

[文章编号] 1009-1300(2011)04-0093-05

# 网络战中舰艇编队协同目标最优分配研究

董奎义<sup>1</sup>, 杨根源<sup>2</sup>, 王子明<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院, 烟台 264001; 2. 海军信息化专家咨询委员会, 北京 100073)

[摘要] 为了解决多平台协同作战中的目标分配问题, 首先分析了目前舰艇编队防空火力分配模型普遍存在的不足. 然后, 以“编队不被目标突防的概率最大”为准则, 结合多智能体分布协同拍卖的思想, 建立了舰艇编队协同目标分配问题的数学模型, 并给出了模型的求解步骤. 最后, 通过实例进行了仿真验证. 结果表明, 该模型能够给出具有很好优化效果的分配方案, 较好地满足了舰艇指挥员在海上对空防御作战中火力分配的需求.

[关键词] 网络中心战; 多平台协同作战; 拍卖; 分布式火力分配

[中图分类号] TJ760

[文献标识码] A

## Research on the Target Optimization Assignment of Ship Formation Corporation in Network Centric Warfare

Dong Kuiyi<sup>1</sup>, Yang Genyuan<sup>2</sup>, Wang Ziming<sup>1</sup>

(1. Naval Aeronautical and Astronautic University, Yantai 264001, China;

2. Naval Information Expert and Consult Committee, Beijing 100073, China)

**Abstract:** The shortages of current ship formation air defense firepower assignment model are analyzed firstly in order to solve the problem of target assignment in corporative engagement of multiple platforms. And then, on the base of the rule of the most probability of formation without being penetrated, and combining with the idea of multi-agent decentralized cooperative auction, the mathematic model of target assignment of ship formation cooperation is built and the calculation steps of the model are presented at the same time. Finally, an application example is given, and the result shows that the method can provide assign schemes with good optimal objective function and can meet the firepower assignment need of naval commander in air defense combat at sea.

**Keywords:** network centric warfare; corporative engagement of multiple platforms; auction; distributed firepower assignment

## 1 引言

目前, 介绍舰艇编队防空火力分配模型的文献较多, 但从总体情况来看, 主要集中在利用数学规

划算法和启发式算法对防空火力进行目标分配<sup>[1-5]</sup>. 这些算法从一定程度上解决了编队对目标的火力分配问题, 然而这些分配方法在编队之间的通信方式和协同规则的实现方面考虑较少, 难以满足多平台协同作战过程中动态控制的实时性要求.

[作者简介] 董奎义, 博士研究生.

[收稿日期] 2010-07-29

同时,由于舰艇编队防空作战环境是高度不确定的,并且每一艘舰艇都具有自身特有的数据和防空作战指挥控制节点.为此,本文将多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)的计算理论<sup>[6]</sup>应用到多平台多种武器对抗空中威胁的协同作战指挥控制的研究中,将每艘舰艇看成一个防空武器智能体(Weapon Agent, WA),来袭空中目标看成舰艇要执行的任务,提出满足实时性要求的基于多 Agent 分布协同拍卖的动态目标分配方法<sup>[7-9]</sup>.

## 2 编队协同目标分配的数学模型

对于来袭的空中目标,如果能将目标全部毁伤当然是最佳的结果,但当目标强度大,超过舰艇编队防空武器系统的对空抗击能力时,则应尽可能地发挥武器系统的抗击效能,把空中目标对舰艇的威胁降至最低.因此,本文选取“编队不被目标突防的概率最大”作为舰艇编队防空武器系统目标分配的效率指标<sup>[10]</sup>.假设编队共拥有  $n$  个独立的 WA,编队同时受到  $m$  批目标的攻击;设编队中第  $i$  个 WA 毁伤第  $j$  批空中目标的概率为  $p_i(j)$ ,第  $j$  批来袭空中目标的综合威胁度为  $w_j(j = 1, 2, \dots, m)$ ;并假定每个 WA 最多可分配  $L$  批目标,而每批目标必须且只能分配给一个 WA.设对第  $j$  批目标分配的第  $i$  个 WA 数量为  $x_{ij}(x_{ij} \in \{0, 1\})$ ,则矩阵  $X = (x_{ij})$  即为火力分配矩阵,则火力分配的优化模型为

目标函数:

$$\max Z = \sum_{j=1}^m \{1 - w_j \cdot \sum_{i=1}^n [1 - p_i(j)]^{x_{ij}}\}. \quad (1)$$

约束条件:

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq L, i = 1, 2, \dots, n; \\ 0 \leq \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, m. \end{cases}$$

该模型从目标进攻,防空武器系统防御这一动态随机系统本身特性的角度考虑问题,约束条件的限制避免了防空武器系统 WA 工作饱和,重点目标出现并轻易突防不利局面的出现.

