

无人机集群协同态势觉察一致性评估

高 杨,李东生,柳 向

(国防科技大学电子对抗学院,安徽合肥 230037)

摘 要: 无人机集群协同态势感知一致性是影响集群协同决策控制的重要因素,已有集群态势感知研究集中在多传感器态势数据融合,对态势感知一致性的讨论不充分,本文对集群协同态势觉察一致性评估方法进行设计. 结合集群协同作战特点,分析集群协同态势感知一致性;建立集群协同态势觉察一致性评估模型,指出态势觉察一致性的可用情况;考虑战场信息的不确定性、指标的相关性等因素,提出基于非线性处理和指标变权的区间数形式下的态势觉察一致性计算方法. 分析表明,与基于组合赋权的方法相比,本文方法在表示精度、差异度等方面有较好表现,可用于集群协同作战仿真和集群系统优化设计等研究.

关键词: 无人机; 无人机集群; 态势感知; 态势觉察; 态势感知一致性; 一致性评估

中图分类号: TP391; TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)01-0190-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.025

UAV Swarm Cooperative Situation Perception Consensus Evaluation

GAO Yang, LI Dong-sheng, LIU Xiang

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle(UAV) swarm cooperative situation awareness(SA) consensus plays a key role in swarm cooperative decision and control, and the existing studies of SA focus on multi-sensors situation data fusion, but the discuss of SA consensus is not sufficient. The evaluation method of swarm cooperative situation perception consensus is designed. Combined with the characteristics of swarm cooperative engagement, the swarm cooperative SA consensus is analyzed. The swarm cooperative situation perception consensus analysis models are established and the possible usages are given. Considering the uncertainty of battlefield information and the relevance of indexes, we design the consensus calculation method based on nonlinear dispose and the variable weights. The calculating example analysis shows that compared with the method via combination weight, the proposed method can have a better performance in the accuracy and distinction, and can be used for the study of swarm cooperative engagement simulation and the swarm system optimization design.

Key words: unmanned aerial vehicle(UAV); UAV swarm; situation awareness; situation perception; situation awareness consensus; consensus evaluation

1 引言

在日益复杂的作战环境和作战任务下,集群自主协同作战的重要性日趋凸显. 集群协同态势感知是无人机集群协同决策控制的基础,集群协同态势感知一致性是影响集群协同决策的重要因素^[1,2],对集群协同态势感知及其一致性的研究尚不充分.

集群协同态势感知一致性是集群基于个体态势感知,通过多层次态势信息交互以弱化对抗环境引起的信息不确定性的不良影响,对任务相关态势形成一致

的认知^[3,4],并做出协同决策的过程中存在的一致性形成、度量与评价问题,涉及到信息域、认知域、社会域等多个作战子域. 信息域层次的集群协同态势感知一致性,对应于态势感知的态势觉察阶段,记为集群协同态势觉察一致性.

信息质量评估方法^[5-7]以统计的形式研究复杂系统在信息域的表现,无需关注信息的获取过程. 对集群协同这一复杂系统,可借助信息质量评估方法对集群协同态势觉察一致性进行研究. 基于此,首先对集群协同态势感知一致性进行分析,建立集群协同态势觉察

一致性评估指标;考虑战场环境带来的不确定性、指标的关联性等因素,设计协同态势觉察一致性评估方法;通过算例分析对比评估方法的合理有效性.

2 态势感知一致性分析

无人机分布式集群将实现作战模式由传统的大型单一平台多功能集中式向小型多平台功能分布式的转变,不失一般性,下文均以同构无人机集群为例进行分析.在无人机集群协同作战过程中,个体均能独立完成“感知-调整-决策-执行”(OODA)环.无人机集群协同决策是集群优势的核心,集群协同态势感知一致性是实现群体一致性决策的前提.

从理论上分析,集群协同态势感知一致性是集群协同态势感知的要求,共享态势感知是提高一致性的重要途径^[8,9];从作战需求上分析,集群获取的态势信息与真实态势信息的一致性、集群中的个体对任务相关态势理解的一致性等,直接影响集群协同作战效果;从态势信息的不确定处理上分析,由于环境的对抗性,个体获取的态势信息存在不确定性,对态势的认知存在差异,甚至谬误,集群通过个体间多层次的态势信息交互,尽量消除不确定性对集群协同决策的不良影响,得到符合作战任务需求的一致决策.

集群协同态势觉察一致性是集群获取的态势要素信息和真实态势的一致性.个体态势觉察过程如图 1 所示,个体经过有效任务载荷中的(多)传感数据融合得到目标的态势要素信息,由于战场环境的对抗性等因素,单机获取的态势要素信息具有不完整性、不确定性,通过集群内部各机的态势信息交互,对态势信息融合,得到较为“完整”、“可靠”的态势要素信息.

