

基于并行作战环的无人机集群协同作战能力评估方法

林晋福^{1,2}, 朱玉³, 张佳强^{1,2}, 尚耀波^{1,2}

(1. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051; 2. 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室, 西安, 710051;
3. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对无人机集群基于信息网络的协同作战能力评估问题, 采用衡量信息不确定性程度的信息熵对网络的节点能力和作战边的权值进行量化, 构建信息流转动态评估网络。首先通过节点度受限最短路算法找出该网络可能的并行作战环, 分串行、并行和混合3种模式的计算法算出评估网络最小能力熵, 实现无人机集群协同作战行动量化评估; 然后通过对无人机集群海上封控作战行动进行能力评估, 验证该评估方法的有效性; 最后基于最大效能原则, 给出无人机集群协同策略和作战使用上的建议。

关键词 无人机集群; 协同网络; 作战能力评估; 并行作战环

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.004

中图分类号 V279; E926.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0033-08

Evaluation Method of UAV Swarm Cooperative Operational Capability Based on Parallel Operation Ring

LIN Jinfu^{1,2}, ZHU Yu³, ZHANG Jiaqiang^{1,2}, SHANG Yaobo^{1,2}

(1. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051;

2. Shaanxi Province Laboratory of Meta-synthesis for Electronic & Information System, Xi'an 710051;

3. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051)

Abstract In view of the evaluation problem of cooperative operational capability of UAV Swarm based on information network, the information entropy which is used to measure the degree of information uncertainty is utilized for quantifying the node capability of the network and the weight of the combat side, and a dynamic evaluation network of information flow is constructed. Through the shortest circuit algorithm with node degree limitation, a possible parallel combat ring of the network, and a minimum entropy of the network calculated by three kinds of computing methods, i. e. serial, parallel and mixed structures, are found out, realizing the quantitative evaluation of the cooperative combat action of UAV Swarm. The effectiveness of this evaluation method is verified by evaluating the capability of unmanned aerial vehicle (UAV) Swarm maritime containment and control operations. Based on the principle of maximum effectiveness, some suggestions on the cooperative strategy and operational use of UAV Swarm are given.

Key words UAV swarm; collaborative network; evaluation of operational capability; parallel operation ring

收稿日期: 2022-11-28

作者简介: 林晋福(1981-), 男, 福建永春人, 副教授, 博士, 研究方向为航空集群规划与网络。E-mail: lin-jinfu@163.com

引用格式: 林晋福, 朱玉, 张佳强, 等. 基于并行作战环的无人机集群协同作战能力评估方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(5): 33-40. Lin Jinfu, ZHU Yu, ZHANG Jiaqiang, et al. Evaluation Method of UAV Swarm Cooperative Operational Capability Based on Parallel Operation Ring[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 33-40.

无人机集群可在恶劣环境下完成侦察、搜救、边境巡逻和海域封控等任务^[1-2],具有伤亡少,长时间留空优点。但在完成任务能力方面,由多无人机组成的无人机集群更多依赖于多无人机的协同控制特性及与不确定性环境的交互,高度依赖信息网络的支撑,通过集群协同的方式完成作战任务。无人机协同作战和集群能力涌现等关键技术已经或正在突破^[3],还存在如何评价无人机集群基于网络提升作战能力,集群网络赋能难以量化,网络协同算法对任务完成的贡献度难以衡量的难题^[4]。

无人机平台评估方面,文献[5]综述集群试验评估方面所进行的开创性工作的基础上,主要对无人集群试验评估的概念内涵、发展现状进行了讨论分析;结合课题组在航空集群作战领域的研究基础,探讨无人集群试验评估的主要内容和可行的技术路线。文献[6]构建作战节点模型,没有考虑到一个武器具有多种能力的情况,如察打一体无人机,既有侦察监视能力又有打击能力。对这类节点的思考,应建立一个更贴合实际的武器装备体系网络模型。

信息网络及能力评估方面,如图1所示,无人机集群多层协同逻辑网络,包括传感网络、决策网络和作战网络^[7]。文献[8]主要针对特定的星链网络如何规划,进行参数正确性快速评估和业务服务性能评估。文献[9]提出了针对自己的算法和架构的考评指标,主要体现网络静态方面评估,没有考虑执行任务消耗时间对无人集群作战能力的影响。

综上,在无人机集群协同作战能力评估方面,还鲜有网络评估与作战任务相结合方面的研究。

1 问题描述及设计

1.1 基于逻辑网络的任务过程分析

无人集群的作战流程大体与博伊德循环(observe orient decide act, OODA)吻合,可将无人集群执行任务划分为4个过程,底层以信息流转相连。

1)观察(observe)。侦察无人机携带侦察载荷,对指定区域目标的协同搜索、定位、识别、查证和跟踪,形成目标分布的详细态势。

2)判断(orient)。侦察无人机持续侦察监视指定区域目标,将获取的电子情报进行信息融合和目标识别,获取目标类型、数量等信息,并实时向决策网络反馈作战信息,更新目标类型、数量等情报。必要时根据情报信息支援进行相应的敌我识别。

