

基于分布式计算的多机协同空战目标分配算法

潘寒尽¹, 王威², 邱学军¹, 张欣³

(1. 陆航研究所, 北京 101121; 2. 空军空降兵学院, 广西 桂林 541003; 3. 山东职业学院, 济南 250104)

摘要: 针对多机协同空战中目标分配的实时性和复杂性问题, 提出一种基于分布式计算的协同空战目标分配算法。该算法参考空中作战常见的三级指挥体制, 构建了相应的分层任务分解结构和多智能体(MAS)目标分配模型, 将传统的集中控制、集中优化问题分布到多个作战控制单元进行计算, 从而提高优化的性能。而且根据空战指挥决策的特点, 算法还可将目标优化分配准则嵌入智能体(Agent)决策的过程中, 使分配结果更能充分考虑空中作战的实际需求。最后就一个典型多编队多目标的空战实例进行了仿真验证, 证明了方法的有效性, 并对该方法在提高空战效率和分配实时性的优势进行了分析。

关键词: 协同空战; 目标分配; 分布式; 多智能体

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)01-0032-04

Target Assignment in Multi-Aircraft Cooperative Air Combat Based on Distributed Calculation

PAN Hanjin¹, WANG Wei², QIU Xuejun¹, ZHANG Xin³

(1. Research Institute of Army Aviation, Beijing 101121, China; 2. Air Force Paratrooper College, Guilin 541003, China; 3. Shandong Polytechnic, Jinan 250104, China)

Abstract: A method of target assignment in multi-aircraft cooperative air combat based on distributed calculation was put forward according to the characteristics of the present air combat. Referring to the present three-level command system of air force, we built up the corresponding hierarchical structure of decomposed task and Multi-Agent System (MAS) target assignment model. Then, simulation was made for the air combat of typical multi-formation against multi-target, which proved the effectiveness of this method. Finally, the virtues of this method in improving air combat efficiency and reducing assignment time were analyzed.

Key words: cooperative air combat; target assignment; distributed calculation; Multi-Agent System (MAS)

0 引言

在现代空战中, 预警机利用其相控阵雷达和辅助决策系统, 在远距离上和较大范围内引导己方作战飞机进行空中交战已经成为一种主要手段^[1]。在这种大规模、多运动作战平台的协调控制环境下, 由于平台的运动性、敏感性和通信通道故障的影响, 信息和计算是高度分布的^[2-4], 这使得传统集中控制类型的目标分配算法使用起来非常困难。因为其集中式控制结构依赖非常可靠的大量数据传输, 缺乏基本的鲁棒性和隐蔽性, 不

能满足现代空战的要求, 而且计算的实时性和复杂性问题也是此类集中控制算法的一个主要问题^[5-6]。

本文主要对多机协同空战中的目标分配问题进行研究, 在此基础上提出了一种基于分布式计算的目标分配多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)算法, 其分布式的方法可以通过对任务的分解和增加参与目标分配计算的资源来获得更好的性能, 更加适用于多机协同空战这种大规模的目标分配问题, 而且它还能紧密地与现行地面指挥所-预警机-长机的空战指挥控制机制相耦合。

1 目标分配的数学模型

考虑目标分配问题, 假设我方有 M 架作战飞机和 N 架目标飞机, 每架作战飞机可拦截多个目标, 但每架

收稿日期: 2011-11-23

修回日期: 2012-01-09

基金项目: 总装项目(K6S03095)

作者简介: 潘寒尽(1981—), 男, 江苏连云港人, 博士, 工程师, 研究方向为作战建模与仿真。

战机分配的目标个数最多不能超过该战斗机剩余的可用于攻击的导弹数。

目标分配的数学模型为

$$\begin{cases} \min Z_0 = \sum U_j \\ \max Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (P_{kill}^{ij} - Q_{ji}) \cdot X(i,j) \end{cases} \quad (1)$$

s. t. $X_{ij} \in G$

式中： U_j 为目标机 j 是否被分配的指示数， $U_j = 1$ ，目标机 j 没有被分配，否则， $U_j = 0$ ； Q_{ji} 为目标机 j 对我方飞机单元 i 的优势函数； P_{kill}^{ij} 为我方飞机单元 i 对目标飞机 j 的优势函数； $X(i,j)$ 为我方飞机单元 i 是否对目标 j 拦截的指示数， $X(i,j) = 1$ 则拦截， $X(i,j) = 0$ 则不拦截， $X(i,j)$ 的取值既受到客观的可拦截约束条件限制，还要满足指挥员的要求和分配原则； X_{ij} 为向战机分配目标的相关约束条件，包括向战机分配目标的空间、时间和资源的约束条件； G 为约束集，包括分配目标的空间、时间和资源约束条件^[7]。