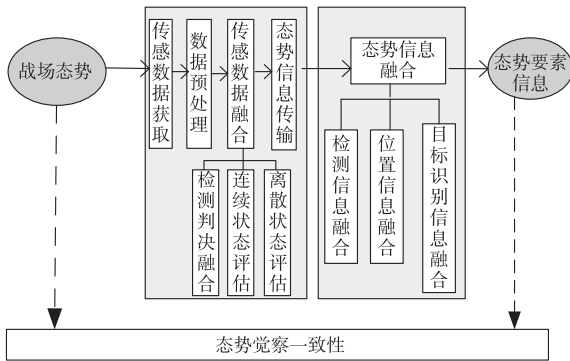


图1 个体态势觉察一致性

3 态势觉察一致性指标及评估方法

3.1 指标体系与指标模型

集群协同完成作战任务,需要在一定的作战时间内尽可能完备地、准确地获取任务相关态势信息,同时需要对协同作战目标进行信息共享,从完备性、准确性、

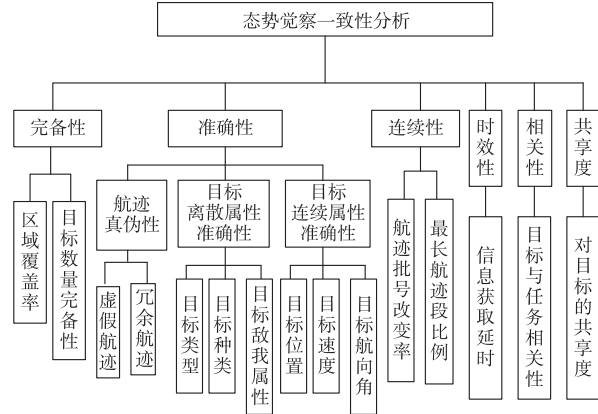


图2 一致性评估指标体系

连续性、时效性、相关性、共享度等六个方面对集群协同态势觉察一致性进行分析,建立图 2 所示态势觉察一致性指标体系.在实际操作中,经常假设我方的态势信息是一致的,主要考虑敌方的任务(目标)相关态势.

3.1.1 完备性

(1) 区域覆盖率

区域覆盖率为集群在安全通信距离下集群侦测范围与任务(目标)相关作战区域范围的比.文献[10]研究了基于集群安全通信距离的编队协同控制方法,定义了无人机的集群半径、通信半径等概念.可通过无人机集群半径和集群通信半径来表征集群侦测范围,以得到区域覆盖率.

假设集群中有 M 架无人机,任务相关作战区域范围为 S (二维)或 V (三维),集群中无人机 m 在第 k 次态势更新时刻 t_k 的位置为 $\mathbf{P}_m(t_k) \in \mathbf{R}^l, m \in [1, M], l \in \{2, 3\}, \mathbf{O}(t_k)$ 为虚拟的集群中心位置,各无人机的通信半径为 r_m, t_k 时刻的集群半径 $R_1(t_k)$ 、集群通信半径 $R_2(t_k)$ ^[10] 为:

$$R_1(t_k) = \min \{r | r \geq \|\mathbf{P}_m(t_k) - \mathbf{O}(t_k)\|_2, \quad (1)$$

$$\forall m \in [1, M], \exists \mathbf{O}(t_k) \in \mathbf{R}^l, l \in \{2, 3\}$$

$$R_2(t_k) = \min \{r | r \geq \|\mathbf{A}_m(t_k) - \mathbf{O}(t_k)\|_2, \quad (2)$$

$$\exists \mathbf{O}(t_k) \in \mathbf{R}^l, \mathbf{A}_m(t_k) \in \{\mathbf{A}_m(t_k) \in$$

$$\mathbf{R}^l | r_m \geq \|\mathbf{A}_m(t_k) - \mathbf{P}_m(t_k)\|_2\}, \forall m \in [1, M]$$

取集群在安全通信距离下的侦测半径 $R_3(t_k)$ 为:

$$R_3(t_k) = \lambda R_1(t_k) + (1 - \lambda) R_2(t_k), \lambda \in (0, 1) \quad (3)$$

则 t_k 时刻的集群区域覆盖率为:

$$C_1(t_k) = \frac{\pi [R_3(t_k)]^2}{S} \text{ 或 } C_1(t_k) = \frac{\pi [R_3(t_k)]^2 \cdot H}{V} \quad (4)$$

其中 H 为集群的平均有效作战高度;约定有效侦测范围不小于任务区域范围时,区域覆盖率为 1.

(2) 目标数量完备性

目标数量完备性是无人机集群在任务区域内侦测

到的目标数和区域目标数的比. 现有研究存在两点不足: 一是没有考虑目标的重要程度; 二是对目标数量完备性的衡量标准不合理, 没有从态势特征层面考虑.