3)决策(decide)。分布式决策网络融合侦察无

人机获取的目标类型、数量等信息,判断目标群的概略意图,修订完善优化作战计划。决策可以在后方指挥所,也可授权前突集群进行决策。

4)行动(act)。作战攻击机实施封控计划,实时通过作战控制网调整队形,在作战过程中向决策网络反馈作战任务完成情况。

1.2 无人机集群分层连接模型

无人机集群作战任务过程需要协同,产生大量的信息交换和能力的输出,从逻辑角度考虑划分为决策网、作战行动网络、传感网3类逻辑网络,底层以通信网作支撑。在把作战目标纳入情况下,形成如图1所示的网络连接,OODA作战循环贯穿于每一个步骤,整体把几个逻辑网络串连起来。集群的协同作战能力分解为3个逻辑网络间协同能力以及3个逻辑网络内部交感所产生的能力涌现。

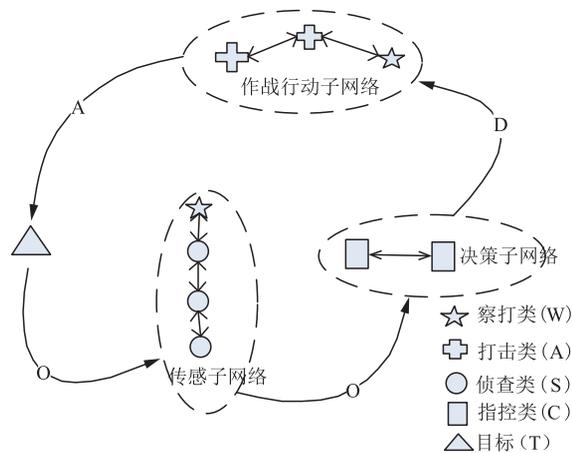


图1 无人机集群评估网络(逻辑)连接模型图

2 协同网络评估模型及指标体系

用OODA环模型对无人集群作战任务进行分析。各环在作战过程中会产生不确定性,产生对作战能力的影响。如目标不确定的概率值对攻击效果的影响,编队策略不统一/不确定对攻击效果的影响。这与信息论中信息熵的表达思想类似。每一个环对于逻辑网络的支撑,有相应的信息流转,需要信息交换。通过网络的信息交换消除不确定性达成了提高作战能力的目的。因此可以通过信息熵来刻画无人集群作战能力。按照公式可计算相应能力值,能力熵与作战能力建立一一对应关系,信息熵越小,能力值越大,范围在0~1之间。后面的讨论全部基于信息熵来讨论评估作战能力,亦可称为能力熵。

$$\text{Cap} = \exp(-E) \quad (1)$$

2.1 评估网络构建

如图2所示,形成OODA作战环评估网络。网络节

点为各作战实体和作战目标,网络的边表示各节点相互作用或信息传递,边的权重为能力熵和子任务执行时间。

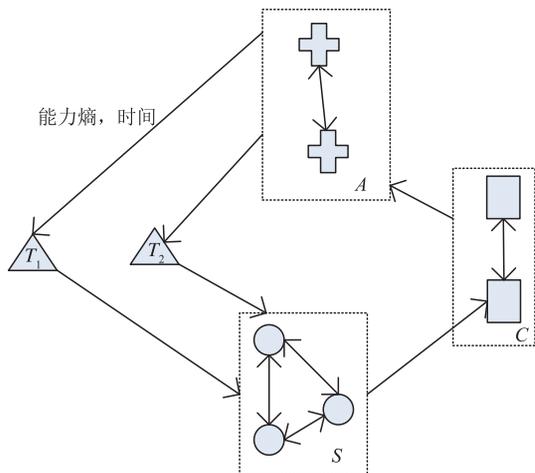


图 2 无人机集群评估网络示意图

在本论文中,集群中无人机将被称为无人机节点 UAV^[1]。考虑 N 架 UAV 通过相互之间的交互关系和交互体系结构,考虑图 $G=(V, E)$,其中 V 为节点集 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E \subseteq V \times V$ 。每个节点表示一个无人机,其连线对应于无人机间的信息流转关系。邻接矩阵 $A \in \{W\}^{N \times N}$ 表示图 G 中节点的邻接关系,如果 $(v_i, v_j) \in E$,则 $a_{ij} = W = (E, T)$,否则 $a_{ij} = 0$ 。第 i 架 UAV 的邻居节点集合记作 $N_i = \{j \in V: (v_i, v_j) \in E\}$,该集合节点数量即为 UAV _{i} 节点的度。节点 i 到 j 的路径 $P_{i,j} = (V, E)$, $V = \{v_i, \dots, v_j\}$, $E = \{v_{i2}, \dots, v_{i+n}, v_j\}$ 。节点权重的设计第一值代表能力熵 E ,第二值表示协同任务消耗时间 T 。

将作战单元的不同属性分别抽象为不同作战领域的协同行为即可得到一张网来分析整个集群的协同效果,而且基于相同的网络测度指标可对不同作战领域协同进行分析,度量协同作战能力。

2.2 节点能力模型

无人机集群节点可以归纳为 7 种能力^[10],不同类型无人机节点为这些能力的组合,如侦察类无人机节点包含数据传输、目标探测和目标识别 3 种能力。根据评估需要,还需要对目标节点的抗打击和反侦察 2 种能力一并进行量化。如图 3 所示,各作战节点的能力熵通过对作战网络中各节点的战技指标进行赋值,按定义的相应隶属函数进行计算^[11]。