2 优势函数的构造

空战态势评估是目标分配的基础，只有维持高水平的态势评估，才能得到合理、准确的目标分配结果。进行态势评估需要建立优势函数来对态势信息进行综合评估，给出交战双方态势的对比情况。优势函数包括相对攻击优势 T_R 、角度优势 T_S 和能量优势 T_E ^[8]。

综合的优势函数构造如下

$$T_Z = k_1 T_R + k_2 T_S + k_3 T_E \quad (2)$$

其中， k_1, k_2, k_3 为加权系数， $k_1 + k_2 + k_3 = 1, 0 < k_1, k_2, k_3 < 1$ 。

考虑到超视距空战条件下，随着“发射后不管”全向攻击中远距空导弹的出现，角度优势与近距格斗相比不明显，并且角度与距离优势的相关性减弱，故此取 $k_1 = 0.4, k_2 = 0.2, k_3 = 0.4$ 。双方参数互换，可得敌方的优势指数，双方优势指数的对比将作为后续目标分配决策的依据。

3 基于分布式计算的目标分配算法

作为一个复杂的火力单元组合问题，多机协同空战目标的分配很难用一般的方式在真实决策系统允许的较短时间内寻找到最优解。所以，一般的研究重点就着重于寻找一些更加实用的方法获得满意解，而不是最优解^[9]。本文解决目标分配的问题也是由此出发，参考空战的现行指挥体制^[10-11]，希望能通过分布式的途径，获得一个接近最优的满意结果。

算法的基本思想是：根据空战指挥体系对目标分配问题进行逐层分解，将多编队大型复杂的目标分配问题

分解为多个小型简单的问题，在不同的指挥层次构建对应的单层 MAS 模型进行目标分配，如图 1 所示。

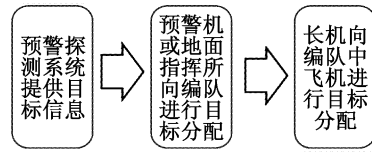


图 1 目标分配层次模型结构示意图

Fig. 1 Hierarchical target assignment model

3.1 目标分配的单层 MAS 模型

将 MAS 思想引入目标分配的优化过程，就是将其看作预警机或地面指挥所向编队、编队向飞机单元分配相应任务的过程。本文就此提出 3 类 Agent，分别为指挥控制 Agent (Control Agent, CA)、协同 Agent (Cooperative Agent, OA) 和作战单元 Agent (Airplane Agent, FA) 组成拦截决策计划的决策系统，如图 2 所示。

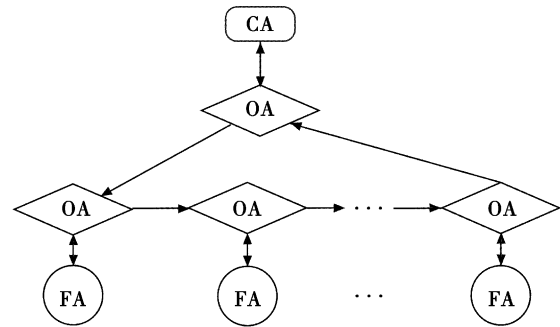


图 2 目标分配单层 MAS 模型结构示意图

Fig. 2 Target assignment monolayer MAS model

其中，3 种类型的 Agent 功能描述如下。

1) 协同 Agent (OA)：是系统中最为活跃的 Agent，在其接收到 CA 的命令之后，巡访所有的 FA，并和 FA 沟通协商，收集 FA 的目标分配计划，并向 FA 传达 CA 的控制指令。

2) 作战单元 Agent (FA)：其知识库中保存有该作战单元的完整性能信息和相应的一系列拦截约束条件。这些 Agent 不能移动，但掌握着一些和 OA 协商的简单计算规则和函数，它们可自动为 OA 提供满足所有约束条件并且能获得最大优势值的该作战单元对目标的拦截计划。

3) 控制 Agent (CA)：是整个目标分配的中心决策者，与其他分散在各个作战单元的控制计算机用数据链相连。它从上级系统提供的情报中获得目标数据信息，并命令 OA 根据目标数据去制定对应作战单元拦截计划。

3.2 单层 MAS 模型算法流程分析

在 MAS 研究和应用过程中，每种类型的 Agent 之间的协调合作是工作重点。本文采用类似于 KQML 语言包装消息对象对 MAS 中 Agent 进行相互间的通信，每个

表 3 敌方作战态势数据

Table 3 Operation situation data of enemy side

敌机编号 j	A	B	C	D	E	F	G	H	J
x_j/km	250	255	255	200	205	205	300	305	305
y_j/km	200	205	195	300	305	295	400	405	395
z_j/km	3	3	3	2.5	2.5	2.5	2	2	2
$V_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	(350,0,0)			(350,0,0)			(350,0,0)		
导弹最大攻击距离/km	80	80	80	80	80	80	80	80	80
机载雷达探测距离/km	100	100	100	100	100	100	100	100	100

