

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.06.008

## 改进目标收益函数的无人机集群空地对抗模型

王尔申<sup>1,2</sup>, 郭靖<sup>1</sup>, 宏晨<sup>3,4,5</sup>, 肖明明<sup>6</sup>, 刘畅<sup>4,5</sup>, 曲萍萍<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学辽宁通用航空研究院, 沈阳 110136;  
3. 北京联合大学多智能体系统研究中心, 北京 100101; 4. 北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室, 北京  
100101; 5. 北京联合大学机器人学院, 北京 100101; 6. 北京联合大学智慧城市学院, 北京 100101)

**摘要:** 无人机集群作战已成为一种新兴作战模式。面对日益错综复杂的战场环境, 无人机集群对抗博弈是一个重要的研究方向。本文以无人机集群空地对抗为背景, 研究无人机集群的对抗博弈过程。分析战场态势的关键因素, 通过空间状态矩阵表征战场态势, 基于战场态势的动态变化提出自适应权重的经验表达式, 并以此给出博弈双方的动态目标收益函数, 建立非完全信息下的无人机集群空地对抗博弈模型。仿真验证了自适应权重的合理有效性。本研究为无人机集群空地对抗的动态决策提供了一种新方法。

**关键词:** 无人机集群; 空地对抗; 对抗博弈; 战场态势; 动态决策

**中图分类号:** V279; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)06-0888-10

## UAV Swarm Air-Ground Engagement Model with Improved Payoff

WANG Ershen<sup>1,2</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, HONG Chen<sup>3,4,5</sup>, XIAO Mingming<sup>6</sup>, LIU Chang<sup>4,5</sup>, QU Pingping<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 3. Multi Agent System Research Center, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 4. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 5. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100101, China; 6. College of Smart City, Beijing Union University, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The non-cooperative game of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm in the complex combat environment is an important research field. In this paper, we investigate the dynamic behaviors of UAV swarm in the scenario of air-ground engagement. We analyze the key factors of combat situation, and use the space state matrix to represent the situation of combat. Based on the dynamic changes of combat situation, the dynamic objective functions with adaptive weights are introduced. We propose a model of UAV swarm engagement under incomplete information, and verify the rationality and effectiveness of the adaptive weights. Our work provides new insights into the dynamic decision of UAV swarm.

**Key words:** unmanned aerial vehicle (UAV) swarm; air-ground engagement; non-cooperative game; combat situation; dynamic decision

近年来, 智能集群技术已成为无人机(Un-

接催生了一种新的无人机作战模式——无人机集群作战<sup>[1]</sup>。集群作战的理论基础是群体智能。就像

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018AAA0100804)资助项目; 国家自然科学基金(62173237, 61972040)资助项目; 辽宁省重点研发计划(2020JH2/10100045)资助项目; 辽宁省自然科学基金面上(2019-MS-251)资助项目; 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1907022)资助项目; 辽宁省教育厅科研(JYT2020142)资助项目; 沈阳市高层次创新人才计划(RC190030)资助项目。

**收稿日期:** 2021-08-07; **修订日期:** 2021-11-02

**通信作者:** 宏晨, 男, 副教授, E-mail: hchchina@sina.com。

**引用格式:** 王尔申, 郭靖, 宏晨, 等. 改进目标收益函数的无人机集群空地对抗模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 888-897. WANG Ershen, GUO Jing, HONG Chen, et al. UAV swarm air-ground engagement model with improved payoff[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 888-897.

飞机的灵感来自于飞鸟,雷达的灵感产生自蝙蝠,集群技术的灵感来源于蜂群,蚁群,狼群等群居自然生物。集群内分工明确,每个个体遵循简单的行为和规则,不需要核心个体的统一调度,便能自发地形成一个有机整体,实现复杂而强大的系统功能<sup>[2]</sup>。无人机集群对抗中,每个作战个体可以根据作战场景中双方的态势不断学习,并自动调整自身的行为以应对各种复杂战场态势<sup>[3]</sup>。

无人机集群对抗模型的研究发展主要有空空对抗和空地对抗2个方面。在空空对抗方面,Zohdi等引入短程与长程作用力,提出基于“点-质量群”的机械力学模型模拟蜂群行为,建立一种离散multi-agent模型去模拟无人机集群对抗博弈行为<sup>[4-6]</sup>;陈灿等根据多智能体强化学习(Multi agent reinforcement learning, MARL)的集中式训练分布式执行(Centralized training with decentralized execution, CTDE)范式,在Actor-Critic框架下建立无人机集群对抗博弈模型<sup>[7]</sup>;罗德林等引入多Agent系统、态势评估和空战对抗等理念,为每个无人机建立独立的Agent,设计相应的决策方法,以此建立无人机集群对抗模型<sup>[8]</sup>;轩书哲等针对大规模无人集群攻防对抗问题,使用强化学习将问题建模为基于马尔科夫决策过程(Markov decision process, MDP)的多智能体近端策略优化(Multi-agent proximal policy optimization, M-PPO)无人机集群对抗模型<sup>[9]</sup>;符小卫等针对多无人机协同对抗博弈问题,通过强化学习和无人机动力学模型建立了无人机协同对抗追逃博弈模型<sup>[10]</sup>;章豪等通过无人机运动学模型以及协同约束,建立了无人机集群协同规避的博弈模型<sup>[11]</sup>;Liu等在二维视角下通过质点运动模型,建立分布式无人机协同编队博弈策略模型<sup>[12]</sup>;Xing等针对无人机协同对抗任务搜索,建立分布式栅格化无人机集群运动模型,提出基于人工势场-蚁群的路径规划决策优化算法<sup>[13]</sup>;Jia等针对异构无人机集群协同对抗路径规划问题,提出扩展多智能体的分布式任务的基于共识捆绑算法(Consensus based bundle algorithm, CBBA)<sup>[14]</sup>;王尔申等针对无人机集群协同对抗问题,根据复杂网络理论,构建无人集群协同对抗网络,基于边攻击成本分析协同网络级联效应及鲁棒性<sup>[15-17]</sup>。

在空地对抗方面,Cruz等将集群空地对抗行为看作是高度复杂的非线性动态系统,把动态博弈过程分为多级决策,建立非线性动力学模型<sup>[18-19]</sup>;赵玉亮等针对无人机空地对抗的不确定性和复杂性,考虑多因素提出了一种多目标双矩阵博弈模型<sup>[20]</sup>;鲁鸿轩等针对无人机空地自主对抗问题,分析对抗行为,提出一种三支理论的无人机空地对抗模

型<sup>[21]</sup>;薄宁等针对有/无人机协同空地对抗博弈问题,将博弈对抗建模为MDP模型并通过求解MDP模型得到对抗策略<sup>[22]</sup>。

现有的群体动态博弈模型的收益参数多是在初始状态下设定的,动态博弈过程中不再变化,使得目标收益函数不能实时反映战场态势的动态变化,导致博弈决策滞后于战场态势的变化<sup>[18-19]</sup>。本文针对战场态势实时变化导致目标收益函数动态变化的问题,以无人机集群与地面防空阵地为博弈双方,应用非合作博弈理论,使用空间状态矩阵表征战场态势,给出基于战场态势的自适应权重表达式,建立了无人机集群空地对抗博弈模型。仿真验证了基于自适应权重的博弈模型的合理有效性。本文主要贡献是在于提出的自适应收益权重因子以及命中因子衰减,目的是为了提高无人机集群对抗模型的适应性。