假设集群中有 M 架无人机协同侦测, 在第 k 次态势更新时刻 t_k , 被侦测区域内存在 N 个级别 $O(t_k)$ 个目标, 各级分别有 $O_1(t_k), \dots, O_i(t_k), \dots, O_N(t_k)$ 个目标, 重要程度为 $a_i, i \in [1, N]$, $\sum a_i = 1$, 需要侦测目标 j 的 $D_j(t_k)$ 个态势特征. 集群中无人机 m 获取其中 $J_m(t_k)$ 个目标的信息, 各级目标分别有 $J_m^1(t_k), \dots, J_m^i(t_k), \dots, J_m^N(t_k)$ 个, 且侦测到目标 j 的 $G_{m,j}(t_k)$ 个态势特征. 则 t_k 时刻集群目标数量完备性为:

$$C_2(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \frac{a_i \sum_{j=1}^{J_m^i(t_k)} G_{m,j}(t_k)}{\sum_{j=1}^{O_i(t_k)} D_j(t_k)} \quad (5)$$

(3) 完备性计算

完备性可选 $C_1(t_k)$ 或 $C_2(t_k)$ 进行表征, 也可将二者集成为:

$$C(t_k) = C_1(t_k) \times C_2(t_k) \quad (6)$$

3.1.2 准确性

(1) 航迹真伪性

航迹真伪性指虚假航迹、冗余航迹与总(目标)航迹的比率. 假设集群中有 M 架无人机, 在第 k 次态势更新时刻 $t_k, J_m(t_k)$ 为无人机 m 所掌握的至少有一条航迹的目标数, $N_{m,j}(t_k)$ 为 m 所掌握的指向第 j 个目标而不相关的航迹数, $N_m(t_k)$ 为 m 所掌握的航迹数, 则 t_k 时刻集群的虚假航迹真伪性 $F_1(t_k)$ 和冗余航迹真伪性 $F_2(t_k)$ 为:

$$F_1(t_k) = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M (N_m(t_k) - \sum_{j=1}^{J_m(t_k)} N_{m,j}(t_k))}{\sum_{m=1}^M N_m(t_k)} \quad (7)$$

$$F_2(t_k) = \frac{\sum_{m=1}^M J_m(t_k)}{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m(t_k)} N_{m,j}(t_k)} \quad (8)$$

其中 $F_1(t_k), F_2(t_k) \in [0, 1]$. 航迹真伪性可表示为:

$$F(t_k) = w \times F_1(t_k) + (1 - w) \times F_2(t_k), w \in (0, 1) \quad (9)$$

(2) 连续属性准确性

连续属性准确性是集群获取的目标位置(三维)、目标速度(三维)、目标航向角(二维)等连续态势特征与真实连续态势特征的一致性. 假设集群中有 M 架无人机, 在第 k 次态势更新时刻 t_k , 个体 m 觉察到了 $J_m(t_k)$ 个目标, 每个目标有 $J_m^N(t_k)$ 个连续属性, $\mathbf{P}_{i,j}^m(t_k)$ 和 $\mathbf{G}_{i,j}^m(t_k)$ 分别表示第 i 个目标的第 j 个觉察态势特征

和真实态势特征. 记为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{i,j}^m(t_k) &\in \mathbf{R}^l, \\ i &\in \{1, 2, \dots, J_m(t_k)\}, \\ j &\in \{1, 2, \dots, J_m^N(t_k)\}, l \in \{2, 3\}; \\ \mathbf{G}_{i,j}^m(t_k) &\in \mathbf{R}^l, \\ i &\in \{1, 2, \dots, J_m(t_k)\}, j \in \{1, 2, \dots, J_m^N(t_k)\}, l \in \{2, 3\}. \end{aligned}$$

则 t_k 时刻集群连续属性准确性为:

$$V_c(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{J_m(t_k)} \left(1 - \frac{1}{J_m^N(t_k)} \times \sum_{j=1}^{J_m^N(t_k)} \frac{\|\mathbf{P}_{i,j}^m(t_k) - \mathbf{G}_{i,j}^m(t_k)\|_2}{\|\mathbf{P}_{i,j}^m(t_k)\|_2} \right)}{J_m(t_k)} \quad (10)$$

(3) 离散属性准确性

离散属性准确性是集群获取的目标类型、目标种类、目标敌我属性等离散态势特征与真实离散态势特征的一致性. 假设集群中有 M 架无人机, 在第 k 次态势更新时刻 t_k , 个体 m 觉察到了 $J_m(t_k)$ 个目标, 每个目标有 $J_m^N(t_k)$ 个离散属性, $\delta_{i,j}^m(t_k)$ 表示第 i 个目标的第 j 个觉察态势特征和真实态势特征的一致情况:

$$\delta_{i,j}^m(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{特征一致} \\ 0, & \text{特征不一致} \end{cases} \quad (11)$$