1) 目标节点的反侦察和抗打击能力

机动速度隶属度 $R_1 = \{X_1 > 70 : 0.9; 50 < X_1 < 70 : 0.5; 30 < X_1 < 50 : 0.3; X_1 < 30 : 0\}$ 。预警时间隶属度函数 $R_2 = \{X_2 < 7 : 0.9; 7 < X_2 < 10 : 0.7; 10 < X_2 < 15 : 0.3; X_2 > 15 : 0.1\}$ 。权重矩阵 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4 \ \omega_5 \ \omega_6]$,可以根据任务情

景进行相应的调整。通过式(2)计算反侦察能力熵 E_{hide} 和抗打击能力熵 E_{an} 。

$$E_{an} = \sum_{i=1}^3 \omega_i \ln\left(\frac{1}{1-R_i}\right)$$

$$E_{hide} = \sum_{i=4}^6 \omega_i \ln\left(\frac{1}{1-R_i}\right)$$
(3)

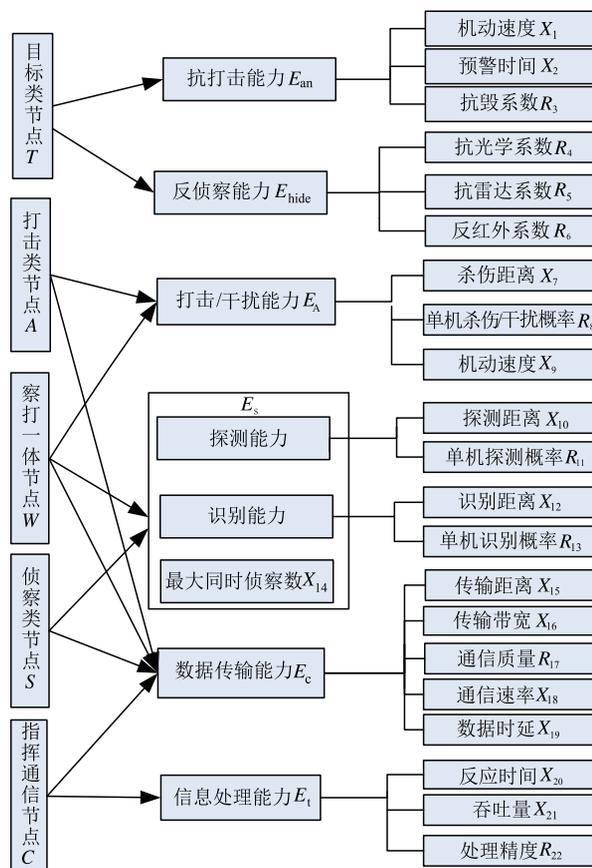


图 3 作战节点-能力-指标层次分解

2) 无人机侦察类节点探测、识别和跟踪能力

探测距离隶属度函数 $R_{10} = \{X_{10} > 30 : 1, 20 < X_{10} < 30 : 0.5; 10 < X_{10} < 20 : 0.3; X_{10} < 10 : 0.1\}$ ；识别距离隶属度函数 $R_{12} = \{X_{12} > 20 : 1, 15 < X_{12} < 20 : 0.5; 10 < X_{12} < 15 : 0.3; X_{12} < 10 : 0.1\}$ ；最大侦察数隶属度函数 $R_{14} = \{X_{14} > 10 : 1, 7 < X_{14} < 10 : 0.5; 3 < X_{14} < 7 : 0.3; X_{14} < 3 : 0.1\}$ 。默认权重矩阵 $\omega_s = [\omega_{10} \ \omega_{11} \ \omega_{12} \ \omega_{13} \ \omega_{14}]$ 。根据公式计算侦察能力熵 E_s 。

$$E_s = \sum_{i=10}^{14} \omega_i \ln\left(\frac{1}{R_i}\right)$$
(3)

3) 无人机节点攻击能力

打击类节点参数,对应 $X_7 \sim X_9$ 。杀伤半径隶属度函数 $R_7 = \{X_7 > 8 : 1, 5 < X_7 < 8 : 0.5; 3 < X_7 < 5 : 0.3; X_7 < 3 : 0.1\}$ 。机动速度隶属度 $R_9 = \{X_9 > 600 : 1, 400 < X_9 < 600 : 0.7; 300 < X_9 < 400 : 0.5; X_9 < 300 : 0.1\}$ 。一般为成本较低的自杀式攻击无人机,不具备同时对两个目标进行攻击的能

力。权重矩阵 $\omega_A = [\omega_7 \ \omega_8 \ \omega_9]$, 通过公式计算攻击能力熵 E_A 。

$$E_A = \sum_{i=7}^9 \omega_i \ln\left(\frac{1}{R_i}\right) \quad (4)$$

4) 无人机节点的信息处理能力

相当于无人预警指挥机或地面站。参数对应 $X_{20} \sim X_{22}$ 。反应时间隶属度函数 $R_{20} = \{X_{20} > 7 : 0.1; 5 < X_{20} < 7 : 0.3; 3 < X_{20} < 5 : 0.5; X_{20} < 3 : 0.9\}$ 。吞吐量隶属度函数 $R_{21} = \{X_{21} > 500 : 1; 500 < X_{21} < 700 : 0.7; 300 < X_{21} < 500 : 0.3; X_{21} < 300 : 0.1\}$ 。权重矩阵 $\omega_t = [\omega_{20} \ \omega_{21} \ \omega_{22}]$, 通过公式计算信息处理能力熵 E_t 。

