

doi: 10.7690/bgzdh.2019.05.016

## 基于改进组合拍卖算法的分布式空战攻击决策

顾佼佼<sup>1</sup>, 周曰建<sup>2</sup>, 付鹏飞<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学三院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92916 部队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对高动态空战环境下集中式指挥控制方式易受干扰, 且突发情况下重分配时效性不高的问题, 基于改进组合拍卖算法提出一种完全分布式的协同空战攻击决策模型。各战机 agent 用贪婪算法构造组合投标, 通过信息交换与相互协商实现任务的分配与协调, 达到攻击方案的一致。实验验证了该算法的有效性, 其时效性可满足战场实际需要。

**关键词:** 组合拍卖; 分布式; 协同空战; 协商机制

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## Distributed Air Combat Decision Making Based on Improved Combinational Auction

Gu Jiaojiao<sup>1</sup>, Zhou Yuejian<sup>2</sup>, Fu Pengfei<sup>1</sup>

(1. No. 3 College, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. No. 92916 Unit of PLA, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the centralized command and control model in high dynamic air combat environment is easy to be interfered and redistribution efficiency under emergency situations is low, a fully distributed cooperative air combat decision-making model based on improved combinational auction is proposed. The fighter agents construct combination biddings using greedy algorithm. The task is allocated and coordinated through information exchange and mutual negotiation to achieve the same attack plan. Simulation results show that the algorithm is efficient and its time efficiency for practical needs of warfield.

**Keywords:** combinational auction; distributed; cooperative air combat; negotiation mechanism

### 0 引言

战机编队在高动态环境下执行作战任务的过程中, 若编队与指控中心通信受到干扰, 或出现一些预先规划时无法预料的临时突发任务, 需要在时间紧迫的动态战场环境中进行任务重分配<sup>[1-2]</sup>。重分配对算法的实时性要求很高, 需要在短时间内寻到满意而不一定是最优的分配决策。这就要求作战编队有一定的自主决策能力, 并具备较高实时性<sup>[3-4]</sup>。

在高动态、不确定性较强的环境中, 分布式分配模型比集中式更有优势。笔者提出基于改进组合拍卖<sup>[5]</sup>的分布式协同空战攻击决策算法, 各战机用贪婪算法构造目标拍卖组合, 在完全分布式的环境下, 智能体之间通过协商达到攻击方案的一致, 实时性非常高。

### 1 分布式协同攻击决策建模

#### 1.1 分布式体系结构

分布式体系结构中各战机视为智能体 agent, 整个系统形成多 agent 系统<sup>[6-7]</sup>。以往的方法首先需要

各成员通过信息的完全交互以获取对战场态势的统一感知, 然后进行协调决策, 较大的数据通信量限制了组网成员的数量<sup>[6]</sup>, 忽视了问题本身的分布式等特点<sup>[8-11]</sup>。在文中分布式体系结构中, 各战机根据自身对敌机群的态势评估进行组合拍卖投标, 不需要多次交互以统一态势感知, 网络中交互的信息只是投标信息<sup>[12]</sup>。

#### 1.2 协同攻击决策建模

笔者针对在时间紧迫的动态战场环境中的任务重分配, 要求重分配结果能够响应新出现的威胁, 根据每架敌机的威胁权重确定攻击顺序, 有效地对突发威胁进行响应。

假设在某次协同攻击多目标的超视距空战中, 我方机群  $B$  由  $M$  架战机组成,  $B = \{i, i = 1, 2, \dots, M\}$ , 每架战机挂载导弹集合为  $A_i$ , 挂载导弹总数为  $K$ , 我方战机具备多目标攻击能力; 敌方机群  $R$  由  $N$  架飞机组成,  $R = \{j, j = 1, 2, \dots, N\}$ , 每架敌机的威胁权重为  $W_j$ 。战机所挂导弹  $A_i$  攻击敌机  $R_j$  为  $A_i \rightarrow R_j$ ,

收稿日期: 2019-01-21; 修回日期: 2019-02-26

作者简介: 顾佼佼(1986—), 男, 山东人, 博士, 讲师, 从事火力指挥与控制研究。

对敌机  $R_j$  的摧毁概率为  $th_{rR_j}$ 。选取一次目标分配后毁伤效能越大越好的分配原则，构造目标决策函数<sup>[13]</sup>为：

$$E(\pi) = \max_{\pi \in \Omega} \sum_{j=1}^N W_j \left[ 1 - \prod_{r=1}^K (1 - th_{rR_j})^{X_{rR_j}} \right],$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^M X_{iR_j} = 1, j = 1, 2, \dots, N,$$

$$\sum_{j=1}^N X_{iR_j} = 1, i = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

