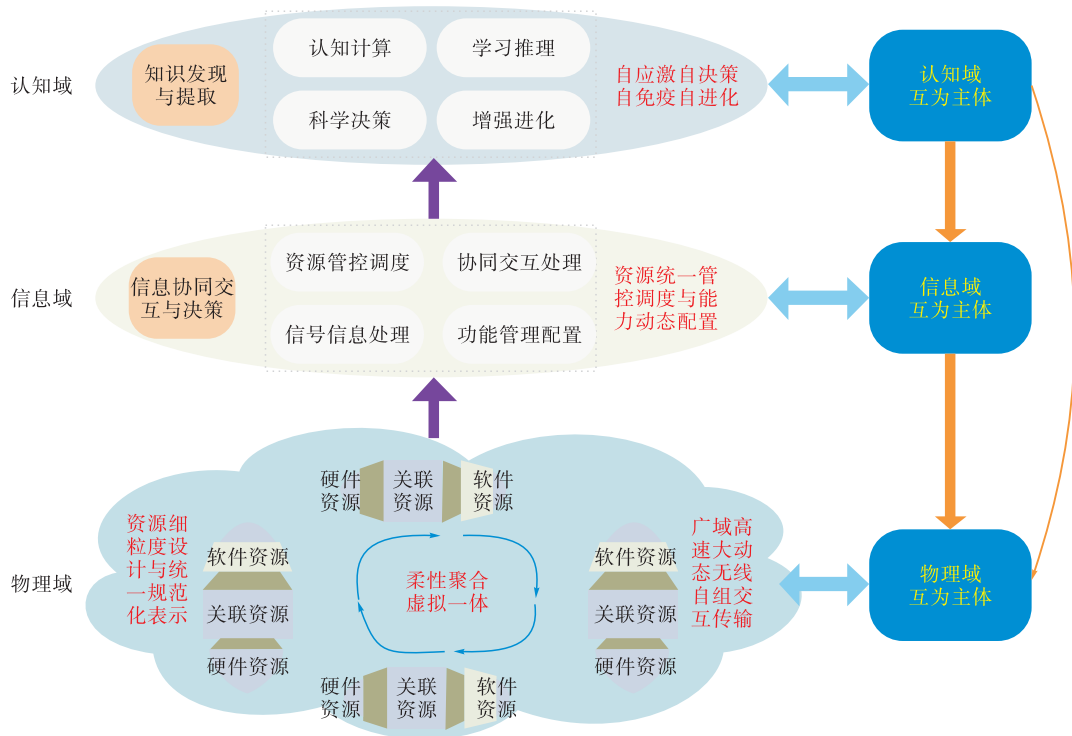


图 5 系统架构设想示意图

2 基于互为主体的信息交互与决策方法

2.1 基于互为主体的信息交互过程

信息的获取是人类活动的基础,也是航空集群遂行各项任务的前端环节和重要支撑^[12]。因此,分析航空集群技术与作战运用中有无互为主体的区别,首先要从分析基于互为主体的信息过程与传统信息过程的区别开始。基于互为主体的信息过程类比人类认识世界的过程,如图 6 所示。

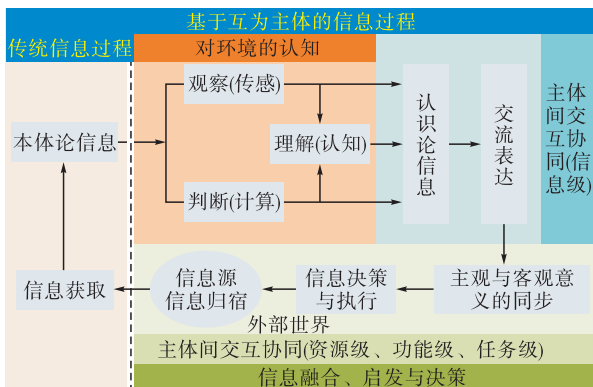


图 6 基于互为主体的信息交互过程与传统信息过程对比

人类认识世界和优化世界的过程包括:通过感觉器官获取外部世界的相关本体论信息,把它转换为认识论信息;通过神经传递给思维器官,后者把认识论信息加工成为关于外部世界的相关知识,实现认知;在此基础上针对问题和目标形成求解问题的