## 1 无人机集群空地对抗博弈模型

设定作战双方为红方(Red)和蓝方(Blue),红方为防守方,蓝方为进攻方。蓝方是由无人战斗机UCAV(Unmanned combat air vehicle),侦察无人机RUAV(Reconnaissance UAV)组成的无人机集群。红方由电子雷达阵地(Electronic radar fronts, ERF)和地面防空导弹阵地(Ground air defense fronts, GADF)组成。

### 1.1 战场态势

设红蓝双方的作战单位分别有 $N^{\text{RER}}$ 、 $N^{\text{RAD}}$ 、 $N^{\text{BC}}$ 、 $N^{\text{BR}}$ ,其中RER表示红方的电子雷达,RAD表示红方的防空导弹,BC表示蓝方的战斗无人机集群,BR表示蓝方的侦察无人机集群。用 $k=0,1,\dots,K$ 表示离散的对抗时间步, $k=0$ 表示初始状态, $K$ 为对抗的最大时间步。对抗时间步 $k$ 的间隔设定为1s,即对抗在第0s初始化,第1s开始,第 $K$ s结束。不妨将博弈的参与者统一定义为 $X=\{\text{RER}, \text{RAD}, \text{BC}, \text{BR}\} (i=1,2,\dots,N^X)$ , $X_i$ 表示参与者 $X$ 的第 $i$ 类作战单位。

#### 1.1.1 基础状态矩阵

根据空地对抗场景,给出作战单位的基础状态矩阵

$$Z_i^X(k)=[\Psi_i^X(k) \quad P_i^X(k) \quad W_i^X(k)]^T \quad (1)$$

式中: $\Psi_i^X(k)=[x_i^X(k) \quad y_i^X(k) \quad z_i^X(k)]$ 为 $k$ 时刻 $X_i$ 三维坐标, $P_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的数量, $W_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的武器载荷量, $Z_i^X(k)$ 表示 $X_i$ 的基础状态矩阵。

#### 1.1.2 作战参数矩阵

根据无人机、雷达以及地空导弹等作战单位的攻击特性,建立参数矩阵

$$T_i^X(k)=[R_i^X \quad H_i^X \quad V_i^X(k) \quad C_i^X(k)]^T \quad (2)$$

式中： $R_i^X$ 为 $X_i$ 的作战半径， $H_i^X$ 为 $X_i$ 的飞行高度， $V_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的飞行速度， $C_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的最大火力， $T_i^X(k)$ 表示 $X_i$ 的参数矩阵。

1.1.3 决策参数矩阵

把双方的位移，火力以及目标选择设为对抗行为控制因素，表示博弈决策信息

$$U_i^X(k) = [\zeta_i^X(k) \quad c_i^X(k) \quad D_i^X(k)]^T \quad (3)$$

(1)  $\zeta_i^X = [\Delta x_i^X(k) \quad \Delta y_i^X(k) \quad \Delta z_i^X(k)]$ 为 $X_i$ 的三维坐标增量，解析式如下

$$\begin{cases} \Delta x_i^X(k) = V_i^X(k) \cdot \cos\theta \\ \Delta y_i^X(k) = V_i^X(k) \cdot \sin\theta \\ \Delta z_i^X(k) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\theta$ 为投影在 $XOY$ 面上无人机的目标偏角。通过双方位置得到 $\theta$ 从而求得坐标增量。

(2)  $c_i^X(k) \in [0, C_i^X(k)]$ 为输出火力区间。 $c_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的输出火力， $C_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的火力区间最大值。

(3)  $D_i^X(k)$ 为 $X_i$ 的目标选择。 $D_{ij}^{XY}$ 表示 $X_i$ 选择参与者 $Y$ 第 $j$ 类作战单位(简称为 $Y_j$ )进行攻击的概率。

得到基于空间状态的 $X_i$ 战场态势矩阵 $M_i^X(k)$

$$M_i^X(k) = \begin{bmatrix} Z_i^X(k) \\ T_i^X(k) \\ U_i^X(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： $T_i^X(k)$ 为4维向量， $Z_i^X(k)$ 和 $U_i^X(k)$ 为5维向量， $M_i^X(k)$ 为14维向量。

因此，整体战场态势矩阵可表示为

$$M = \begin{bmatrix} M^{\text{Blue}}(0), M^{\text{Blue}}(1), \dots, M^{\text{Blue}}(k), \dots, M^{\text{Blue}}(K) \\ M^{\text{Red}}(0), M^{\text{Red}}(1), \dots, M^{\text{Red}}(k), \dots, M^{\text{Red}}(K) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中

$$M^{\text{Blue}}(k) = \begin{bmatrix} M_1^{\text{Blue}}(k) \\ M_2^{\text{Blue}}(k) \\ \vdots \\ M_{N^{\text{Blue}}}(k) \end{bmatrix}, M^{\text{Red}}(k) = \begin{bmatrix} M_1^{\text{Red}}(k) \\ M_2^{\text{Red}}(k) \\ \vdots \\ M_{N^{\text{Red}}}(k) \end{bmatrix}$$

$$N^{\text{Red}} = N^{\text{RER}} + N^{\text{RAD}}$$

$$N^{\text{Blue}} = N^{\text{BR}} + N^{\text{BC}}$$

式中： $M^{\text{Blue}}(k)$ 为无人机群状态矩阵， $M^{\text{Red}}(k)$ 为地面部队状态矩阵， $M$ 为 $N^{\text{Red}} + N^{\text{Blue}}$ 维矩阵。

1.2 对抗过程

复杂而多变的无人机集群对抗环境具有状态不确定性，为了简化对抗过程而提出如下约束。

1.2.1 攻击约束

$$c^X(k) = \begin{cases} [0, C^X(k)] & \Delta xyz^{XY}(k) \leq R^X \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\Delta xyz^{XY}(k) = \sqrt{\Delta s_x + \Delta s_y + \Delta s_z} \quad (7.2)$$

$$\Delta s_x = (x^X(k) - x^Y(k))^2 \quad (7.3)$$

$$\Delta s_y = (y^X(k) - y^Y(k))^2 \quad (7.4)$$

$$\Delta s_z = (z^X - z^Y)^2 \quad (7.5)$$

式中： $\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$ 分别为 $x, y, z$ 轴的距离分量； $\Delta xyz^{XY}$ 为计算 $XY$ 之间的欧氏距离。红蓝双方的有效射程限定了火力输出 $c_i^X(k)$ ，在 $k$ 时刻敌方 $Y$ 进入我方 $X$ 有效射程 $R^X$ 内，我方才可攻击。

1.2.2 武器载荷约束

下一时间步的火力输出不能超过当前时间步的载荷储备

$$C^X(k+1) \leq W^X(k) \quad (8)$$

式中 $C^X(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 $X$ 的最大火力值。

1.3 状态更新

1.3.1 位移更新

位置坐标的状态转移方程为

$$\Psi_i^X(k+1) = \Psi_i^X(k) + \zeta_i^X(k) = \begin{bmatrix} x_i^X(k) & y_i^X(k) & z_i^X(k) \\ \Delta x_i^X(k) & \Delta y_i^X(k) & \Delta z_i^X(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $\Psi_i^X(k), \zeta_i^X(k)$ 分别为 $X_i$ 的坐标向量和坐标增量向量。