式中  $\Omega$  是导弹-目标分配空间。 $X_{rR_j}$  为二值函数如下式所示：

$$X_{rR_j} = \begin{cases} 1 & A_r \rightarrow R_j \\ 0 & \neg(A_r \rightarrow R_j) \end{cases} \quad (2)$$

## 2 基于改进组合拍卖的分布式模型求解

拍卖是多 agent 系统进行任务分配时的常用技术，组合拍卖 (combinational auction, CA)<sup>[5]</sup> 是多物品拍卖的一种，指参加拍卖的竞标者可以对一组商品的组合进行投标，解决组合资源如何分派的问题。笔者从投标消息和拍卖机制设计 2 方面阐述对组合拍卖的改进。

### 2.1 投标消息设计

每个战机智能体针对初始目标集  $\{R = \{j, j = 1, 2, \dots, N\}\}$ ，根据战机载弹量  $A_i$  的限制，采用贪婪算法依次选取该战机可造成最大毁伤效能的目标构成拍卖组合  $C_i$ 。投标消息指拍卖中 agent 相互沟通的消息结构，在协商拍卖过程中智能体之间主要通信如表 1 所示 4 个数组信息。构造本机拍卖目标组合的算法如图 1 中伪代码所示。

表 1 战机智能体主要维护的数据内容

数组	含义	维度
$C_i$	依据贪婪算法构造目标组合数组	$A_i$
$Scores_i$	$C_i$ 中所拍敌机的拍卖价格数组 (该机的相对态势优势)	$A_i$
winners	该机记录每架敌机的竞胜者	$N$
winner_scores	该机中记录每架敌机的竞胜者的投标	$N$

```

procedure combinationbid
    len = length( $C_i$ )
    while len <  $A_i$ 
         $Ind = \arg \max_{j \in bidsin i} W_j * th_{iR_j}$ 
    
```

```

 $C_i(len + 1) = Ind$ 
 $Scores_i(len + 1) = W_{ind} * th_{i\_ind}$ 
winners(ind) =  $i$ 
winner_scores(ind) =  $W_{ind} * th_{i\_ind}$ 
end while
end procedure
    
```

图 1 智能体投标通信消息构造方式

### 2.2 拍卖机制设计

文献[3,4,8-11]中拍卖算法在拍卖前构造所有可能的攻击方案，然后由“招标者”生成拍卖顺序和进行胜者决定计算。文中模型在完全分布式环境中，没有担任“招标者”角色的 agent，智能体之间通过构造协商协议，平等协商，使编队就攻击方案达到一致状态。假设某次通信由 agent  $k$  发消息给 agent  $i$ ，提出协商协议如表 2 所示。其中， $S_{kj}$  表示智能体  $k$  中记录敌机  $j$  的中标者的拍价， $T_{km}$  表示智能体  $k$  中记录关于智能体  $m$  信息更新的时间戳。更新操作表示更改接收智能体  $i$  的中标者为消息发送者中的记录，重置操作指将智能体  $i$  中的中标者记录置零。

表 2 对于敌机  $j$  通信双方协商协议

agent $k$ 记录 中标者	agent $i$ 记录 中标者	agent $i$ 行为
$k$	$i$	If $S_{kj} > S_{ij}$ 更新
	$k \cup \emptyset$ $M \in R \setminus (i, k)$	更新 If $T_{km} > T_{im} \cup S_{kj} > S_{ij}$ 更新
$i$	$k$	reset
	$m \in R \setminus (i, k)$	If $T_{km} > T_{im}$ 重置
$m \in R \setminus (i, k)$	$i$	If $T_{km} > T_{im} \cap S_{kj} > S_{ij}$ 更新
	$k \cup m \cup \emptyset$	If $T_{km} > T_{im}$ 更新
	$n \in R \setminus (i, k, m)$	If $T_{kn} > T_{in} \cap (T_{kn} > T_{in} \cup S_{kj} > S_{ij})$ 更新 If $T_{kn} > T_{in} \cap T_{im} > T_{km}$ 重置
$\emptyset$	$k$	更新
	$m \in R \setminus (i, k)$	If $T_{km} > T_{im}$ 更新