智能策略,做出决策;再通过神经传递给效应器官,后者把智能策略转换为相应的智能行为,作用于外部世界,解决问题,满足约束,达到目标^[13]。

基于互为主体的航空集群信息过程对应为:通过传感器获取外部环境的本体论信息,通过判断进行对信息的理解和认知,主体间对各自形成的认识论信息进行交流表达,即信息级的主体间交互协同,从而达到主观与客观意义的同步;之后通过信息融合、启发与决策,进行主体间资源级、信息级、功能级和任务级的交互协同,实现信息决策与执行,再将其作用于外部环境,完成任务,满足约束,达到目标。

信息获取的本质是本体论信息向认识论信息的转换;转换的可实现性条件是系统具有观察、理解和目的判断能力^[14]。传统的信息过程没有将本体论信息转化为认识论信息,缺乏类似人类认识世界的认知过程、主体间协同形成的互动以及认识和环境之间的闭环反馈。因而,在处理所需信息与非所需信息之间交互作用的复杂性和不确定性时,存在着观察不完善,理解不准确,判断不可靠的问题;基于互为主体的信息获取方式则能够在这种条件下获得观察力、理解力和判断质量的提升。

2.2 基于互为主体的决策机制

如图 7 所示,基于互为主体的决策机制实现步骤为:

Step 1 按照任务、环境、目标的多项约束,根据相关理论知识,以最大化系统效能为目标,

通过计算、对比和逻辑处理,选取 t 时刻在资源层、信息层、功能层和任务层等不同层级中的初始主体;

Step 2 赋予初始主体在 t 时刻的领导权,选取 t 时刻的算法主体,执行在 t 时刻环境和目标约束下的任务,得到 $t+1$ 时刻任务的新状态;

Step 3 将 $t+1$ 时刻的任务新状态与目标状态进行比较,根据状态差异的变化,重新选取 $t+1$ 时刻的各层级新主体,新主体可能与 t 时刻相同也可能不同,这时领导权可能产生变化,但不变的是主体选取原则,即最大化系统效能;

Step 4 按照上述流程迭代计算,任务过程中每个时刻都选取最适合当前任务和目标状态的主体赋予领导权并遂行任务,直至解决问题。

互为主体决策机制的优势在于:

1)形成一种新的决策权力分配方式,系统自主规划和治理,领导权因时因地而变;

2)弥补单一平台在观测时间、位置、数据等方面的不足,使获取的信息更为完备,互为补充,并且当其中某个节点受到打击或毁伤时,整个系统仍能继续工作;

3)弥补单一平台与对方单个平台或集群的能力差距,通过互为主体的运行机制实现能力涌现。

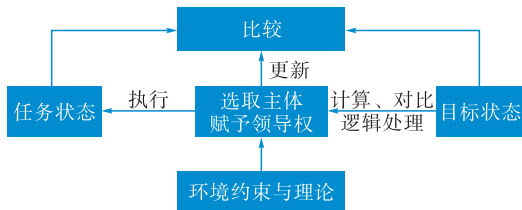


图7 互为主体决策机制

2.3 主体损坏后的主体重构方法

主体损坏的处理方法主要通过主体重构实现。主体重构是指为实现对战场环境和作战任务的最佳响应或在主体遭受攻击时的关键能力(按能力层级)得以快速恢复,以最小重构代价重建系统的结构及重新组合系统的功能的过程。

2.3.1 主体重构的目标

1)不断积累重构经验:通过预设不同属性的战场任务和不同攻击情况下的主体重构仿真,不断积累系统重构经验,以提升战场适应和生存能力。

2)涌现出强适应性的系统能力:基于系统重构经验,进而可促进系统对战场任务和敌方攻击的快速响应,触发更具适应性的能力涌现。

2.3.2 主体重构的类型

主体损坏的处理旨在突显主体的灵活扩展性、安全性、可控性等,并利于在战场对抗环境中主体的

构建与重构、增强系统的健壮性和提高遭受攻击时的自修复性,从而提升作战系统的生存能力和任务执行能力^[15]。本文按照主体重构的不同对象,将主体重构分为以下3类:

1)物理重构:主体需要引入新的平台或从系统中移出已有平台,或用一个平台替换另一个平台等涉及平台物理变换的系统重构,称之为物理重构;

2)逻辑重构:保持已有系统结构不变而改变组合方法、联接方式等的主体重构,称之为逻辑重构;

3)算法重构:根据当前任务特性,在算法库中重新选择可执行的、效能最优的算法运行,称之为算法重构。

物理重构、逻辑重构和算法重构是主体最基本的重构形式。同时,根据主体所处的激励形式可分为执行预设战场任务的主动重构和遭受敌方攻击时所及进行的应激重构。

主动重构:当执行预设战场任务时,如侦察、攻击、电子战、协同制导、协同搜索时,为实现各级主体对战场任务的最佳响应,在综合考虑重构代价和重构效能的情况下,对主体进行的以标志节点为主导的功能重新组合、联接方式改变等一系列的重构动作称为主动重构;

应激重构:当主体遭受攻击时,主体受到一定程度的损毁,为保证系统关键能力和最大化修复相关性能,此种情况下需对系统进行的一系列重构动作称为应激重构。

2.3.3 主体重构的触发机制

主体重构的触发机制以执行预设任务和攻击激励响应为研究主线,分触发行为和触发事件2个层面进行研究。

触发行为包括任务指令触发和战场态势触发,指令触发主要是依据上级作战意图及战场指令;战场态势触发则是根据战场态势变化、具体作战模式产生的适应性触发行为。一般而言,预设战场任务属指令触发行为,遭受攻击属战场态势触发。

确定触发行为后,即进入相应的触发事件判断。对于战场预设任务的指令触发行为,主要依据任务属性分析(包括任务类型、规模、难度等)和能力需求分析(需要的能力类型、具体能力性能等)确定主体的响应规模(全系统、部分子系统或单个子系统响应等)。然后判断相应的系统是否处于最佳组合状态,即是否需要重构,若需要则进行重构代价评估。最后依据评估结果进入系统或子系统的主动重构,这就是面向任务执行的主体重构的触发事件。

对于遭受攻击的战场态势触发行为,首先从系

统被毁伤规模、能力缺失分析、性能衰减分析、能力和性能的重要度分析等方面进行系统毁伤评估,并重构代价评估,进而确定主体的响应规模,然后进行系统或子系统的应激重构,这就是面向敌方攻击的主体重构的触发事件。

2.3.4 主体重构的原则

1)松耦合原则:可重构系统中任务和系统能力关系是松耦合:系统构建与重构不再依据特定任务需求提供系统结构,而是依据重构后涌现出的能力来执行相应任务。

2)兼容融合原则:可重构系统体现了多功能平台、多种交感通信机制、多种行为方式相互融合的发展趋势,其目标是实现各种开放、异构资源支持下的能力融合、子系统互连和优势互补。

3)可扩展性原则:在兼顾了现有系统体系结构的基础上对未知系统也具有强的可扩展性,对于传统集群系统中的信息传播途径和标志节点进行相应的改造,将其中各能力单元进行组合并预留扩展通道。

4)隔离原则:为了防止执行不同任务或遭受敌方攻击时,系统重构时产生能力单元交叉干涉,应在重构中选用适宜的技术、方法和机制来分隔各能力单元,尽量保证将不同能力单元的功能、适应执行的任务从逻辑上进行分离,从实现上做到解耦。