1.3.2 数量更新

$$P_i^X(k+1) = P_i^X(k) \cdot (1 - Q_{ij}^{XY}(k) \cdot A_{ij}^{XY}(k) \cdot \delta(D_j^Y(k), X_i) \cdot \zeta(\Delta xyz_{ij}^{XY}(k), R_j^Y)) \quad (10)$$

式中： $Q_{ij}^{XY}(k)$ 表示 $Y_j$ 攻击 $X_i$ 时 $X_i$ 投入因子， $A_{ij}^{XY}(k)$ 表示 $Y_j$ 攻击 $X_i$ 时 $X_i$ 损耗因子， $\delta(D_j^Y(k), X_i)$ 表示 $Y_j$ 的目标选择 $D_j^Y(k)$ 是否是 $X_i$ ， $\zeta(\Delta xyz_{ij}^{XY}(k), R_j^Y)$ 表示 $X_i$ 与 $Y_j$ 的距离 $\Delta xyz_{ij}^{XY}(k)$ 是否在 $Y_j$ 有效射程 $R_j^Y$ 内。

(1) 判决函数

$$\delta(X, Y) = \begin{cases} 1 & X = Y \\ 0 & X \neq Y \end{cases}, \zeta(X, Y) = \begin{cases} 1 & X \leq Y \\ 0 & X > Y \end{cases}$$

上面两函数实现了描述的二值化，从而可以利用0~1分布作为目标及距离的判定函数。

(2) 投入因子 $Q_{ij}^{XY}(k)$

$$Q_{ij}^{XY}(k) = \beta_{ij}^{XY} (1 - e^{-P_j^Y(k)/P_i^X(k)}) \quad (11)$$

式中： $\beta_{ij}^{XY}$ 表示 $Y_j$ 把 $X_i$ 作为攻击目标时 $X_i$ 的抵抗程度； $Y_j$ 和 $X_i$ 的作战单位数量 $P_j^Y(k), P_i^X(k)$ 以指数分布形式表示抵抗程度的平衡系数。

$Q_{ij}^{XY}(k)$ 是 $X_i$ 投入的单位数量防御因子去抵消 $Y_j$ 投入的单位数量攻击因子，即满足 $X_i$ 单位数量防御因子等于 $Y_j$ 单位数量攻击因子。讨论两种特殊情况：

(1) 当 $P_j^Y(k)/P_i^X(k) > 10$ ， $Q_{ij}^{XY}(k) \approx \beta_{ij}^{XY}$ 说明在 $k$ 时刻 $Y_j$ 用于攻击的数量已经超过 $X_i$ 现存数



量的一个数量级,  $X_i$  应当以  $\beta_{ij}^{XY}$  作为最大投入因子。

(2) 当  $P_j^Y(k)/P_i^X(k)=10, Q_{ij}^{XY}(k)=0$ , 表示在  $k$  时刻,  $Y_j$  用于攻击的数量为 0, 对于  $X_i$  已经没有任何威胁, 故  $X_i$  的投入因子为 0。

(3) 损耗因子  $A_{ij}^{XY}(k)$

$$A_{ij}^{XY}(k) = 1 - (1 - K_{ij}^{XY}(k))^{c_j^Y(k)} \quad (12)$$

式中:  $K_{ij}^{XY}(k)$  为命中因子,  $Y_j$  表示攻击  $X_i$  时,  $X_i$  被命中的概率。

在对抗过程中, 红方的 RER 第 1 类作战单位 (简写 RER<sub>1</sub>) 拥有电子侦察能力, RER<sub>2</sub> 具有电子干扰能力。电子干扰能够扰乱无人机的导航信息和通信链路, 导致无法正常工作, 从而降低甚至丧失作战能力, 是反制无人机的重要方式<sup>[23]</sup>, 可以对蓝方无人机集群造成严重影响。RER<sub>2</sub> 使得无人机集群的攻击, 飞行以及通信等能力受到制约, 将影响集中体现在命中因子中, 本文提出了如下命中因子衰减方式。

$$K_{ij}^{\text{Red-Blue}}(k+1) = K_{ij}^{\text{Red-Blue}}(k) \cdot e^{-c_2^{\text{RER}}(k)} \quad (13)$$

式中  $c_2^{\text{RER}}(k)$  表示  $k$  时刻 RER<sub>2</sub> 的火力值。

### 1.3.3 载荷更新

$$W_i^X(k+1) = W_i^X(k) - c_i^X(k) \cdot Q_{ji}^{YX}(k) \quad (14)$$

式中:  $c_i^X(k)$  为  $X_i$  的火力值,  $Q_{ji}^{YX}(k)$  为  $X_i$  攻击  $Y_j$  时  $X_i$  的单位数量攻击因子。

## 1.4 收益(支付)函数

博弈对抗的目的是给予双方一定量的初始对抗资源的前提下: (1) 尽可能保留己方在博弈结束时的作战资源; (2) 最大化减少敌方在博弈结束时的作战资源。双方的收益(支付)函数表示如下

$$J^B(k) = \alpha_1^{\text{BR}} \sum_{i=1}^{N^{\text{BR}}} \hat{P}_i^{\text{BR}}(k) + \alpha_2^{\text{BC}} \sum_{i=1}^{N^{\text{BC}}} \hat{P}_i^{\text{BC}}(k) - \alpha_3^{\text{RER}} \sum_{i=1}^{N^{\text{RER}}} \hat{P}_i^{\text{RER}}(k) - \alpha_4^{\text{RAD}} \sum_{i=1}^{N^{\text{RAD}}} \hat{P}_i^{\text{RAD}}(k) \quad (15)$$

$$J^R(k) = -\beta_1^{\text{BR}} \sum_{i=1}^{N^{\text{BR}}} \hat{P}_i^{\text{BR}}(k) + \beta_2^{\text{BC}} \sum_{i=1}^{N^{\text{BC}}} \hat{P}_i^{\text{BC}}(k) + \beta_3^{\text{RER}} \sum_{i=1}^{N^{\text{RER}}} \hat{P}_i^{\text{RER}}(k) + \beta_4^{\text{RAD}} \sum_{i=1}^{N^{\text{RAD}}} \hat{P}_i^{\text{RAD}}(k) \quad (16)$$

式中:  $\alpha_i, \beta_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 都是静态权重;  $J^B(k)$  和  $J^R(k)$  分别为蓝方和红方在  $k$  时刻的目标收益函数;  $\hat{P}_i^X(k)$  为归一化的  $X_i$  作战单位数量变化量。其中,  $P_i^X(0)$  是  $X_i$  作战单位数量的初始值

$$\hat{P}_i^X(k) = P_i^X(k)/P_i^X(0)$$

## 2 自适应权重的收益函数

考虑无人机集群的复杂对抗环境, 针对收益函数, 静态权重的收益函数不能有效的反映当前对抗

局势<sup>[8-9]</sup>。对抗博弈的收益简单认定为作战单位数量的线性表征会使得误差增大, 还应考虑作战单位的武器载荷量, 作战单位的作战状态等对局势有影响的因素, 复杂的战场环境应使得对抗博弈的收益考虑多方面因素的组合。