经过一轮协商后，各智能体根据自身记录的竞胜者记录修改自己的拍卖组合。协商过程是各智能体自发的，只要能通信的节点之间都根据协议进行协商。若用无向图作为通信网络，只要网络中存在最小生成树，任意 2 个 agent  $i, k$  之间有限步数内可达，则改进算法最差可在  $D \min(N_i, N_a)$  时间内达到收敛，其中  $D$  为网络直径，证明从略<sup>[14]</sup>。

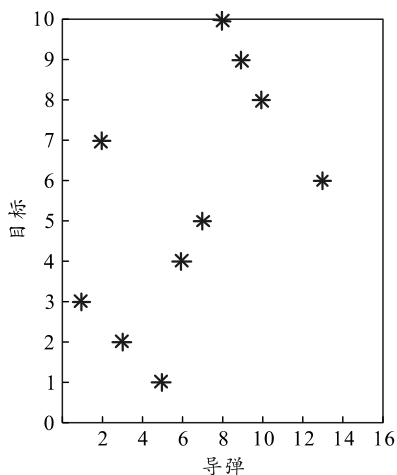
## 3 仿真实验及分析

为验证所提改进组合拍卖算法求解攻击决策问题的可行性和有效性，笔者采用文献[13]中算例进

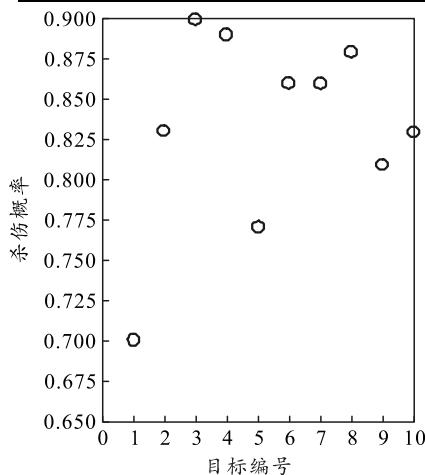
行仿真实验。我方战机编队采取协同空战战术，编队包含 4 架战机，每架战机均挂在 4 枚导弹，某时刻发现 10 个敌机目标，战机编队、导弹及目标编号如表 3 所示。基于改进组合拍卖算法的分配及杀伤结果如图 2 所示。

表 3 我方战机及其挂载导弹编号

战机编队	导弹编号	目标编号
A <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> -M <sub>4</sub>	T <sub>1</sub> ~T <sub>10</sub>
A <sub>2</sub>	M <sub>5</sub> -M <sub>8</sub>	T <sub>1</sub> ~T <sub>10</sub>
A <sub>3</sub>	M <sub>9</sub> -M <sub>12</sub>	T <sub>1</sub> ~T <sub>10</sub>
A <sub>4</sub>	M <sub>13</sub> -M <sub>16</sub>	T <sub>1</sub> ~T <sub>10</sub>



(a) 目标分配结果



(b) 对敌毁伤效果 4.468 5

图 2 基于改进组合拍卖算法的分配及杀伤结果

各战机分别态势评估我各战机对目标的毁伤概率矩阵为：

$$P = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} \\ \begin{matrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.54 & 0.83 & 0.90 & 0.88 & 0.75 & 0.66 & 0.86 & 0.81 & 0.77 & 0.63 \\ 0.70 & 0.72 & 0.73 & 0.89 & 0.77 & 0.67 & 0.85 & 0.68 & 0.85 & 0.83 \\ 0.67 & 0.64 & 0.85 & 0.88 & 0.56 & 0.73 & 0.63 & 0.88 & 0.81 & 0.56 \\ 0.65 & 0.71 & 0.81 & 0.56 & 0.77 & 0.86 & 0.85 & 0.71 & 0.66 & 0.61 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

敌方各战机的威胁权重矩阵  $W$  设为

$$W = [0.6 \ 0.7 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.35 \ 0.65 \ 0.55 \ 0.4 \ 0.75].$$

采用改进组合拍卖算法及文献[13]中所提

SA-DPSO 算法、文献[15]所提 MODPSO-GSA 算法对该火力分配问题进行优化求解。改进组合拍卖以对每个目标分配一枚导弹为例；SA-DPSO、MODPSO-GSA 中的参数均采取原文献中的设置。SA-DPSO 所得结果为导弹的全分配；MODPSO-GSA 为多目标优化算法，可同时得到多个不同耗弹量分配方案解集供指挥员决策参考。3 种算法的效能对比如表 4 所示，改进组合拍卖算法具备很高的时效性，而且耗弹量为 10 的分配结果比 MODPSO-GSA 所寻耗弹量为 10 的分配结果毁伤效果要好。