则 t_k 时刻集群离散属性准确性为:

$$V_d(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{J_m(t_k)} \sum_{j=1}^{J_m^N(t_k)} \delta_{i,j}^m(t_k)}{J_m(t_k) \times J_m^N(t_k)} \quad (12)$$

(4) 准确性计算

由于航迹真伪性、目标连续属性准确性和目标离散属性准确性的相对独立性, 准确性表示为:

$$V(t_k) = w_1 \times F(t_k) + w_2 \times V_c(t_k) + w_3 \times V_d(t_k), \sum_i w_i = 1 \quad (13)$$

3.1.3 连续性

连续性指获得连续、稳定态势的能力, 有航迹批号改变率和最长航迹段比两种表征方式.

(1) 航迹批号改变率

假设集群中有 M 架无人机, 个体 m 觉察到了 J_m 个动目标, $T_{j,m}$ 为目标 j 被 m 跟踪的总时间, $N_{j,m}$ 为 j 在时间内航迹号的最小数量. 则 t_k 时刻集群航迹批号改变率为:

$$B(t_k) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m} (N_{j,m} - 1)}{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m} T_{j,m}} \quad (14)$$

(2) 最长航迹段比

假设集群中有 M 架无人机, 个体 m 觉察到了 J_m 个动目标, 其中 T_j 为目标 j 的维持时间, $T_{j,m}$ 为目标 j 的所

有航迹中拥有同一航迹号的最长连续航迹段的持续时间. 则 t_k 时刻集群的最长航迹段比为:

$$L(t_k) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m} T_{j,m}}{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^{J_m} T_j} \quad (15)$$

3.1.4 时效性

时效性是信息获取时间满足任务时间要求的程度, 此处信息获取时间是获取满足 3.1.1 节完备性的目标态势特征的时间. 假设集群中有 M 架无人机, 在第 k 次态势更新时刻 t_k , 个体 m 觉察到了 $J_m(t_k)$ 个目标, 获取第 p 个目标的延时为 $\Delta t_{p,m}$, T 为获取目标的最小时间要求, 当延时超过态势更新时间或态势更新时间超过获取目标的最小时间要求, 时效性差. 则个体 m 在时刻 t_k 获取第 p 个目标的时效性为:

$$\delta_{p,m}(t_k) = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta t_{p,m}}{t_k - t_{k-1}}, & \Delta t_{p,m} < t_k - t_{k-1} < T \\ 0, & \Delta t_{p,m} > t_k - t_{k-1} \text{ or } t_k - t_{k-1} > T \end{cases} \quad (16)$$

则 t_k 时刻集群的时效性为:

$$T(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{p=1}^{J_m(t_k)} \delta_{p,m}(t_k)}{J_m(t_k)} \quad (17)$$

3.1.5 相关性

相关性是侦测目标和执行的多个任务间的相关性. 假设集群中有 M 架无人机, 在第 k 次态势更新时刻 t_k , 个体 m 觉察到了 $J_m(t_k)$ 个目标, 并在该阶段执行 W 个(子)任务. 则个体 m 在时刻 t_k 获取的目标 i 和任务的相关性为:

$$\delta_{i,w}^m(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{目标 } i \text{ 与任务 } w \text{ 相关} \\ 0, & \text{目标 } i \text{ 与任务 } w \text{ 无关} \end{cases} \quad (18)$$

则 t_k 时刻集群的相关性为:

$$R(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{J_m(t_k)} \sum_{w=1}^W \delta_{i,w}^m(t_k)}{J_m(t_k) \times W} \quad (19)$$

3.1.6 共享度

共享度是集群中共享目标的节点数和可以共享目标的节点数的比, 此处共享目标的节点是均需要该目标的某些态势特征的节点. 假设集群中有 M 架无人机, 第 k 次态势更新时刻 t_k , 个体 m 觉察到了 $J_m(t_k)$ 个目标, 则个体 m 在时刻 t_k 获取目标 i 的共享度为:

$$\delta_{i,m}(t_k) = \frac{\text{共享第 } i \text{ 个目标的节点数}}{\text{可以共享第 } i \text{ 个目标的节点数}} \quad (20)$$

则 t_k 时刻集群的共享度为:

$$S(t_k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{J_m(t_k)} \delta_{i,m}(t_k)}{J_m(t_k)} \quad (21)$$

同构无人机集群协同态势觉察一致性的指标可依据任务和无人机集群情况进行选取. 对于异构无人机集群的协同态势觉察一致性可通过多个同构无人机群的态势觉察一致性融合得到.