4.1 仿真说明

在仿真中,由于敌机不考虑机型的差别,CA 中涉及的威胁度计算主要将敌机相对编队长机的优势函数值作为其威胁度;OA 将拦截方案中拦截机相对于被拦截机优势函数值作为拦截收益进行比较;FA 则主要计算接受目标信息中我机相对各敌机优势函数值。

可得到的最佳分配方案如表 4 所示,最优方案的目标函数值为 1.7655。此时可以看到,由于目标机 H、A 等对我机威胁度较大,为保证对重点目标的拦截概率,在分配方案中被分配给了我方多架飞机,这也体现了空战中集中火力、打击重点目标的作战原则。

表 4 最佳目标分配方案

Table 4 Optimum target assignment

我方飞机编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
分配目标敌机编号	GH	HJ	JH	DE	EF	FD	AC	BA	CA

重复上述试验 1000 次,结果表明,本文提出的基于分布式计算的目标分配算法在限定的短时间(2 min)内搜索到全局最优解的概率是 98.5%,搜索到最优解时平均的巡访次数是 10 次,若用其他随机搜索算法(本文采用步长加速法进行对比实验)解决目标分配问题,对于上述实例,搜索到最好的分配方案(全局最优解)平均需要计算适应值 5000 次左右,显然,本文提出的目标分配算法是高效的;另外,由于该目标分配算法采用的是分布式的计算方式,可以利用多台控制计算机的资源同时进行计算,因此在应用中具有更强的计算能力,相信随着计算规模的增大,基于分布式计算的目标分配算法处理目标分配问题会有更好的效果。

4.2 算法的统计性能分析

假设所有的巡访顺序中有占总数 p_r 的顺序生成的分配方案的优化百分比大于 r ,即一轮巡访得到优化百分比大于 r 的概率为 p_r 。若最大巡访轮数限制为 n ,令 p_a 为算法解的优化百分比大于 r 的概率。由于每轮巡访得到优化百分比小于 r 的概率为 $1 - p_r$,所以解的优化百分比大于 r 的概率 $p_a = 1 - (1 - p_r)^n$,则可以得出结论:若 $p_r > 1 - (1 - p_a)^{1/n}$,则最大巡访轮数为 n

时,算法解优化百分比大于 r 的概率大于 p_a 。

因此,若知道 p_r 和巡访轮数 n ,则能够了解算法优化性能的概率特性。对不同初始条件,不同 r 对应的 p_r 均不同。取前面目标分配的 10 组不同初始数据分析 p_r 的特性,总共可以生成 4! 种巡访顺序。表 5 为不同初始条件下取不同的 r 时, p_r 的取值情况。可见绝大部分巡访顺序得到的优化百分比大于 90%,优化百分比大于 95% 的顺序基本也占 3/4 以上,由此可见,本文目标分配算法的优化性能基本可以满足实际需求。

表 5 不同 r 时 p_r 的取值

Table 5 The p_r of different r

组号	P_r			组号	P_r		
	$r=0.85$	$r=0.9$	$r=0.95$		$r=0.85$	$r=0.9$	$r=0.95$
1	1	1	0.97	6	0.94	0.99	0.82
2	1	1	0.88	7	1	0.95	0.87
3	0.95	0.94	0.96	8	1	0.93	0.90
4	0.96	0.95	0.85	9	0.97	0.98	0.97
5	1	0.95	0.95	10	1	1	0.95

5 总结

本文提出了一种基于分布式计算的目标分配 MAS 算法,该算法运用全新的分布式协同计算思想,适应多机协同空战中装备型号众多、目标分配计算量大的特点,将传统的集中优化、集中调度问题,分布到各个作战控制单元进行计算。由于其分布式的方法增加了参与目标分配计算的资源,从而能获得更为良好的性能,更加适用于多机协同空战这种大规模的目标分配问题。而且根据空战指挥决策的特点,算法还可将目标优化分配准则嵌入 Agent 决策的过程中,使分配结果更能充分考虑空中作战的实际需求。该方法具有很好的优化性能和实时性,为解决多机协同空战的目标分配问题提供了一条崭新的研究途径和实施手段。

参考文献

[1] 东焯. 预警机的作战使用——访空军指挥学院装备教研室李仕华大校[J]. 兵工科技, 2010, 7(4): 29-33.

[2] 罗德林, 沈春林, 吴文海, 等. 空战格斗决策研究[J]. 应用科学学报, 2006, 24(1): 89-93.