3 互为主体在航空集群作战任务决策中的应用实例

实例 1:航空集群执行的作战任务包括目标搜

索与探测、定位跟踪、电子干扰以及攻击等^[16]。作战过程中,典型的航空集群按照任务时序的任务转换关系见图 8。当集群抵达待战区域后,首先进行目标搜索与探测任务,一旦发现目标即对该目标进行定位跟踪。当定位跟踪精度满足需要时,可以依据战术需要进行干扰或者攻击;如果目标丢失,则重新进行搜索与探测^[17]。任务级的互为主体应用贯穿于整个集群作战侦察、干扰、探测、通信、攻击、管理和评估的任务转换之间,依据每个时刻的战场态势,集群不断进行着作战任务和对抗措施的决策和转换。例如,在侦察探测阶段,我方集群主要对敌方目标进行协同搜索和定位跟踪;当集群感知到敌方雷达开机,对我方平台处于跟踪乃至锁定模式时,我方战机的生存受到较大威胁,此时我方平台应立即采取自卫干扰等措施,集群任务就发生了转换^[18]。

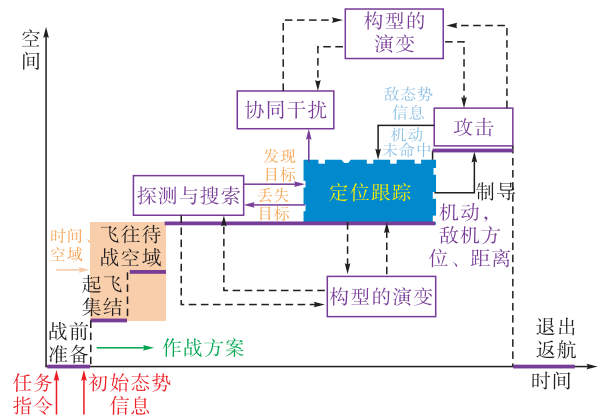


图 8 航空集群任务转换关系图

实例 2:本文以航空集群定位构型与波束联合优化为例说明互为主体在功能级、信息级和资源级的应用,如图 9 所示^[19]。

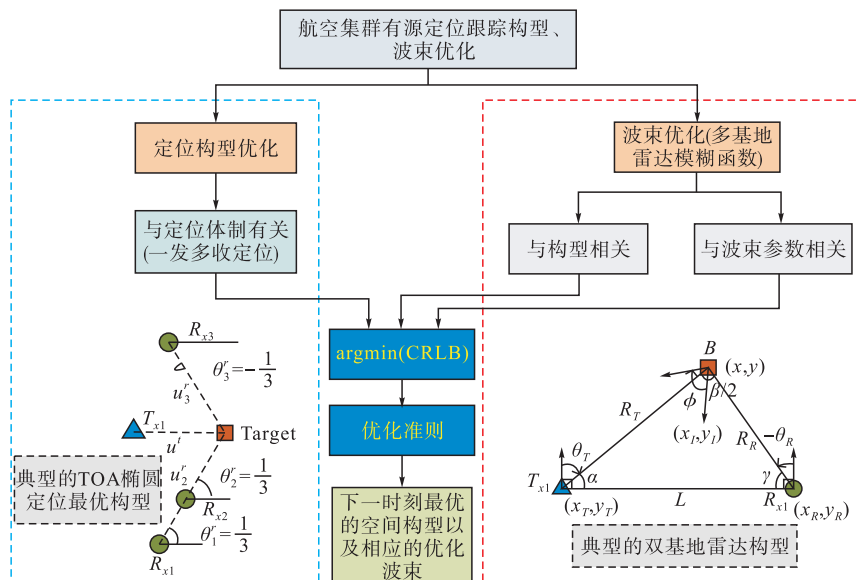


图 9 航空集群定位构型与波束联合优化

在执行定位跟踪任务时,为获得更优观测,可以发挥集群分布式平台的优势,通过对定位构型和发射波束进行联合优化,提高定位跟踪的精度。其中,在功能级层面,可以基于互为主体思想来确定每个时刻平台的功能是发射波束还是接收目标回波;在信息级层面,波束的优化既涉及到定位构型又涉及到波束参数,需要异质信息的联合处理;在资源级层面,软件资源要实时处理以最小化克拉美罗界(CRLB)为优化准则的最优构型和波束参数的计算更新,硬件资源要实时根据软件资源的处理结果进行构型调整和波束发射,关联资源和泛在节点也在这样的迭代更新中不断地进行分配调度,以达到航空集群定位构型与波束的联合优化,从而大幅度提升集群整体的态势感知能力和作战效能。