### 2.1 自适应权重

作战单位数量是反映收益函数的关键因素, 而其权重表征了在对抗中作战单位数量变化的重要程度。作战单位数量变化的重要程度与火力值  $c_i^X(k)$ , 命中因子  $K_{ij}^{XY}(k)$  和武器载荷量  $W_i^X(k)$  等作战指标有关。

根据式(8, 10~15), 火力值  $c_i^X(k)$  和命中因子  $K_{ij}^{XY}(k)$  决定了对抗中  $k$  时刻  $X_i$  的攻击效果, 武器载荷量  $W_i^X(k)$  则影响下一时间步  $X_i$  的攻击阈值, 限定  $k+1$  时刻  $X_i$  的最大火力值。

#### 2.1.1 火力值权重分量

基于式(13~15), 火力值  $c_i^X(k)$  是影响损耗因子的关键因素, 也是间接影响下一时间步的命中因子  $K_{ij}^{XY}(k+1)$  以及武器载荷量  $W_i^X(k+1)$  的重要因素, 因此计算收益时, 火力值是影响作战单位数量变化的重要因素。作为  $c_i^X(k)$  火力区间的待确定值, 直接作为权重会使得收益曲线出现跳跃, 不利于表征对抗过程的战场局势, 引入  $\sigma_i^X$  火力值均衡因子平滑了  $c_i^X(k)$  的跳跃波动

$$\eta_1^c = e^{\sigma_i^X \cdot c_i^X(k)} \quad (17)$$

式中:  $\eta_1^c$  为火力值权重分量,  $X_i$  的  $\sigma_i^X$  经验取值区间为  $[0, 1.8]$ 。

#### 2.1.2 武器载荷权重分量

根据式(8), 武器载荷量  $W_i^X(k)$  限制了下一时间步的攻击阈值  $C_i^X(k+1)$ 。作战单位的武器载荷量代表了该作战单位在战场局势的潜在威胁程度, 结合数量变化量能更合理表征潜在威胁程度。引入  $\mu_i^X$  均衡因子, 调节作战单位的潜在威胁程度表征重要程度的比例关系

$$\eta_1^{P \cdot W} = e^{-\hat{P}_i^X(k) \cdot \hat{W}_i^X(k)^{\mu_i^X}} \quad (18)$$

式中:  $\eta_1^{P \cdot W}$  为武器载荷量权重分量,  $X_i$  的  $\mu_i^X$  取值区间为  $[0, 1.6]$ 。  $\hat{W}_i^X(k)$  为归一化  $X_i$  武器载荷量变化量

$$\hat{W}_i^X(k) = W_i^X(k)/W_i^X(0)$$

式中  $W_i^X(0)$  为  $X_i$  武器载荷量的初始值。

#### 2.1.3 命中因子权重分量

根据式(14), 命中因子是单调减函数, 命中因子越小则对战场态势的影响越小, 使得  $k$  时刻  $X_i$  的重要程度减小, 引入  $\lambda_i^X$  命中因子均衡因子, 调节命中因子对权重的影响

$$\eta_3^K = \lambda_i^X \cdot \hat{K}_{ij}^{XY}(k) \quad (19)$$

式中:  $\eta_3^K$  为命中因子权重分量,  $X_i$  的  $\lambda_i^X$  经验取值区间为  $[0.5, 1.5]$ 。  $\hat{K}_{ij}^{XY}(k)$  为归一化  $X_i$  命中因子变化量

$$\hat{K}_{ji}^{YX}(k) = K_{ji}^{YX}(k) / K_{ji}^{YX}(0)$$

式中  $K_{ji}^{YX}(0)$  为  $X_i$  命中因子的初始值。

综上所述, 针对不同作战单位, 根据战场态势, 综合  $k$  时刻的决策信息, 提出一种用来动态计算目标收益函数的自适应权重, 自适应权重表达式如下

$$\eta_i^X(k) = \eta_3^K \cdot \eta_1^c \cdot \eta_2^{P \cdot W} = \lambda_i^X \cdot \hat{K}_{ji}^{YX}(k) \cdot \exp\{\sigma_i^X c_i^X(k) - (\hat{P}_i^X(k) \cdot \hat{W}_i^X(k))^{\mu_i^X}\} \quad (20)$$

红蓝双方权重更新式如下

$$\alpha_i^X(k+1) = \alpha_i^X(k) \cdot \eta_i^X(k) \quad (21)$$

$$\beta_i^X(k+1) = \beta_i^X(k) \cdot \eta_i^X(k) \quad (22)$$

式中  $\alpha_i^X(k)$ ,  $\beta_i^X(k)$  分别为红蓝双方在  $k$  时刻的权重变量。式(21~23)表示在  $k+1$  时刻的自适应权重取决于  $k$  时刻的权重数值以及其他作战指标。

## 2.2 改进的收益函数

加入自适应权重的博弈双方目标收益函数如下

$$J_B^a(k) = \sum_{i=1}^{N^{BR}} \alpha_i^{BR}(k) \hat{P}_i^{BR}(k) + \sum_{i=1}^{N^{BC}} \alpha_i^{BC}(k) \hat{P}_i^{BC}(k) - \sum_{i=1}^{N^{RER}} \alpha_i^{RER}(k) \hat{P}_i^{RER}(k) - \sum_{i=1}^{N^{RAD}} \alpha_i^{RAD}(k) \hat{P}_i^{RAD}(k) \quad (23)$$

$$J_R^b(k) = - \sum_{i=1}^{N^{BR}} \beta_i^{BR}(k) \hat{P}_i^{BR}(k) - \sum_{i=1}^{N^{BC}} \beta_i^{BC}(k) \hat{P}_i^{BC}(k) + \sum_{i=1}^{N^{RER}} \beta_i^{RER}(k) \hat{P}_i^{RER}(k) + \sum_{i=1}^{N^{RAD}} \beta_i^{RAD}(k) \hat{P}_i^{RAD}(k) \quad (24)$$

式中  $J_B^a(k)$ ,  $J_R^b(k)$  分别为蓝方和红方在  $k$  时刻的自适应权重的目标收益函数。对抗结束时, 双方的总目标收益函数分别为

$$J_B^a = \sum_{k=0}^K J_B^a(k), J_R^b = \sum_{k=0}^K J_R^b(k) \quad (25)$$

## 3 博弈策略

无人机集群空地对抗是一种非合作博弈, 为求解纳什均衡, 根据极大极小值方法, 表征出双方一般和博弈目标收益和

$$\begin{cases} \text{蓝方:} & \max_{\text{Blue}} \min_{\text{Red}} J = J_R^b + J_B^a \\ \text{红方:} & \max_{\text{Red}} \min_{\text{Blue}} J = J_R^b + J_B^a \end{cases} \quad (26)$$

其目的是最大化己方的收益, 同时减小敌方的收益。

对抗过程中由于己方不清楚敌方的目标收益, 对抗呈现为非完全信息博弈, 分析总目标收益函数  $J_B^a$ ,  $J_R^b$  的表达式, 式中包含了双方作战单位的影响,