## 3 分布协同拍卖算法

### 3.1 目标到 WA 的路径选择规则

在基于多 Agent 分布协同拍卖的舰艇编队目标

分配中,目标节点  $j$  将根据以下公式来选择 WA 节点  $i$ :

$$\begin{aligned} T_{sj} &= 1 - w_j [1 - p_s(j)], \\ s &= 1, 2, \dots, n, \\ j &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (2)$$

$$i = \operatorname{argmax}(T_{sj}). \quad (3)$$

式中,  $p_s(j)$  为第  $s$  个 WA 节点毁伤第  $j$  批空中目标的概率;  $T_{sj}$  为 WA 节点  $s$  未被目标节点  $j$  突防的概率.

### 3.2 基于拍卖合同的初始分配

拍卖合同具体的过程是:当新任务(空袭目标)出现时,将任务放在市场上拍卖,所有的 WA 进行竞标.拍卖的任务将由出价最高(目标未被突防的概率最大)的 WA 执行.

在拍卖进行时,对目标拍卖次序的确定方式尤为重要.若按一定规律进行,如从目标 1 开始,按目标排列顺序拍卖到目标  $m$ ,确定出分配方案,往往很难取得最优解.

本文将随机性应用到目标次序确定方式中,当完成一个目标向 WA 的拍卖后,从未分配的目标中随机选取一个目标,按照式(2)和式(3)实现新的目标到 WA 的拍卖<sup>[11]</sup>.基于拍卖合同的初始分配算法步骤可以简述如下:

设置参数,并初始化;

计算 WA 节点  $i(i = 1, 2, \dots, n)$  未被目标节点  $j(j = 1, 2, \dots, m)$  突防的概率;

每个目标初始状态标示为未被分配状态;

初始化火力分配方案,为每个 WA 节点  $i$  寻求未被目标突防概率最大的目标节点  $j$ ;

do

{

从  $m$  个目标节点中随机地选取一个目标节点进行分配;

if(该目标为未被分配状态)

{

寻求未被该目标突防概率最大的 WA 节点;

if(某个 WA 节点的最大未被目标突防概率被重置)

为该 WA 节点重新寻求未被突防概率最大的目标;

```

}
} while( 目标未被分配完毕)

```

### 3.3 基于交换合同的中间协作

针对多平台协同作战目标分配问题的复杂性以及实时性要求,采用交换合同作为拍卖合同的补充,使WA可以通过交换彼此间的任务来提高舰艇编队未被目标突防的概率.当用拍卖合同完成武器目标的初始分配,可以采用交换合同来完成武器目标的进一步分配<sup>[8]</sup>.基于交换合同的中间协作分配算法步骤可以简述如下:

```

设置需要进行交换的次数;
while( 不满足中止条件时)
{
设置参数,并初始化;

```

从 $m$ 个目标节点中随机地选取一个目标节点进行交换,将选取的目标节点赋值给 $z$ ;按照初始的火力分配方案,把对目标节点 $z$ 进行射击的WA节点赋值给 $y$ .

按照初始的火力分配方案,分别计算每一个目标节点 $j$ 与随机选取的目标节点 $z$ 在交换之前与交换之后的未突防概率之和的差值,并找出差值最大的目标节点 $j$ 及对其进行射击的WA节点 $i$ ,即:

令  $T = \max(T_2 - T_1)$ , 其中  $T_1 = T_{yz} + T_{ij}$ ,  $T_2 = T_{yj} + T_{iz}$ ;

$T$ 为WA节点 $i$ 与 $y$ 打击目标交换前后,目标节点 $j$ 与 $z$ 的未突防概率之和的差值中的最大值; $T_1$ 为交换之前目标节点 $j$ 与 $z$ 的未突防概率之和, $T_2$ 为交换之后目标节点 $j$ 与 $z$ 的未突防概率之和.

$T_{yz} = 1 - w_z [1 - p_y(z)]$ , 为交换之前目标节点 $z$ 的未突防概率;

$T_{ij} = 1 - w_j [1 - p_i(j)]$ , 为交换之前目标节点 $j$ 的未突防概率;

$T_{yj} = 1 - w_j [1 - p_y(j)]$ , 为交换之后目标节点 $j$ 的未突防概率;

$T_{iz} = 1 - w_z [1 - p_i(z)]$ , 为交换之后目标节点 $z$ 的未突防概率.

找到差值最大的目标节点 $j$ 及其对应的WA节点 $i$ 之后,将WA节点 $i$ 与WA节点 $y$ 进行打击目标的互换.

计算此次交换之后所有目标的未被突防概率之和,并与之前所有目标的未被突防概率之和进行比较,如果此次未被突防概率之和较之前的未被突防概率之和大,则将此次火力分配方案作为最优火力分配方案输出.

```

}

```

输出编队不被目标突防的最大概率,以及最优的火力分配方案.