$$E_t = \sum_{i=20}^{22} \omega_i \ln\left(\frac{1}{R_i}\right) \quad (5)$$

5) 节点间数据传输能力

权重矩阵 $\omega_c = [\omega_{15} \ \omega_{16} \ \omega_{17} \ \omega_{18} \ \omega_{19}]$ 。根据公式计算数据传输能力熵 E_c 。节点间考虑边的通断问题, 传输距离隶属度函数 R_i 为 $+\infty$ 时, 边的能力低到通信链路断开, 相当于这条边不存在。

$$R_{15} = \begin{cases} +\infty, \max\{x_{15}^1, x_{15}^2\} > 60 \\ 0, \max\{x_{15}^1, x_{15}^2\} < 60 \end{cases}$$

$$p_{16} = \min\{x_{16}^1, x_{16}^2\} / 1\ 000$$

$$p_{17} = x_{17}^1 x_{17}^2$$

$$p_{18} = \min\{x_{18}^1, x_{18}^2\} / 1\ 000$$

$$p_{19} = (x_{19}^1 + x_{19}^2) / 1\ 000$$

$$R_i = 1 - \frac{1}{e^{p_i} + e^{-p_i}} \quad (i = 16, 17, \dots, 19)$$

$$E_c = \sum_{i=15}^{19} R_i \omega_i$$

2.3 业务边能力熵计算

节点之间的相互作用主要通过边体现出来。具体量化用边的权重表示, 第一权重能力熵可通过计算得到, 第二权重为该行动需要耗费的时间 t 。

如图 2 所示, 有 T-S、S-C、C-A、A-T、S-S、C-C、A-A 共 7 种边。在相应信息流程的支撑下, 完成 OODA 环的每一个环节。同时逻辑网络具有学习能力和自演化功能, 集群的涌现能体现在平台的基本能力和网络赋能。逻辑网络及运行机制决定了无人机集群涌现。

1) T-S 边能力熵

OODA 环的开始, 对应无人集群协同查证环节, 其信息熵由目标类的反侦察能力熵 (E_{hide}) 与侦察类的探测 (E_1)、识别能力 (E_2) 和跟踪能力 (E_3) 共同作用决定。权重矩阵 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_{\text{hide}}]$ 。

$$E_{T-S} = E_1 \omega_1 + E_2 \omega_2 + E_{\text{hide}} \omega_h \quad (7)$$

目标的数量(作战节点入度)影响目标信息提供

的刷新率。通过时间体现出来。目标侦察交互关系主要衡量侦察类装备对目标节点的侦察能力, 在构建关联关系模型时, 根据装备的指标评估关联关系的能力值。在节点建模中, 侦察节点 S 分时使用去侦察多个目标, 会出现侦察消耗时间变长。对应作战环网络侦察节点入度 D 增多导致时间变长。具体计算方法为式(8)。

$$T_2 = T_1 * D \quad (8)$$

2) S-C 及 C-A 边能力熵

OODA 环的第二、三环节, 作战能力由指挥控制类节点与侦察类节点间的数据传输 (E_c) 和指挥控制类节点的信息处理能力熵 (E_t) 同作用决定。权重矩阵 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2]$, 计算方法为式(9)。C-A 边能力熵计算方法类同。

$$E_{S-C} = E_c \omega_1 + E_t \omega_2 \quad (9)$$

3) A-T 边能力熵

OODA 环的第最后环节, 对应无人集群协同围捕行动, 其信息熵由目标类抗打击能力 (E_{an}) 与打击类的打击能力 (E_A) 共同作用决定。作战环网络中不能并行的环节, 攻击机的数量为并行数的上限。

$$E_{A-T} = (E_{\text{an}} + E_A) / 2 \quad (10)$$

2.4 协同边能力熵计算

协同边发生同类型节点间, 能力提升通过能力熵计算体现, 在合并的基础上, 增加一个系数 K_s 表示。一般来说, 学习和进化能力的提升可以对其他各方面能力有一个促进, 因此, 本文认为学习进化能力(找环境学, 找对手学习)对基于信息网络的交感有一个综合加权的贡献。此外, 时间 t 消耗的越大, 对于的作战能力越低, 设计一个减函数, 用于计算 K_s 。

$$K_s = F(t) \quad (11)$$

1) 传感子网 S-S 边能力熵

OODA 环的第 2 环节, 由指挥控制类的数据传输能力熵和信息处理能力熵与侦察类的能力熵共同作用决定。需要把其他两边拉进来耦合运算。 K_s 为增强系数, 可根据对抗场景不同进行取值。见图 4。

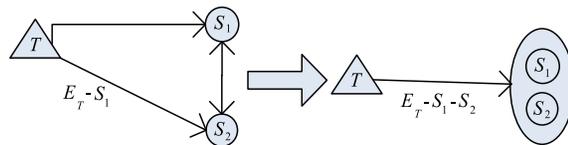


图 4 传感子网 S-S 合并

$$E_{T-S_1-S_2} = \frac{K_s}{\frac{1}{E_{T-S_1}} + \dots + \frac{1}{E_{T-S_2}}} \quad (12)$$