表 4 算法毁伤效能及时间性能(s)对比

指标	改进 CA	SA-DPSO	MODPSO-GSA
耗弹量	10	16	10 11 12 13 14 15
毁伤效能	4.468 5	4.912 4	4.46 4.592 7 4.698 9 4.797 7 4.881 5 4.952 9
时间效率	0.090 5	4.46	6.895 2

### 4 结束语

笔者提出一种在分布式环境下基于改进组合拍卖的协同空战攻击决策算法，并经仿真对比验证了该算法的有效性及时效性。

### 参考文献：

[1] 齐心跃, 田彦涛, 杨茂. 基于市场机制的多机器人救火任务分配策略[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2009(5): 506-513.  
 [2] 孙婷婷, 徐杨, 周璞. 异构资源分配问题的多智能体系

统求解方法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2012, 50(6): 1163-1168.  
 [3] 廖沫, 陈宗基. 基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33: 180-183.  
 [4] 贾圣德. 市场拍卖机制在多UCAV协同控制中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
 [5] 王宏. 组合拍卖的理论与实践: 一个文献综述[J]. 产业经济评论, 2009(8): 111-146.

因在系统中的地位，了解解决哪些原因对于提高装备的可靠性有较大提升，对合理高效地解决该故障提供理论参考依据。

参考文献：

[1] 国防科工委军标出版发行部. 国家军用标准可靠性(I)[M]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1992: 15-21.

[2] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[3] XING L, AMARI S V. Fault Tree Analysis[M]. Handbook of Performability Engineering. Springer London, 2008.

[4] 陈宇毅. FTA故障树分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

\*\*\*\*\*

(上接第 69 页)

[6] 于银辉, 杨长保, 刘志辉. 基于多 Agent 的分布式专家系统及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35: 266-269.

[7] 吴云华, 曹喜滨, 曾占魁. 编队飞行卫星相对姿态变结构分布式协同控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1465-1470.

[8] 刘波, 覃征, 邵利平, 等. 基于群集智能的协同多目标攻击空战决策[J]. 航空学报, 2009, 30: 1727-1739.

[9] 龙涛. 多UCAV协同任务控制中分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

[10] 杨茂, 李成凤, 田彦涛. 动态环境下群体机器人同步的分布式控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(2):

\*\*\*\*\*

(上接第 85 页)

[6] 黄家才, 张玳橙, 施昕昕. 基于复合积分滑模的永磁同步电机硬件在环位置控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(12): 108-114.

[7] 刘辉, 吴云洁, 刘旺开, 等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40.

[5] 倪绍徐, 张裕芳. 基于故障树的智能故障诊断方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1372-1375.

[6] 胡隆基. 基于故障树分析法的某型高炮随动系统故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 40-43.

[7] 何庆飞, 王汉功, 陈小虎. 故障树分析法在汽车起重机液压系统故障诊断中的应用[J]. 机床与液压, 2014(2): 196-198.

[8] 郑裕国, 张康达. 故障树定性和定量计算的算法[J]. 浙江工业大学学报, 1995(3): 42-47.

[9] 徐敬青, 齐杏林, 李宁. 基于故障树的某型末制导炮弹控制舱故障分析[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 25-27.

[10] 安然, 於孝春. 空分主冷凝蒸发器爆炸的故障树分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(3): 164-165.

\*\*\*\*\*

497-502.

[11] 赵敏. 分布式多类型无人机协同任务分配研究机仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[12] WHITTEN A K, CHOI H L, JOHNSON L. Decentralized Task Allocation with Coupled Constraints in Complex Missions[C]//American Control Conference (ACC). Berlin: Springer-Verlag, 2011: 1642-1649.

[13] 李俨, 董玉娜. 基于 SA-DPSO 混合优化算法的协同空战活力分配[J]. 航空学报, 2010, 31: 626-631.

[14] LUC B. Consensus-based Auctions for Decentralized Task Assignment[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[15] 顾俊俊, 赵建军, 颜骥. 基于 MODPSO-GSA 的协同空战武器目标分配[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 31: 626-631.

\*\*\*\*\*

[8] 王春明, 李明秋, 姜淑华, 等. 分数阶控制系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 5-6.

[9] 寇宝全, 程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 55-56.

[10] 王志宇, 王长松, 范普成. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计[J]. 微电机, 2011, 44(6): 52-56.