即可将式(26)简化为

$$\begin{cases} \text{蓝方:} & \max_{\text{Blue}} J_B^a = \sum_{k=0}^K \max_{\text{Blue}} J_B^a(k) \\ \text{红方:} & \max_{\text{Red}} J_R^b = \sum_{k=0}^K \max_{\text{Red}} J_R^b(k) \end{cases} \quad (27)$$

为了总收益函数最大化, 则要满足对抗每一时间步的最大化收益函数。最终得到策略  $(\pi_B^*, \pi_R^*)$  满足如下不等式, 则认为  $(\pi_B^*, \pi_R^*)$  是纳什均衡策略。

$$\begin{cases} J_B^a(\pi_B^*, \pi_R^*) \geq J_B^a(\pi_B, \pi_R^*) \quad \forall \pi_B \in \Pi_B \\ J_R^b(\pi_B^*, \pi_R^*) \geq J_R^b(\pi_B^*, \pi_R) \quad \forall \pi_R \in \Pi_R \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $(\Pi_B, \Pi_R)$  分别表示双方所有可选的策略空间,  $(\pi_B, \pi_R)$  为双方的策略空间中的任意策略。

其中  $(\Pi_B, \Pi_R)$  策略空间中包括了双方状态下对应所执行的多维动作, 有位移增量、火力值、目标选择以及电子干扰的4维动作。

空地对抗博弈算法具体流程如下所示。

输入: 初始化作战双方位置, 速度等状态数据

输出:  $J$  是目标收益

初始化: 仿真次数  $E = 7200$ , 对抗回合数  $K = 25$ ,

$X = [\text{blue}, \text{red}]$ ,  $N = [N^{\text{blue}}, N^{\text{red}}]$ ,  $s_k^X =$

$[Z_i^X(k), T_i^X(k)]$ ,  $a_k^X = [U_i^X(k)] (i = 1, 2, \dots, N)$ ,

动作探索参数  $\epsilon = 0.5$

For  $e = 1, 2, \dots, E$ :

$s_1 = s_1^X //$  初始化对抗态势

$a_1^* = \arg \max_a J(s_1, \cdot)$

For  $k = 1, 2, \dots, K$ :

$\alpha \sim \text{random}(0, 1)$

$a_k = \begin{cases} \alpha \geq \epsilon & a_k^* \\ \alpha < \epsilon & \text{随机选择动作} \end{cases}$

$s_{k+1} = f(s_k, a_k) // f(\cdot, \cdot)$  为状态更新方程

$s_{k+1}$  代入  $J(s_{k+1}, \cdot)$ , 通过满足式(28)得到

$a' = \arg \max_{a'} J(s_{k+1}, \cdot)$

$a_{k+1}^* \leftarrow a'$

End

End

## 4 实验仿真

### 4.1 初始数据

设定对抗活动处于恒定高度的三维空间内, 高度可以通过参数设置, 即  $z_i^X(k) = H_i^X$ 。对抗示意图如图1所示, 蓝方处于左下角, 红方处于右上角, 为了显示清晰, 作战单位在示意图中适当偏移。

模型的初始化参数如表1~4所示, 其中表1参考了实际战争的作战参数, 描述了作战单位的初始状态, 表2~4参考了文献[17-18]的设定, 其中表2

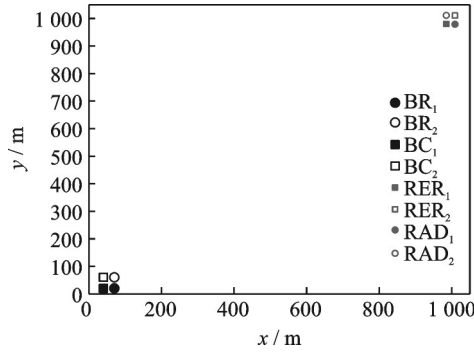


图1 红蓝双方对抗初始示意图

Fig.1 Initial picture of the red-blue confrontation

是自适应权重的初始值;表3是作战单位的命中因子的初始值;基于攻击目标选择策略的不确定性,

设定双方的选择目标概率  $D_{ij}^{XY}$  如表4所示。其中,  $RER_2=0$  表示红方不对蓝方施加电子干扰,  $RER_2=1$  表示红方对蓝方施加电子干扰。例如:0.6(0.8) 表示不加干扰的选择概率为0.6,施加干扰时选择概率为0.8。

自适应权重的各因子在近似最佳值左右各取一个对称的合理范围进行试验,如表5、6所示,括号外为有电子干扰(Electromagnetic interference, EI)的值,括号里为无电子干扰(Non-EI, NEI)的值。如在表5中  $BC_1$  的  $\sigma_i^X$  为0.5~1.5(0.4~1.6)。表示在EI情况下,  $\sigma_i^X$  取值范围为0.5~1.5,NEI情况下,  $\sigma_i^X$  取值范围为0.4~1.6。

表1 作战单位基础数据

Table 1 Basic data of combat units

参与者 X	作战单位 $X_i$	位置	数量	载荷量/ kg	齐射量/ kg	作战半径/ m	飞行速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	飞行高度/ m	滞空时间/ h	
蓝方	BR	BR <sub>1</sub>	(20,20)	1	2	N/A	2 000	21.7	500	24
		BR <sub>2</sub>	(20,30)	5	4	N/A	1 000	27.8	300	20
	BC	BC <sub>1</sub>	(30,20)	5	8	0.8	500	25.6	400	24
		BC <sub>2</sub>	(30,30)	15	9	0.9	500	26.1	300	20
红方	RER	RER <sub>1</sub>	(1 000,1 000)	1	0	0	2 000	0	0	N/A
		RER <sub>2</sub>	(1 000,1 000)	3	3	1	2 000	0	0	N/A
	RAD	RAD <sub>1</sub>	(1 000,1 000)	6	5.6	0.7	500	0	0	N/A
		RAD <sub>2</sub>	(1 000,1 000)	6	5.6	0.8	500	0	0	N/A

表2 收益函数的初始权重

Table 2 Initial weight of reward function

权重系数	BR <sub>1</sub>	BR <sub>2</sub>	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	RER <sub>1</sub>	RER <sub>2</sub>	RAD <sub>1</sub>	RAD <sub>2</sub>
$\alpha_i^X(0)$	0.4	0.3	0.8	0.65	0.3	0.6	0.75	0.7
$\beta_i^X(0)$	0.5	0.5	0.7	0.6	0.4	0.7	0.8	0.8

表3 作战单位的命中概率

Table 3 Hit rate of combat units

作战单位	$j=1, BR_1$	$j=2, BR_2$	$j=3, BC_1$	$j=4, BC_2$	$j=5, RER_1$	$j=6, RER_2$	$j=7, RAD_1$	$j=8, RAD_2$
$i=1, BR_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=2, BR_2$	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=3, BC_1$	0	0	0	0	0.3	0.5	0.7	0.7
$i=4, BC_2$	0	0	0	0	0.2	0.5	0.6	0.5
$i=5, RER_1$	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=6, RER_2$	0.6	0.5	0.7	0.7	0	0	0	0
$i=7, RAD_1$	0.4	0.3	0.7	0.5	0	0	0	0
$i=8, RAD_2$	0.4	0.4	0.8	0.7	0	0	0	0