2) 决策子网 C-C 边能力熵

指标: 信息处理、信息保真度, 规划系统能力(基于网络的收集规划的输入和分布式的数据调用)、指

挥员实时决策能力、人机协作能力,统筹规划能力。见图 5。

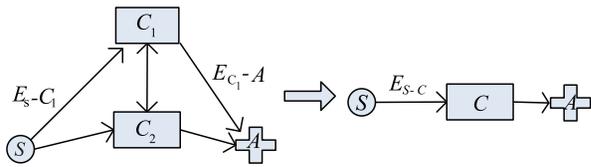


图 5 决策子网 C-C 合并

$$E_{s-c} = \frac{K_s}{\frac{1}{E_{s-c_1}} + \dots + \frac{1}{E_{s-c_2}}} \quad (13)$$

$$E_{c-a} = \frac{K_s}{\frac{1}{E_{c_1-a}} + \dots + \frac{1}{E_{c_2-a}}}$$

3) 作战/控制子网 A-A 边能力

具体能力熵的计算方法与 S-S 边类同。由于无人机集群单机的攻击能力弱,一般只能攻击一个目标,所以当目标数量多于攻击机数量,规划时一般不能将攻击机进行交感协同。

3 评估方法

将实际任务按照“作战任务→具体行动”的方法进行自顶向下的 OODA 分解,然后反过来基于各自的能力熵进行自底向上的聚合计算,最终得出无人机集群协同作战能力评估结果。

3.1 评估流程

具体流程包括以下 4 个方面。

1) 分解无人集群作战任务为具体作战行动,确定作战目标,对目标进行分析,根据具体任务场景确定整体的指标权重。

2) 构建评估网络,以作战节点作为网络节点,作战行动映射为网络边的连接关系。节点作战能力用装备作战性能概率参数表征,如果节点之间产生协同,能力的提升,量化表现为边的能力熵。

3) 计算战斗环的效能,作战环的能力熵即为各边能力熵的合成,即对某个目标的作战能力为并行作战环并联的信息熵。

4) 集群对多目标的作战能力为各目标的作战能力的加权和。同时计算总体时间对效能的影响。

3.2 评估网络路径能力熵的计算模式

评估网络路径的能力熵可以通过各边的能力熵进行合并计算。主要分为并联模式,串联模式,混合模式 3 种情况。

并联主要发生网络内同类节点发生协同/交感时,如图 6 所示,评估网络会产生双向边,不是单向网络。类似网络中 S-S 和 A-A 这种边的处理,将同类协同节点进行合并为一个节点,对相应的边关

系进行处理,完成时间和能力熵两方面进行重新计算,形成新的边和权值,生成新的网络。

串联主要发生 OODA 各环节的串行,各环的能力熵为各边能力熵之和。

从整个评估网络看就是以上 2 种模式的混合,如图 6 所示,整个并行的作战环为评估网络的子网,能力熵的计算为并联和串联模式的综合。并行作战环的求解变为节点度受限(侦察节点同时跟踪数)的最短路问题的求解问题。最短的并行作战环形成并行作战环的能力熵,即可表述无人机集群针对该任务的作战能力。

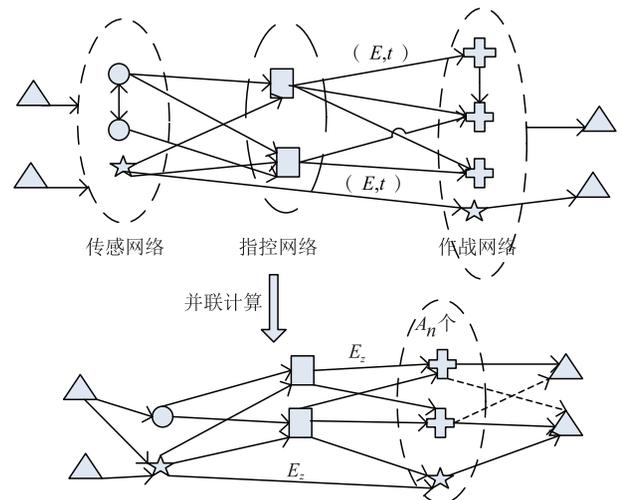


图 6 评估网络协同边处理示意图

3.3 评估网络时间权处理方法

考虑时间的消耗转化为相应的效能降低。本文总体思路为所有的能力都是时间 t 的减函数,即随着时间的消耗时间的增加,无人集群体现的能力下降。针对目标是否运动、有无障碍和威胁,可以分 4 种场景分别进行评估。

$$E = F(E_h, t) = E_h t K_t \quad (14)$$

无人机集群学习训练的场景和任务对抗程度有关,例如障碍/静态的场景可以进行图像目标的学习,可以消除不确定性,提高能力值(E 减小)。函数 F 对 t 为减函数,训练时间越长,可以消除交感/协同不确定性,能力熵值越低,能力增强。由于不是本文研究重点,简化为依据静态目标和动态目标,有无障碍或威胁分为 4 种类型的系数 K_t : ① 静态、无故障和威胁: $K_t = 0.05$; ② 静态、有故障或威胁: $K_t = 0.1$; ③ 动态无故障和威胁: $K_t = 0.1$; ④ 动态有障碍或威胁: $K_t = 0.3$ 。