3.1.7 态势觉察一致性使用说明

集群协同态势觉察一致性可用于集群协同作战仿真等研究, 有但不限于以下用法:

(1) 在集群协同完成作战任务(仿真)过程的各时间段, 选取一致性指标, 评估相应时间段的态势觉察一致性, 分析当前时间段的一致性是否满足集群协同作战的需要, 对集群的控制策略做出调整, 以提高任务完成效果;

(2) 分析不同构成的无人机集群完成某作战任务的潜在作战效果: 通过设置相同的作战任务与作战场景, 在相同的评估时间段内主要作战目标态势更新次数相同, 分析各无人机集群在该时间段内的态势觉察一致性, 以表示潜在的任务完成能力;

(3) 分析无人机集群协同作战受对抗环境、节点损毁(无人机损毁或失能)等的影响: 通过设置相同的作战任务, 在相同的评估时间段内主要作战目标态势更新次数相同, 分析无人机集群在不同对抗环境下在该时间段内的态势觉察一致性.

设 $\mathbf{Z}(t_k) = (z_{i,j}(t_k))_{q \times 6} = [\mathbf{Z}(t_k)_q \quad \mathbf{V}(t_k)_q \quad \mathbf{L}(t_k)_q \quad \mathbf{T}(t_k)_q \quad \mathbf{R}(t_k)_q \quad \mathbf{S}(t_k)_q]$, $i \in [1, q]$, $k \in [1, K]$, 其中 K 为评估时间段内态势更新次数, q 表示(2)中不同构成的无人机集群或(3)中考虑的不同情况. 若用于(1), q 表示连续的评估时间段, 各时间段内 K 一般不同.

3.2 协同态势觉察一致性计算方法

3.2.1 构造非线性处理的区间决策矩阵

(1) 去均值化:

$$\bar{\mathbf{Z}}(t_k) = (\bar{z}_{i,j}(t_k))_{q \times 6}, \bar{z}_{i,j}(t_k) = z_{i,j}(t_k) - E(z_j) \quad (22)$$

其中 $E(z_j)$ 为 K 个时刻所有第 j 个指标值的期望.

(2) 非线性处理:

$$\tilde{\mathbf{Z}}(t_k) = (\tilde{z}_{i,j}(t_k))_{q \times 6}, \tilde{z}_{i,j}(t_k) = \frac{1}{\pi} \arctan(\bar{z}_{i,j}(t_k)) + E(z_j) \quad (23)$$

(3) 构造区间决策矩阵:

$$\tilde{\mathbf{Z}} = (\tilde{z}_{i,j})_{q \times 6}, \tilde{z}_{i,j} = \begin{cases} \tilde{z}_{i,j}^L = \min_K \{ \tilde{z}_{i,j}(t_k) \} \\ \tilde{z}_{i,j}^R = \max_K \{ \tilde{z}_{i,j}(t_k) \} \end{cases}, \begin{cases} \tilde{\mathbf{Z}}^L = (\tilde{z}_{i,j}^L)_{q \times 6} \\ \tilde{\mathbf{Z}}^R = (\tilde{z}_{i,j}^R)_{q \times 6} \end{cases} \quad (24)$$

3.2.2 区间变权求取策略

指标权重的合理设置需要综合主客观因素, 为此提出区间变权求取策略. 首先使用群 AHP 方法^[11]得到

各指标的初始权重 $\mathbf{W} = (w_1, \dots, w_6)$; 初权修正区间决策矩阵以求取变权 $\mathbf{W}' = (w'_1, \dots, w'_6)$, 在变权中区分度高的指标的权重有所提高, 区分度低的指标的权重有所下降, 等价于通过修正的区间决策矩阵和变权表示的评价值最分散, 可用方差表征分散度^[12,13]. 变权求取流程如下:

(1) 用初权修正区间决策矩阵:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{Z}}^L = (\hat{z}_{i,j}^L)_{q \times 6} \\ \hat{\mathbf{Z}}^R = (\hat{z}_{i,j}^R)_{q \times 6} \\ \hat{z}_{i,j}^L = w_j \times \tilde{z}_{i,j}^L \\ \hat{z}_{i,j}^R = w_j \times \tilde{z}_{i,j}^R \end{cases} \quad (25)$$

(2) 最大化评价值的方差以求取变权:

$$\begin{aligned} & \max \text{var}(\mathbf{D}^L) + \text{var}(\mathbf{D}^R) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{D}^L = \mathbf{W}' \bullet \hat{\mathbf{Z}}^L \\ \mathbf{D}^R = \mathbf{W}' \bullet \hat{\mathbf{Z}}^R \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

(3) 规范变权求取方程:

$$\text{设 } \begin{cases} y_{i,j}^L = \hat{z}_{i,j}^L - \hat{z}_j^L \\ \hat{z}_j^L = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \hat{z}_{i,j}^L \\ \mathbf{Y}^L = (y_{i,j}^L)_{q \times 6} \\ \mathbf{Q}^L = \frac{(\mathbf{Y}^L)^T \mathbf{Y}^L}{q} \end{cases}, \begin{cases} y_{i,j}^R = \hat{z}_{i,j}^R - \hat{z}_j^R \\ \hat{z}_j^R = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \hat{z}_{i,j}^R \\ \mathbf{Y}^R = (y_{i,j}^R)_{q \times 6} \\ \mathbf{Q}^R = \frac{(\mathbf{Y}^R)^T \mathbf{Y}^R}{q} \end{cases}, \text{ 则式 (26)}$$