表4 作战单位的选择目标概率

Table 4 Rate of target selection for combat units

$RER_2=0(RER_2=1)$	$j=1, BC_1$	$j=2, BC_2$	$j=3, RER_2$	$j=4, RAD_1$	$j=5, RAD_2$
$i=1, BC_1$	0	0	0.1(0.8)	0.6(0.1)	0.3(0.1)
$i=2, BC_2$	0	0	0.1(0.6)	0.4(0.2)	0.5(0.2)
$i=3, RER_2$	0(1)	0(1)	0	0	0
$i=4, RAD_1$	0.6(0.8)	0.4(0.2)	0	0	0
$i=5, RAD_2$	0.5(0.6)	0.5(0.4)	0	0	0

表5 蓝方 $\alpha$ 权重的均衡因子

Table 5 Balance factor of blue  $\alpha$  weight

参数	BR <sub>1</sub>	BR <sub>2</sub>	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	RER <sub>1</sub>	RER <sub>2</sub>	RAD <sub>1</sub>	RAD <sub>2</sub>
$\lambda_i^x$	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)
$\sigma_i^x$	0 (0)	0 (0)	0.5~1.5 (0.4~1.6)	0.5~1.5 (0.4~1.6)	0 (0)	0.45~1.8 (0)	0.3~1.2 (0.3~1.3)	0.3~1.2 (0.3~1.3)
$\mu_i^x$	0 (0)	0 (0)	0.5~1.5 (0.4~1.6)	0.5~1.5 (0.4~1.6)	0 (0)	0.5~1.5 (0)	0.4~1.6 (0.4~1.6)	0.4~1.6 (0.4~1.6)

表6 红方 $\beta$ 权重的均衡因子

Table 6 Balance factor of red  $\beta$  weight

参数	BR <sub>1</sub>	BR <sub>2</sub>	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	RER <sub>1</sub>	RER <sub>2</sub>	RAD <sub>1</sub>	RAD <sub>2</sub>
$\lambda_i^x$	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	1.5~2.5 (0.5~1.5)	1.5~2.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)
$\sigma_i^x$	0 (0)	0 (0)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0 (0)	0.5~1.5 (0)	0.3~1.2 (0.4~1.6)	0.3~1.2 (0.4~1.6)
$\mu_i^x$	0 (0)	0 (0)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0.5~1.5 (0.5~1.5)	0 (0)	0.5~1.5 (0)	0.4~1.6 (0.4~1.6)	0.4~1.6 (0.4~1.6)

4.2 仿真结果

在求解纳什均衡时,采用蒙特卡洛方式进行7 200次仿真,对每一步的收益函数取期望 $\overline{J}_R^p, \overline{J}_B^g$ 作为纳什均衡的近似解,数据经均值化处理,误差棒为标准差,实验结果如下。

4.2.1 目标收益

如图2所示,蓝色矩形表示蓝方无人机集群,红色圆表示红方地面部队,黑色三角表示双方的收益和,实心表示有EI,空心表示NEI。纵坐标为目标收益 $J$ ,横坐标为对抗时间步 $k$ ,施加电子干扰EI

的对抗区间为[7,15]。

图2(a)表示在NEI情况下,红方的目标收益NEI-JR减小,蓝方的目标收益NEI-JB增大,蓝方在对抗中更占优势;在EI情况下,红方的目标收益EI-JR增大,蓝方的目标收益EI-JB减小,红方在对抗中更占优势。收益和EI+与NEI+均减小。图2(b)表示在NEI情况下,NEI-JR减小,NEI-JB增大。蓝方在对抗中更占优势;在EI情况下,EI-JR增大,EI-JB减小,红方在对抗中更占优势。而收益和EI+增大NEI+减小。图2(b)子图中,收益和NEI+持续减小,表明蓝方持续占优势,收益和EI+先减小后增大,表明蓝方在初期占优势,中后期红方更占优势。

无人机集群对抗过程是一种高度复杂的非线性动态过程。对比EI和NEI条件下的目标收益函数,发现静态权重的目标收益随着对抗演化,呈现了单调下降趋势;而根据图2(b)子图更易看出自适应权重的目标收益随着对抗演化,呈现非单调性。说明静态权重的目标收益曲线对复杂对抗过程的适应性不足,自适应权重的目标收益曲线可以更加合理地表征对抗过程,使得改进的目标收益函数具有一定的动态适应性。

4.2.2 对抗过程

由图3可知蓝方BR<sub>1</sub>、BR<sub>2</sub>与红方RER<sub>1</sub>均未有损失。在NEI情况下,BC<sub>1</sub>、BC<sub>2</sub>、RER<sub>2</sub>的数量下降趋势较小,RAD<sub>1</sub>、RAD<sub>2</sub>的数量下降趋势较大;在EI情况下,BC<sub>1</sub>、BC<sub>2</sub>、RER<sub>2</sub>的数量下降趋势较大,RAD<sub>1</sub>、RAD<sub>2</sub>的数量下降趋势较小。表明施加电子干扰可以击毁更多的BC<sub>1</sub>和BC<sub>2</sub>,同时减少