按照式(14)处理,将并行作战环的能力熵与最长时间叠加为评估网络的综合能力熵。

3.4 并行作战环能力熵算法

现有评估方法一般统计所有作战环,文献[11]枚举列出所有的作战环,计算所有环的综合加权。从作战环的统计方法看,共有 2^N 条作战环(N 为无

人机数量)。攻击节点为物理域,非信息域,同一时间不能同时工作,存在不合理性。所以无人机集群能力仅能体现在一定时间范围内同时并行的作战环。

算法的总思路为根据无人机集群各类型无人机数量。依据信息流转关系,形成评估的网络的连接拓扑关系,对场景分析确定各类系数。以攻击机数量进行循环处理,生成各并行环的路径。

输入:目标数量 M_T 、各类无人机数量 M_s 、 M_c 、 M_A 、 M_w ,同类节点协同关系,目标清单。

根据目标的重要性分配关系形成 $A-T$ 边,攻击节点的出度为 1,侦察节点的最大入度为最大跟踪目标数。根据通信网络的通断关系判断边的通断,如图 6 所示,整个评估网为有向网络。以攻击节点 A 为中心,进行相应计算,算法流程如图 7 所示。

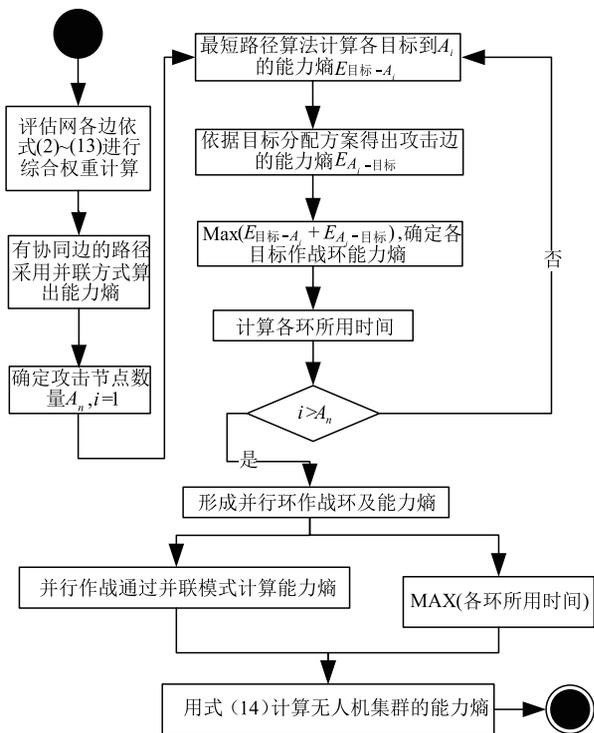


图 7 并行作战环能力熵算法流程图

输出:评估网络,并行作战环数量及路径,并行作战环的混合能力熵,集群协同作战能力。

4 评估验证范例

本文以无人机集群跨域作战为背景,实现海域封控作战作为实际范例,实现对无人机集群协同作战能力的网络建模及作战能力评估,并进行合理性验证。同时,还对作战环的作战能力计算结果进行分析,归纳出一些有意义的结论,作为指导实际作战的重要依据。

4.1 任务想定

无人机集群海域封控任务针对未知海上环境的

海面、空中、水下目标,实施协同搜索、查证、围捕等行动,综合考虑威胁规避、机动代价、通信连接、时空一致等约束,在指定海域完成巡逻、搜索、侦察、定位、跟踪和攻击等任务。评估对象:美军公开实验的 X-61A“小精灵”集群,分别挂载不同的载荷担任 4 种不同角色,完成跨域海面封控作战任务。主要的行动有协同查证、协同围捕军用运输补给船(T_1)和电子侦察船(T_2)。

4.2 无人机集群参数

根据装备的基本参数和实验方面的数据,在跨域海面封控任务中,几类节点典型的参数如表 1~6,按照 2.2 节方法计算各无人机节点的能力熵。

表 1 目标类节点参数

参数名称	代码	T_1	T_2
机动速度/(km/h)	X_1	35	28
预警时间/s	X_2	15	20
抗毁系数	R_3	0.8	0.9
抗光学系数	R_4	0.6	0.3
反雷达系数	R_5	0.4	0.6
反红外系数	R_6	0.8	0.6
抗打击能力熵	E_{an}	0.419 32	0.649 45
反侦察能力熵	E_{hide}	0.713 56	0.780 03

表 2 侦察类节点参数

参数名称	代码	S_1	S_2
探测距离/km	X_{10}	27	16
探测概率	R_{11}	0.6	0.7
识别距离/km	X_{12}	20	10
识别概率	R_{13}	0.6	0.5
最大同时侦察数	X_{14}	7	9
通信距离/km	X_{15}	40	65
通信速率/kbps	X_{16}	35	35
通信质量	R_{17}	0.8	0.8
通信容量/(MHz/s)	X_{18}	20	20
通信延迟/ms	X_{19}	800	800
探测识别能力	E_s	0.620 22	0.881 26
跟踪能力	E_z	0.897 48	1.336 92