可化为

$$\begin{aligned} & \max (\mathbf{W}')^T (\mathbf{Q}^L + \mathbf{Q}^R) \mathbf{W}' \\ & \text{s. t. } \begin{cases} (\mathbf{W}')^T \mathbf{W}' = 1 \\ w_j \geq 0, j \in [1, 6] \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

为了便于后续分析, 在此给出组合赋权法的说明: 首先, 使用群 AHP 方法得到主观权重 \mathbf{W} ; 然后, 直接对区间决策矩阵进行变权策略中的第(2)、(3)步得到客观权重 \mathbf{W}_{ob} ; 加权得到最终权重:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{(\alpha,\beta)} = \alpha \mathbf{W} + \beta \mathbf{W}_{ob} \\ \alpha + \beta = 1 \\ \alpha, \beta \in [0, 1] \end{cases} \quad (28)$$

3.2.3 区间数乘法集结

(1) 由区间决策矩阵和变权可得集群态势觉察一致性:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = (h_i)_{q \times 1} \\ h_i = [h_i^L, h_i^R] = \prod_j [\tilde{z}_{i,j}^L, \tilde{z}_{i,j}^R]^{w_j} \end{cases} \quad (29)$$

(2) 由可能度公式:

$$P_{i,j} = P(h_i \geq h_j) = \min \left\{ \max \left\{ \frac{h_i^R - h_j^L}{(h_i^R - h_i^L) + (h_j^R - h_j^L)}, 0 \right\}, 1 \right\} \quad (30)$$

得到区间数相对大小为:

$$V_i = \frac{1}{q(q-1)} \left(\sum_{j=1}^q P_{i,j} + \frac{q}{2} - 1 \right) \quad (31)$$

可依据区间数相对大小的差异分析不同权重下各种情况一致性的差异.

4 算例分析

4.1 仿真背景与数据处理

(1) 仿真背景: 以 3.1.7 节中的第(3)种用法为例, 某同构无人机集群(有效载荷中有雷达、红外、ESM 传感器, 对固定目标和机动目标均具有一定的侦测能力, 能够获取目标的类型、敌我属性、位置、速度等)协同完成对某区域的侦察任务, 分析在弱对抗且无节点损毁 E_1 、强对抗且无节点损毁 E_2 、弱对抗且节点损毁 E_3 、强对抗且节点损毁 E_4 等 4 种情况下集群协同态势觉察一致性, 略去其他设置细节.

(2) 数据处理: 经过多次重复仿真, 顺序选取多个时刻用于计算分析, 指标数据为多次重复仿真的均值, 且每次仿真中指标数据为各机首次交互后得到. 图 3、图 4 为 6 个评估指标在 4 种情况下多个时刻的指标数据分布和经非线性处理后的指标数据分布.

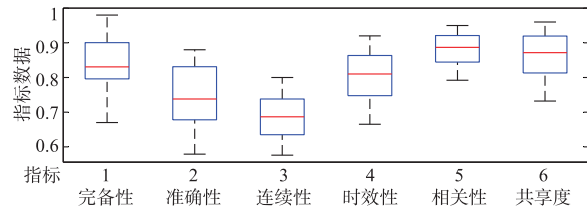


图3 数据分布结构

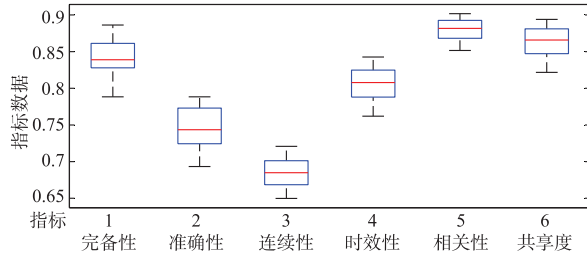


图4 非线性处理后数据分布结构

比较图 3 与图 4, 可以看出非线性处理弱化了指标数据中过大值、过小值的影响, 使数据更趋于集中.

4.2 方法对比

首先, 本文方法通过非线性处理后的数据构造区间决策矩阵; 结合群 AHP 法得到初权^[11]:

$\mathbf{W} = (0.2600 \ 0.2000 \ 0.1500 \ 0.2300 \ 0.1100 \ 0.0500)$; 计算变权 $\mathbf{W}' = (0.4090 \ 0.3220 \ 0.1450 \ 0.1070 \ 0.0070 \ 0.0100)$; 最终得到变权下区间数相对大小: $\mathbf{V} = (0.3561 \ 0.2016 \ 0.2583 \ 0.1840)$. 即弱对抗环境且无节点损毁的一致性最高, 弱对抗有节点损毁的次之, 强对抗环境无节点损毁的再次, 强对抗有节点损毁的最低.