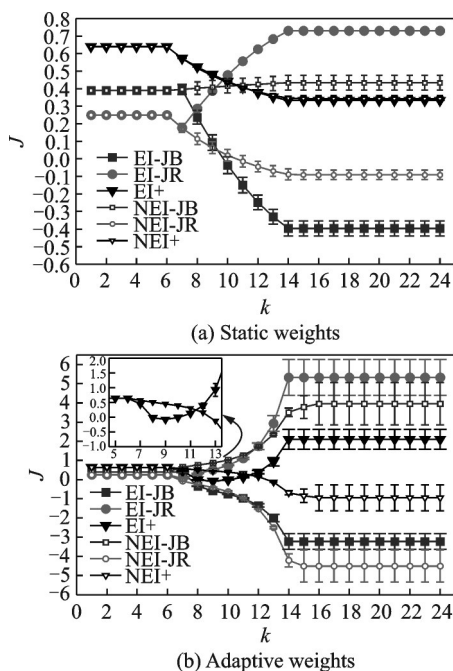


图2 静态权重和自适应权重的目标收益

Fig.2 Target reward of static weights and adaptive weights



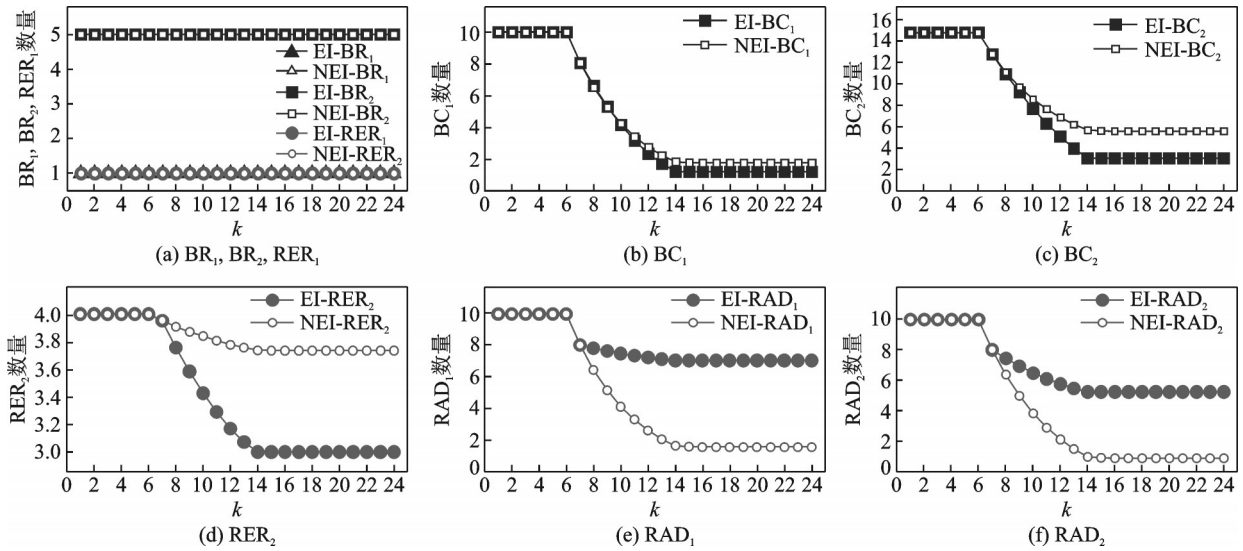


图3 作战单位数量

Fig.3 Number of combat units

RAD<sub>1</sub>和RAD<sub>2</sub>的损失。

4.2.3 对抗结果

对抗双方的作战单位数量直方图如图4(a)所示,NEI是未施加电子干扰的剩余数量,EI是施加电子干扰的剩余数量。双方获胜的条件是可攻击单位总数量的损失超过80%。图4(a)中,在NEI情况下,蓝方BC<sub>1</sub>+BC<sub>2</sub>的损失未超过80%,红方RAD<sub>1</sub>+RAD<sub>2</sub>的损失超过80%,因此在NEI情况下,蓝方较易获胜;而在EI情况下,蓝方BC<sub>1</sub>+BC<sub>2</sub>的损失超过80%,而红方RAD<sub>1</sub>+RAD<sub>2</sub>的损失未超过80%,因此在EI情况下,红方较易获胜。

将对抗结果分为3种情况:平局,红方胜和蓝方胜。如图4(b)所示,在NEI情况下,蓝方获胜

比率为94.61%,红方获胜的比率为2.78%,平局的比率为2.61%;在EI情况下,红方获胜的比率为100%,蓝方获胜和平局的比率均为0%。

4.2.4 自适应权重差

自适应权重差值等于EI时的权重值减去NEI时的权重值。如图5所示,蓝色*a*表示蓝方无人机集群的权重差值(简称为*a*差值),红色*b*表示红方地面部队的权重差值(简称为*b*差值)。由图5可知,BR<sub>1</sub>、BR<sub>2</sub>、RER<sub>1</sub>的权重没有变化,表明在对抗过程中其收益权重是相互独立的。BC<sub>1</sub>、BC<sub>2</sub>的*a*差值曲线递减,说明蓝方认为EI使得BC<sub>1</sub>、BC<sub>2</sub>的作战能力削弱;*b*差值曲线也递减,说明红方认为EI使得BC<sub>1</sub>、BC<sub>2</sub>的威胁程度降低。

RER<sub>2</sub>的*a*差值曲线递增,说明蓝方认为EI使得RER<sub>2</sub>的威胁程度增加;*b*差值曲线也递增,说明红方认为EI使RER<sub>2</sub>的作战能力增强。RAD<sub>1</sub>的*a*差值曲线非线性递增,说明蓝方认为EI使得RAD<sub>1</sub>的威胁程度非线性增加;*b*差值曲线非单调增加, $k \in [1, 9]$ 时红方认为EI使得RAD<sub>1</sub>的作战能力增强, $k \in [10, 16]$ 因受损较大使得增强后的作战能力有所削弱。RAD<sub>2</sub>的*a*差值曲线非单调增加, $k \in [1, 14]$ 时蓝方认为EI使得RAD<sub>2</sub>的威胁程度增加, $k \in [15, 16]$ 因受损较大使得增加的威胁程度有所降低;*b*差值曲线非单调增加, $k \in [1, 14]$ 时红方认为EI使得RAD<sub>2</sub>的作战能力增强, $k \in [15, 16]$ 因受损较大使得增强后的作战能力有所削弱。

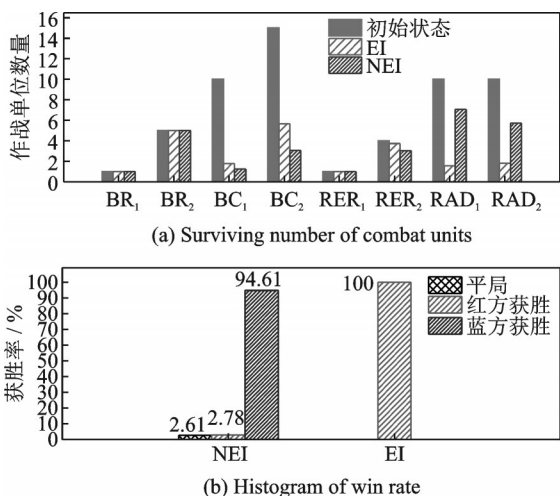


图4 作战单位剩余数量及获胜率直方图

Fig.4 Surviving number of combat units and histogram of win rate



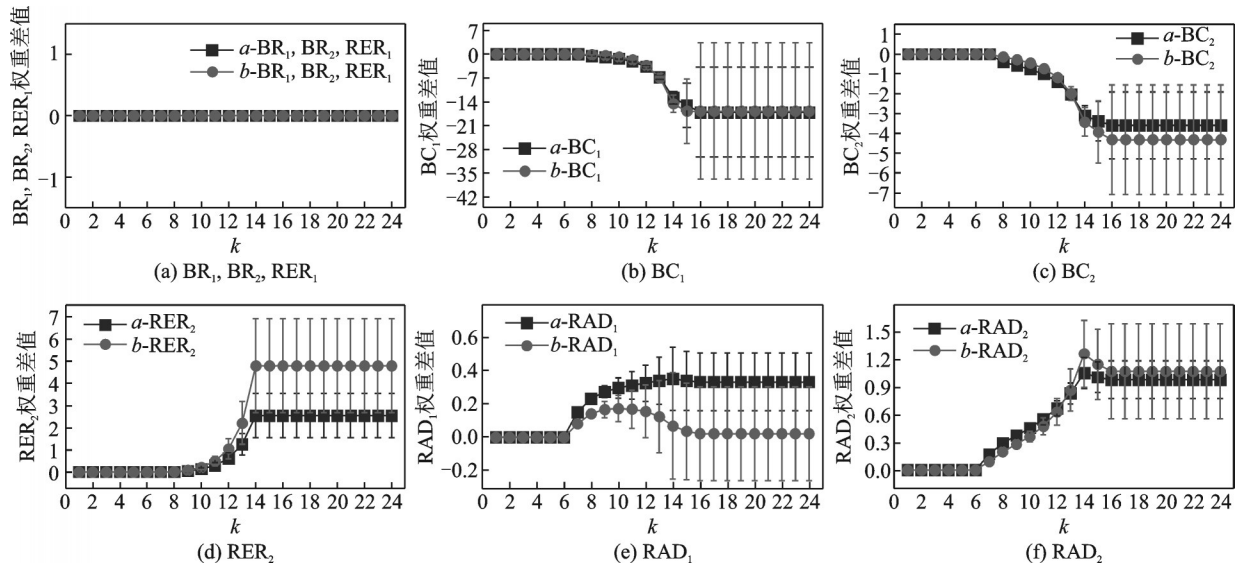


图5 自适应权重差值曲线

Fig.5 Curves of adaptive weight difference

## 5 结 论

针对无人机集群对抗博弈时目标收益函数的动态变化问题,本文以无人机集群空地对抗为作战场景,分析动态变化的战场态势,提出一种基于战场态势的收益权重自适应计算方法,改进动态博弈的目标收益函数,主要结论:(1)非线性动态系统与博弈论相结合,建立无人机集群空地对抗博弈模型,提出非完全信息下目标选择概率的生成方法,得出的动态命中因子能适应不同打击策略下的对抗行为;(2)空地对抗仿真实验表明,提出的自适应收益权重能够表征对抗策略差异下的不同收益,通过权重差曲线可以表征自适应权重对不同策略的灵敏程度。与静态权重模型相比,自适应权重模型的目标收益刻画态势的准确性更高。