4 结语

在航空集群技术与作战运用中,互为主体提供了一种灵活的电子系统架构和决策机制设计方法,在实际运用中起到“以活胜僵”的效果。在每个时刻,根据效能最优的原则确定在资源级、信息级、功能级和任务级等不同层级中的主体,该主体具有在这个时刻的领导权;在不同时刻,主体是可变化的,也就是领导权因时因状况而变。通过互为主体的协同运行机制,每个时刻都选取适合的主体来最大化整体效能,从而达到全时全域的效能最优。

参考文献

- [1] 梁晓龙,孙强,尹忠海,等.大规模无人系统集群智能控制方法综述[J].计算机应用研究,2015,32(1):11-16.
- [2] 桂起权.从科学哲学视角看“主体间性”[J].江苏科技大学学报(社会科学版),2014,14(3):1-5.
- [3] 李三虎.技术哲学:从实体理论走向间性理论[J].长沙理工大学学报(社会科学版),2017,32(1):5-14.
- [4] 胡利平,梁晓龙,张佳强,等.航空集群系统构建机理研究[J].火力与指挥控制,2017,42(11):142-145.
- [5] 尹忠海,张凯成,杜华桦,等.基于事件驱动的信息物理融合系统建模[J].微电子学与计算机,2015,32(12):126-129.
- [6] 钟义信.知行学引论——信息 知识 智能的统一理论[J].中国工程科学,2004(6):1-8.
- [7] ZHAN J Y, JIANG Z P, WANG Y B, et al. Distributed Model Predictive Consensus with Self-Triggered Mechanism in General Linear Multi-Agent Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7): 3987-3997.
- [8] PALAU A S, PARLIKAD A K, DHADA M H. Multi-Agent System Architectures for Collaborative Prognostics[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019,30(15):2999-3013.
- [9] SHARF M, ZELAZO D. Analysis and Synthesis of MIMO Multi-Agent Systems Using Network Optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11):4512-4524.
- [10] 王玉冰,柏鹏,梁晓龙,等.基于互为主体的一体化电子系统认知雷达与电子战探析[J].现代雷达,2020,42(1):1-7.
- [11] WANG Y B, BAI P, LIANG X L, et al. Reconnaissance Mission Conducted by UAV Swarms Based on Distributed PSO Path Planning Algorithms[J]. IEEE Access, 2019, 7: 105086-105099.
- [12] 王玉冰,程嗣怡,周一鹏,等.参数寻优 LSSVM 算法在机载火控雷达工作模式判定中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(3):49-53.
- [13] 钟义信.机制主义人工智能理论——一种通用的人工智能理论[J].智能系统学报,2018,13(1):2-18.
- [14] HAYKIN S, XUE Y, SETOODEH P. Cognitive Radar: Step toward Bridging the Gap between Neuroscience and Engineering[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(11):3102-3130.
- [15] KELLERER W, KALMBACH P, BLENK A, et al. Adaptable and Data-Driven Softwarized Networks: Review, Opportunities, and Challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(4):711-731.
- [16] WANG W J, BAI P, WANG Y B, et al. Optimal Sensor Deployment and Velocity Configuration with Hybrid TDOA and FDOA Measurements[J]. IEEE Access, 2019, 7: 109181-109194.
- [17] 董晓璇,程嗣怡,周一鹏,等.基于时域模糊决策融合的雷达工作模式识别方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(6):59-65.
- [18] 王玉冰,程嗣怡,周一鹏,等.基于 DS 证据理论的机载火控雷达空空工作模式判定[J].现代雷达,2017,39(5):79-84.
- [19] WANG W J, BAI P, ZHOU Y, et al. Optimal Configuration Analysis of AOA Localization and Optimal Heading Angles Generation Method for UAV Swarms[J]. IEEE Access, 2019, 7: 70117-70129.

(编辑:姚树峰)