然后, 与基于组合赋权的评估方法进行对比. 表 1 给出基于多组系数下组合赋权的态势觉察一致性评估

结果. 为了便于表述, 对基于不同系数组合赋权的评估方法及结果进行编号, 本文方法及结果编号为 1.

表 1 多组系数下组合赋权的态势觉察一致性

编号	组合赋权	区间数相对大小
2	$W_{(1,0)} = (0.2600 \ 0.2000 \ 0.1500 \ 0.2300 \ 0.1100 \ 0.0500)$	$V_{(1,0)} = (0.3397 \ 0.2256 \ 0.2522 \ 0.1826)$
3	$W_{(0.7,0.3)} = (0.2345 \ 0.1863 \ 0.1475 \ 0.2111 \ 0.1318 \ 0.0888)$	$V_{(0.7,0.3)} = (0.3320 \ 0.2303 \ 0.2521 \ 0.1856)$
4	$W_{(0.5,0.5)} = (0.2175 \ 0.1772 \ 0.1459 \ 0.1985 \ 0.1462 \ 0.1147)$	$V_{(0.5,0.5)} = (0.3269 \ 0.2335 \ 0.2521 \ 0.1875)$
5	$W_{(0.3,0.7)} = (0.2005 \ 0.1681 \ 0.1443 \ 0.1859 \ 0.1608 \ 0.1405)$	$V_{(0.3,0.7)} = (0.3220 \ 0.2366 \ 0.2520 \ 0.1894)$
6	$W_{(0,1)} = (0.1750 \ 0.1544 \ 0.1418 \ 0.1670 \ 0.1825 \ 0.1793)$	$V_{(0,1)} = (0.3148 \ 0.2412 \ 0.2519 \ 0.1921)$

(1) 从集群态势觉察一致性的相对大小进行比较:

由表 1 可知基于多组系数加权的组合赋权法得到的评估结果与本文方法得到的结果一致.

(2) 从集群态势觉察一致性的表示精度进行比较:

定义 $p = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (h_i^R - h_i^L)$ 为集群态势觉察一致性

性的表示精度, 即区间数的上下限的平均距离越小, 精度越高; 图 5 为基于 6 种不同权重的结果表示精度.

(3) 从集群态势觉察一致性相对大小的差异度进行比较:

定义 $e_1 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i+1}^4 |V(i) - V(j)|$ 为平均一致性

差异度; e_2 为无节点损毁时弱对抗与强对抗的一致性差异度; e_3 为有节点损毁时弱对抗与强对抗的一致性差异度; e_4 为弱对抗环境下无损毁与有损毁的一致性差异度; e_5 为强对抗环境下无损毁与有损毁的一致性差异度; 结果如图 6 所示.

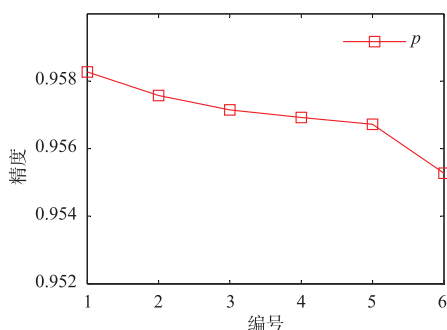


图5 基于不同权重的结果精度

可得到以下结论:

(1) 建立的指标模型切合集群协同作战特点, 如在完备性指标中, 既考虑了安全通信距离下的有效侦测区域覆盖率, 又考虑了目标重要度和态势特征层面的目标数量完备性; 非线性处理和区间决策矩阵的构造, 有效地处理了多时刻指标数据的不确定性.

(2) 区间变权求取策略兼顾了主观经验和客观数据, 无需选取加权系数, 评估结果与基于组合赋权的评估结果一致; 但变权进一步突出了具有区分度的指标, 从图 5 和图 6 中 e_1 可以看出, 本文方法能够提供更高的

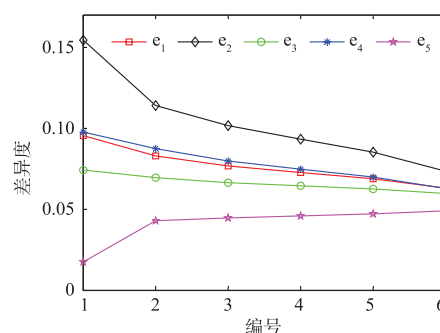


图6 基于不同权重的结果差异度

表示精度和更大的差异度.