表 3 指挥通信类节点参数

参数名称	代码	C_1	C_2
反应时间/s	X_{20}	2	4
吞吐量/kbps	X_{21}	100	700
信息处理准确度	R_{22}	0.7	0.8
通信距离/km	X_{15}	200	50
通信速率/kbps	X_{16}	80	60
通信质量	R_{17}	0.8	0.4
通信容量	X_{18}	35	35
通信延迟/ms	X_{19}	550	500
信息处理能力	E_i	0.890 19	0.250 2

表 4 攻击类节点参数

参数名称	代码	A_1	A_2
杀伤半径/km	X_7	8	7
杀伤概率	R_8	0.7	0.8
机动速度/(km/h)	X_9	500	300
通信距离/km	X_{15}	60	40
通信速率/kbps	X_{16}	8	8
通信质量	R_{17}	0.5	0.5
通信容量/(MHz/s)	X_{18}	35	35
通信延迟	X_{19}	550	550
攻击/干扰能力	E_a	0.249 7	0.364 1

在本案例中,察打一体无人机节点 W 通信能力与 S_1 一致,侦察能力为其一半,打击能力为 A_1 的一半。经计算汇总各作战边的能力熵如表 5 所示,

表 5 各类型作战任务边的能力熵及消耗时间

作战边	能力熵	消耗时间/s	作战边	能力熵	消耗时间/s
$T_1 \rightarrow S_1$	0.647 13	3	$C_1 \rightarrow A_1$	0.645 6	0.5
$T_1 \rightarrow S_2$	0.871 77	3	$C_2 \rightarrow A_1$	0.702 4	0.5
$A_1 \rightarrow T_1$	0.334 51	6	$C_1 \rightarrow A_2$	0.645 6	0.5
$A_1 \rightarrow T_2$	0.449 58	3	$C_2 \rightarrow A_2$	断开	—
$S_1 \rightarrow C_1$	0.562 3	1	$T_1 \rightarrow W$	1.294 3	3
$S_1 \rightarrow C_2$	断开	—	$W \rightarrow T_1$	0.669 02	6
$S_2 \rightarrow C_1$	0.562 3	1	$A_2 \rightarrow T_1$	0.391 71	6
$S_2 \rightarrow C_2$	0.623 4	1	$A_2 \rightarrow T_2$	0.506 78	3
$T_2 \rightarrow S_1$	0.771 56	3	$T_2 \rightarrow S_2$	0.911 65	3

评估方案设计主要考虑不同集群之间的对比和同一集群编成使用不同的协同方案的对比。为考虑装备之间的协同关系,如表 6 所示,方案 4 在方案 3 的基础上增加了侦察设备的交感协同,方案 5 和 6 增加侦察和攻击的交感协同。

表 6 无人机集群组成协同方案列表

节点类型	5 节点				7 节点		
	1	2	3	4	5	6	7
察打类	1	0	0	0	1	1	1
侦察类	0	3	2	2	2	2	2
攻击类	0	1	2	2	2	2	2
指挥类	0	1	1	1	2	2	2
目标	1	2	1	1	2	2	2
节点协同	无	S-S	无	s-s	无	s-s-A-A	s-s

4.3 权重系数列表

相应的权重系数根据无人机集群任务的特点,参考想定任务实验执行情况,基于专家经验进行估算赋值。具体权重系数如表 7 所示。

表 7 无人机集群海域封控作战能力参数权重系数

节点及协同能力	参数权重系数
反侦察和抗打击能力	0.3,0.2,0.5,0.2,0.2,0.6
探测、识别和跟踪能力	0.2,0.2,0.3,0.2,0.1
攻击能力	0.5,0.3,0.2
信息处理能力	0.2,0.3,0.5
数据传输能力	0.3,0.1,0.2,0.2,0.2
侦察行动($T-S$ 边)	0.2,0.2,0.6
决策行动($S-C$ 边)	0.7,0.3

4.4 集群评估网络及能力熵

图 8 中的虚线边代表方案 4 与方案 3 的区别。处理的方法进行处理。

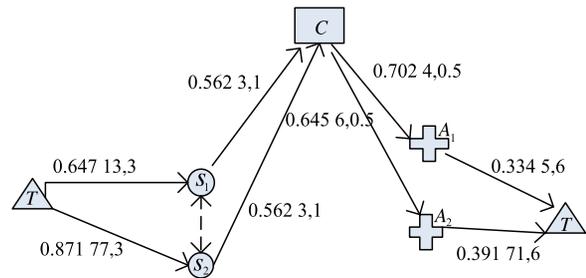


图 8 方案 3-4 评估网络示意图

4.5 评估数据对比分析

在形成的网络评估图 8 和 9 的基础上,使用 3.4 节的算法,算出了各个方案的并行环及作战能力,如表 8 和表 9 所示。

表 8 各方案作战效果统计表(5 节点)

方案	并行作战环	作战环熵	能力熵	时间/s	作战能力
1	$T_1-W-W-T_1$	1.963 32	1.963 32	9	0.170 85
2	$T_1-S_1-S_2-$	1.831 00	1.831 00	10.5	0.146 23
	$W-C-A_1-T_1$				
3	$T_1-S_1-C-A_1-T_1$	2.189 54	1.108 9	10.5	0.312 13
	$T_1-S_1-C-A_2-T_1$				
4	$T_1-S_1-S_2-$	1.970 62	1.014 81	10.5	0.344 54
	$C-A_1-T$				
	$T_1-S_1-S_2-$				
	$C-A_2-T_1$				
5	$T_2-S_1-S_2-$	1.956 32	1.986 32		
	$C_1-A_1-T_2$				
	$T_2-S_1-S_2-$				
6	$T_2-S_1-S_2-$	1.986 32			
	$C_1-A_2-T_2$				