[3] 梅丹, 吴文海, 徐家义, 等. 决策影响图方法在三维空战决策中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(2): 66-69.

[4] 王义宁, 姜玉宪. 空战对策的发展现状与未来[J]. 电光与控制, 2000, 7(2): 13-17.

[5] 赵磊, 李仁松, 常国任. 预警机引导战斗机空战目标分配模型[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 10(5): 34-36.

[6] LEE Z J, SU S F, LEE C Y. Efficiently solving general weapon - target assignment problem by genetic algorithms

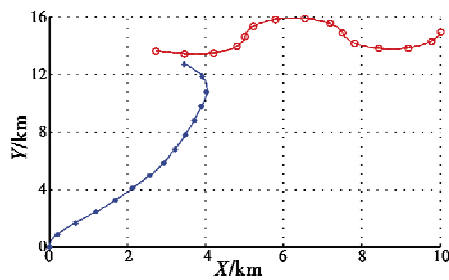


图9 近距空战机动决策轨迹图

Fig. 9 The maneuvering track of close-range air combat

由图8、图9可以知道,初期敌我双方均未处于对方人工势场范围内,我机首先通过其他支援信息进行决策,当进行第2次决策时,敌我双方都进入对方人工势场范围内,此时我机通过人工势场启发粒子群算法方法进行决策,迅速机动将敌方控制在我方人工势场最强的方向,并最后实现了我机的尾后攻击。仿真结果验证,通过人工势场启发粒子群算法的空战机动决策方法计算得到的机动决策结果完全达到了机动决策的目的。

5 结论

本文基于人工势场启发粒子群算法对战斗机空战机动决策问题进行了研究,建立了空战人工势场函数,研究了基于空战人工势场的威力,提出人工势场启发粒子群算法的空战机动决策方法,根据敌我人工势场分布情况分别利用人工势场方法和人工势场启发粒子群算法进行机动决策,并分别对超视距空战及近距格斗空战进行仿真,仿真结果表明:基于人工势场启发粒子群算法的空战机动决策是有效的,可以有效避免粒子群算法陷入局部最优,为空战机动决策研究提供了一种新的方法。

参考文献

- [1] MCGREW J S, HOW J P, WILLIAMS B, et al. Air-combat strategy using approximate dynamic programming [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2010, 33(5): 1641-1654.
 - [2] 罗德林,沈春林,吴文海,等.空战格斗决策研究[J]. *应用科学学报*, 2006, 24(1): 89-93.
 - [3] 刘东坡.基于滚动机制的有限时域设备更新方法[D]. 济南:山东大学, 2010.
 - [4] CARTER B R. Time-optimization of high performance combat maneuvers [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2005.
 - [5] 王飞,李成功,徐肖豪.基于人工势场-人工鱼群算法的改航路径规划[J]. *航空计算技术*, 2011, 41(2): 5-9.
 - [6] 魏贤智,庞春雨,孙亮,等.战斗机人工势场在主从编队引导控制中的应用[J]. *电光与控制*, 2010, 17(3): 51-56.
 - [7] 周焘,任波,于雷.战斗机指挥引导中的威力场模型[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(9): 84-87, 91.
 - [8] 杨永生.一种自适应调节粒子群优化算法的研究[J]. *西安科技大学学报*, 2011, 31(3): 356-362.
 - [9] 刘波.粒子群优化算法及其工程应用[M].北京:电子工业出版社, 2010.
 - [10] 刘建军.基于寿命的粒子群算法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(6): 157-160.
 - [11] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等.一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(9): 2162-2166.
 - [12] 朱宝珊,朱荣昌,熊笑非.作战飞机效能评估[M]. 2版.北京:航空工业出版社, 2006.
 - [13] 郭昊,周德云,张堃.无人作战飞机空战自主机动决策研究[J]. *电光与控制*, 2010, 17(8): 28-32.
-
- [9] 朱秋芳.歼击机超机动飞行控制及多机协同多目标攻击技术研究[D].南京:南京航空航天大学, 2007.
 - [10] HAMALAINEN V P. A decision analytic simulation approach to a one-on-one air combat game [D]. Finland: Helsinki University of Technology Systems Analysis Laboratory, 2002.
 - [11] 董彦非,郭基联,张恒喜.空战机动决策方法研究[J]. *火力与指挥控制*, 2002, 27(2): 75-78.

(上接第35页)

with greedy eugenics[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (Part B)*, 2003, 33(1): 113-121.

[7] BRIAN G. Aerial combat manoeuvre identification—a feasibility study of an intelligent decision support system [C]//Sim-TecT2000 Conference, 2000.

[8] 赵威,周德云.专家系统在空战多目标攻击排序中的应用[J]. *电光与控制*, 2008, 15(2): 23-26.

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