(3) 由各机首次态势信息交互后以乘法合成得到的态势觉察一致性会受较差指标的影响; 在允许时间内, 集群可通过多次信息交互以提高单机态势觉察一致性, 从而提高集群态势觉察一致性, 但在受限的通信资源下, 交互的形式和交互的内容等值得进一步研究.

(4) 从四种情况的一致性比较可看出: 集群节点的损毁和环境对抗强度的增强使集群的态势觉察一致性降低; 从图 6 中的 e_2 、 e_4 和 e_5 可知, 由环境的对抗性变化引起的差异度要大于节点的损毁引起的差异度, 但环境的对抗性对集群一致性的影响也是有限的, 这体现了集群协同的去中心化、鲁棒性等优势, 反映了集群对强对抗、高动态作战环境的适应性.

5 结束语

无人机集群协同态势觉察一致性是集群协同态势感知的重要部分, 是集群协同作战获取信息优势的重要因素. 基于集群协同作战的需求, 从完备性、准确性等六个方面建立协同态势觉察一致性评估指标体系, 进而提出协同态势觉察一致性评估方法. 分析表明, 所提指标能够有效评估集群协同态势觉察一致性, 所提方法比基于组合赋权的评估方法效果更好, 对集群协同作战研究和集群系统优化设计有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Ramirez A C, Bello O G, R-Moreno M D, et al. Solving complex multi-UAV mission planning problems using

- multi-objective genetic algorithms [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(17):4883–4900.
- [2] 尹高扬,周绍磊,吴青坡. 基于改进 RRT 算法的无人机航迹规划[J]. *电子学报*, 2017, 45(7):1764–1769.
YIN Gao-yang, ZHOU Shao-lei, WU Qing-po. An improved RRT algorithm for UAV path planning [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(7):1764–1769. (in Chinese)
- [3] D' Aniello G, Gaeta A, Loia V, et al. A granular computing framework for approximate reasoning in situation awareness [J]. *Granular Computing*, 2017, 2(3):141–158.
- [4] 张东戈,孟辉,赵慧赟. 态势感知水平的解析化度量模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(8):1808–1815.
ZHANG Dong-ge, MENG Hui, ZHAO Hui-yun. Analytical measurement model of situation awareness [J]. *System Engineering and Electronics*, 2016, 38(8):1808–1815. (in Chinese)
- [5] Alhussain T. Assessing information quality of blackboard system [J]. *International Journal of Computer*, 2017, 25(1):1–7.
- [6] Arazy O, Kopak R, Hadar I. Heuristic principles and differential judgments in the assessment of information quality [J]. *Journal of the Association for Information Systems*, 2017, 18(5):403–432.
- [7] 房坚,王钺,袁坚. 基于集合距离的信息优势度量方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(1):114–119.
FANG Jian, WANG Yue, YUAN Jian. Measurement of information superiority based on set distance [J]. *System Engineering and Electronics*, 2017, 39(1):114–119. (in Chinese)
- [8] Endsley M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings [J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, 9(1):4–32.
- [9] Stanton N A, Salmon P M, Walker G H, et al. State-of-science: situation awareness in individuals, teams and systems [J]. *Ergonomics*, 2017, 60(4):449–466.
- [10] Wu J, Cao Y, Shi X, et al. Research of cooperative control based on multiple UAVs secure communications [A]. *Proceeding of IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control [C]*. Qinhuangdao, China: IEEE, 2015. 135–140.
- [11] 张才坤,朱战霞,冯琦,等. 基于区间数雷达图的可视化空战威胁评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2016, 38(5):1052–1058.
ZHANG Cai-kun, ZHU Zhan-xia, FENG Qi, et al. Visualization threat assessment for air combat based on interval-radar chart [J]. *System Engineering and Electronics*, 2016, 38(5):1052–1058. (in Chinese)
- [12] 张耀天,张旭成,贾明顺,等. 基于层次分析法的自适应决策评价方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(5):1065–1070.
ZHANG Yao-tian, ZHANG Xu-cheng, JIA Ming-shun, et al. Adaptive evaluation method based on analytic hierarchy process [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(5):1065–1070. (in Chinese)
- [13] Tyagi S, Agrawal S, Yang K, et al. An extended Fuzzy-AHP approach to rank the influences of socialization externalization combination internalization modes on the development phase [J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 52(3):505–518.

作者简介



高杨男, 1992 年生于安徽蚌埠. 现为国防科技大学电子对抗学院博士研究生. 主要研究方向为集群态势感知与智能决策、信息融合.
E-mail: gao_yang_mail@163.com



李东生(通信作者)男, 1963 年生于安徽合肥, 现为国防科技大学教授、博士生导师. 主要研究方向为复杂和高速信号处理.
E-mail: lidsh@21cn.com

柳向男, 1989 年生于河南商丘, 现为国防科技大学电子对抗学院博士研究生. 主要研究方向为组网雷达干扰.