从表 8 对比看出,方案 1 中察打一体无人机单独的作战能力明显低于 5 节点集群中方案 3 和方案 4 的作战能力。说明集群的并行处理对协同作战能力有明显的提升。方案 2 比方案 1 多了 4 个节点,但整体作战能力 0.146 23 反而低于察打一体无人机的 0.170 8。说明如果没有形成协同并行作战环,单单增加集群无人机数量对作战能力提升没有效果。

表9 各方案作战效果统计表(7节点)

方案	并行作战环	作战环熵	能力熵	时间/s	作战能力
	$T_2-S_1-C_1-A_1-T_2$	2.429 04			
5	$T_1-S_2-C_1-A_2-T_1$	2.471 38	0.754 34	10.5	0.470 32
	$T_1-W-W-T_1$	1.963 32			
6	$T_2-S_1-S_2-C_1-A_1-A_2-T_2$	1.839 64	0.949 73	10.5	0.368 90
	$T_1-W-W-T_1$	1.963 32			
7	$T_1-W-W-T_1$	1.963 32			
	$T_2-S_1-S_2-C_1-A_1-T_2$	1.956 32	0.503 44	7.5	0.685 52
	$T_2-S_1-S_2-C_1-A_2-T_2$	1.986 32			

从表9对比方案5~7的作战能力。方案6虽然采取传感子网和作战攻击子网的协同,整个能力反而低于方案5和方案7的多作战环并行方案。经分析发现主要因为并行的数量少。方案7既有多作战环并行又有子网内的协同,作战能力最高。

为进一步分析作战能力值与集群中无人机数量和并行作战环数量的关系,抽取表8的数据形成图9。发现3条曲线基本为增函数,即随着无人机数量和并行环数量的增加,集群的作战效能同步增加。与日常的认知相同。但是协同作战能力曲线与并行环数量的曲线完全一致,与飞机数量曲线与它们不太一致。这个结论不能用无人机堆砌出来的作战环衡量集群能力的分析进一步验证,说明无人机集群数量的增加并不能直接提升作战能力,而是需要相应的协同策略和恰当的作用使用方法。

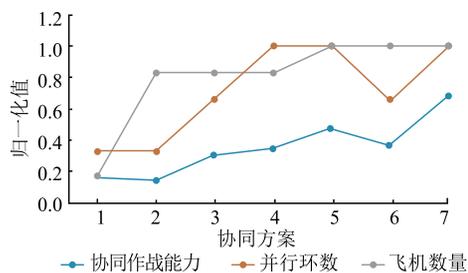


图9 作战能力-并行环数-无人机飞机数量关系曲线图

基于最大效能原则,从协同策略和作战使用上的建议:①同类节点的协同原则,主要在传感子网实现侦察节点的协同,尽量降低作战环的能力熵。攻击作战子网内仅仅当攻击节点远远大于目标数量才开展,这样能增加集群并行环的数量,提高作战效能。②传感节点协同后的信息可以提供给多个攻击节点,无需为每个攻击节点配置独立的传感节点,充分体现信息的可重用性。

5 结语

本文研究无人机集群基于信息网络的协同作战能力评估问题,在无人机集群信息网络的基础上设计了评估网络模型和评估网络能力熵的计算方法,实现了无人机集群协同作战能力的量化评估,为体系作战能力量化评估的有益探索,对无人机集群协同作战应用具有重要的参考价值。后期将针对评估指标权重及时间对效能的影响系数的调节问题进行研究,考虑通过相应专家经验和机器学习相结合方式进行解决。

参考文献

- [1] 梁晓龙,张佳强,吕娜. 无人机集群[M]. 西安:西北工业大学出版社,2018.
- [2] OTTO. Optimization Approaches for Civil Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) or Aerial Drones: A Survey[J]. Networks, 2018,72(4):411-458.
- [3] 段海滨,张岱峰,范彦铭,等. 从狼群智能到无人机集群协同决策[J]. 中国科学:信息科学,2019,49(1):112-118.
- [4] 司光亚,王艳正. 网络空间作战建模仿真[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [5] 梁晓龙,侯岳奇,等. 无人集群试验评估研究现状及理论方法[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(6):846-854.
- [6] 商慧琳. 武器装备体系作战网络建模及能力评估方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- [7] 王璞,史翔宇,李超. 基于 DoDAF 的无人机协同作战效能评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2020,21(6):66-72.
- [8] 王琦,顾亚楠,汪勃. 复杂星间链路网络规划评估方法[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学),2021,51(1):137-148.
- [9] 刘涛,白光哈,陶俊勇,等. 面向任务的复杂系统韧性评估方法[J]. 系统工程与电子技术,2021,43(4):1003-1011.
- [10] FAN J, LI D, LI R. Evaluation of MAV/UAV Collaborative Combat Capability Based on Network Structure [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018:1-12.
- [11] 陈士涛,张海林. 基于作战网络模型的异构无人机集群作战能力评估[J]. 军事运筹与系统工程,2019,33(1):38-43.

(编辑:徐敏)