### 参考文献:

- [1] 李鹏举,毛鹏军,耿乾,等.无人机集群技术研究现状与趋势[J].航空兵器,2020,27(4):25-32.  
LI Pengju, MAO Pengjun, GENG Qian, et al. Research status and trend of UAV swarm technology[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(4): 25-32.
- [2] 陈晓东,刘学龙,井应忠.基于无人机集群的电子战系统探讨[J].现代雷达,2020,2(5):9-12.  
CHEN Xiaodong, LIU Xuelong, JING Yingzhong. Electronic warfare system based on UAV swarm[J]. Modern Radar, 2020, 2(5): 9-12.
- [3] 刘鸿福,苏炯铭,付雅晶.无人系统集群及其对抗技术研究综述[J].飞航导弹,2018(11):35-40,91.  
LIU Hongfu, SU Jiongming, FU Yajing. Overview of unmanned system swarm and combat technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(11): 35-40, 91.

40, 91.

- [4] ZOHDIT I. On the dynamics and breakup of quadcopters using a discrete element method framework[J]. Compute Methods Appl Mech Eng, 2017, 327: 503-521.
- [5] ZOHDIT I. Mechanistic modeling of swarms[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(21/22/23/24/25/26): 2039-2051.
- [6] ZOHDIT I. The game of drones: Rapid agent-based machine-learning models for multi-uav path planning[J]. Computational Mechanics, 2020, 65: 217-228.
- [7] 陈灿,莫雳,郑多,等.非对称机动能力多无人机智能协同攻防对抗[J].航空学报,2020,41(12):342-354.  
CHEN Can, MO Li, ZHENG Duo, et al. Cooperative attack-defense game of multiple UAVs with asymmetric maneuverability[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12): 324-354.
- [8] 罗德林,张海洋,谢荣增,等.基于多agent系统的大规模无人机集群对抗[J].控制理论与应用,2015,32(11):1498-1504.  
LUO Delin, ZHANG Haiyang, XIE Rongzeng, et al. Unmanned aerial vehicles swarm conflict based on multi-agent system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(11): 1498-1504.
- [9] 轩书哲,柯良军.基于多智能体强化学习的无人机集群攻防对抗策略研究[J].无线电工程,2021,51(5):360-366.  
XUAN Shuzhe, KE Liangjun. Study on attack-defense countermeasure of uav swarms based on multi-agent reinforcement learning[J]. Radio Engineering, 2021, 51(5): 360-366.
- [10] 符小卫,王辉,徐哲.基于DE-MADDPG的多无人机协同追捕策略研究[EB/OL].[2021-10-25].http://

- kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210326.1703.014.html.
- FU Xiaowei, WANG Hui, XU Zhe. Research on cooperative pursuit strategy for multi-UAVs based on DE-MADDPG algorithm[EB/OL].[2021-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210326.1703.014.html>.
- [11] 章豪,傅鸣,龚瑞.基于分布式模型预测控制的多无人机协同规避控制技术[J].南京航空航天大学学报,2017,49(S):96-102.
- ZHANG Hao, FU Ming, LONG Rui. Cooperative avoid control technology of multi-UAV based on distributed model predictive control algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 96-102.
- [12] LIU G L, XING D J, HOU J Y, et al. Distributed cooperative control algorithm for multi-UAV mission rendezvous[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 3(6): 617-626.
- [13] XING D J, ZHEN Z Y, ZHOU C Y, et al. Cooperative search of UAV swarm based on ant colony optimization with artificial potential field[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 36(6): 912-918.
- [14] JIA T, XU H H, YAN H T, et al. Decentralized multi-agent task planning for heterogeneous UAV swarm[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 37(4): 528-538.
- [15] 王尔申,任虹帆,宏晨,等.函数调用网络的结构属性及其静态鲁棒性[J].北京航空航天大学学报,2021,47(4):675-681.
- WANG Ershen, REN Hongfan, HONG Chen, et al. Structural properties and static robustness of function call networks[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(4): 675-681.
- [16] 王尔申,郭靖,宏晨,等.基于随机空间网络的无人机集群协同对抗模型[EB/OL].[2021-11-01].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0206>.
- WANG Ershen, GUO Jing, HONG Chen, et al. The cooperative confrontation model of UAVs with random spatial networks[EB/OL]. [2021-11-01]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0206>.
- [17] 王尔申,王玉伟,庞涛,等.基于边攻击成本的复杂网络鲁棒性研究[J].电子学报,2018,46(5):1166-1172.
- WANG Ershen, WANG Yuwei, PANG Tao, et al. Research on robustness of complex networks with edge's attack cost[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1166-1172.
- [18] CRUZ J B, SIMAAN M A, GACIC A, et al. Game-theoretic modeling and control of a military air operation[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(4): 1393-1405.
- [19] CRUZ J B, SIMAAN M A, GACIC A, et al. Moving horizon game theoretic approaches for control strategies in a military operation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 989-999.
- [20] 赵玉亮,宋业新,张建军,等.基于多策略融合粒子群的无人机对地攻击模糊博弈决策[J].控制理论与应用,2019,36(10):1644-1652.
- ZHAO Yuliang, SONG Yexin, ZHANG Jianjun, et al. Fuzzy game decision-making of unmanned aerial vehicles air-to-ground attack based on the particle swarm optimization integrating multiply strategies[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(10): 1644-1652.
- [21] 鲁鸿轩,魏瑞轩.基于三支理论的无人机对地攻击认知决策方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(5):1-6.
- LU Hongxuan, WEI Ruixuan. Research on the cognitive decision-making methods based on unmanned aerial vehicle making an attack on ground[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 1-6.
- [22] 薄宁,李相民,代进进,等.基于MDP的有/无人机编队对地攻击行动方案规划[J].电光与控制,2019,26(2):16-22.
- BO Ning, LI Xiangmin, DAI Jinjin, et al. MDP based air-to-ground attack operation planning for manned/unmanned aerial vehicle formation[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2): 16-22.
- [23] 马雯,叱干小玄.反无人机技术发展研究[J].航空兵器,2020,27(6):19-24.
- MA Wen, CHIGAN Xiaoxuan. Research on development of anti-UAV technology[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(6): 19-24.

(编辑:张蓓)