### 3.4 特殊情况的分配

如果有新目标到达,则在原火力分配方案的基础上重复基于拍卖合同的初始分配过程;

如果平台被摧毁,则找出分配给该平台的目标节点,把该目标作为新目标在原火力分配方案的基础上重复基于拍卖合同的初始分配过程.

## 4 仿真计算

### 4.1 算例1

假设舰艇编队共拥有6个独立的防空WA节点,各WA节点的通道数均为1,编队同时受到6批目标的攻击,各批目标相对编队的综合威胁值取表1中的前6批目标,防空WA对各批次目标的毁伤概率取表2中的前6批目标.

参数设定为:最大交换次数  $NC_{\max} = 20$ .

通过VC++6.0编程仿真计算,输入各批目标相对WA节点的综合威胁值(取表1中的前6批目标)和防空WA对各批次目标的毁伤概率(取表2中的前6批目标),通过基于拍卖合同的初始分配求得舰艇编队不被目标突防的最大概率为  $P_{\text{未突防}} = 5.559$ ,最后计算出最优火力分配方案,如表3所示.

表1 目标相对各WA节点的综合威胁值

目标	目标1	目标2	目标3	目标4	目标5	目标6	目标7	目标8
威胁值	0.68	0.52	0.79	0.67	0.82	0.78	0.65	0.68
目标	目标9	目标10	目标11	目标12	目标13	目标14	目标15	目标16
威胁值	0.85	0.65	0.78	0.91	0.58	0.64	0.66	0.75

表2 防空 WA 节点对各批次目标的毁伤概率

毁伤概率		目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6	目标 7	目标 8
WA 节点	1	0.68	0.89	0.78	0.85	0.84	0.59	0.81	0.59
	2	0.92	0.69	0.75	0.89	0.87	0.78	0.59	0.68
	3	0.95	0.59	0.78	0.68	0.92	0.84	0.66	0.55
	4	0.84	0.69	0.78	0.68	0.92	0.81	0.56	0.54
	5	0.59	0.75	0.89	0.85	0.84	0.75	0.65	0.55
	6	0.69	0.68	0.75	0.68	0.95	0.72	0.68	0.68
毁伤概率		目标 9	目标 10	目标 11	目标 12	目标 13	目标 14	目标 15	目标 16
WA 节点	1	0.68	0.56	0.74	0.72	0.91	0.78	0.88	0.66
	2	0.75	0.69	0.85	0.55	0.91	0.71	0.83	0.58
	3	0.77	0.88	0.58	0.57	0.59	0.68	0.81	0.65
	4	0.53	0.58	0.68	0.91	0.88	0.65	0.75	0.65
	5	0.66	0.75	0.82	0.69	0.68	0.58	0.66	0.82
	6	0.69	0.57	0.91	0.58	0.67	0.68	0.65	0.58

表3 基于拍卖合同的初始分配方案

分配方案		目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 6
WA 节点	1	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	0
	3	1	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	1
	5	0	0	1	0	0	0
	6	0	0	0	0	1	0

表4 基于拍卖合同的初始分配方案

分配方案		目标															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
WA 节点	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

通过基于交换合同的中间协作后,不难发现,由基于拍卖合同的初始分配获得的火力分配方案已

经是最优解,说明在来袭目标数比较小的情况下,无需再进行 WA 之间的交换拍卖,可依据初始火力

分配方案对来袭目标进行抗击。

## 4.2 算例 2

假设舰艇编队共拥有 6 个独立的防空 WA 节点,各 WA 的通道数均为 3,编队同时受到 16 批目标的攻击,各批目标相对 WA 的综合威胁值见表 1,防空 WA 对各批次目标的毁伤概率见表 2。

通过 VC++6.0 编程仿真计算,输入各批目标相对 WA 的综合威胁值(见表 1)和防空 WA 节点对各批次目标的毁伤概率(见表 2),所取参数不变,通过基于拍卖合同的初始分配求得舰艇编队不被目标突防的最大概率为  $P_{未突防} = 14.1513$ ,最后计算出最优火力分配方案,如表 4 所示。

通过基于交换合同的中间协作后,当交换一次时,例如 WA 节点 2 与 WA 节点 5 交换打击目标,舰艇编队不被目标突防的最大概率变为  $P_{未突防} = 14.190301$ ;当交换两次时,即在一次交换的基础上,WA 节点 5 与 WA 节点 14 交换打击目标,舰艇编队不被目标突防的最大概率变为  $P_{未突防} = 14.248301$ ;当交换次数超过两次时,舰艇编队不被目标突防的最大概率不再发生变化,说明此时的火力分配方案已经达到了最优。

## 5 结 论

本文建立了舰艇编队协同目标分配问题的数学模型,利用合同机制中的拍卖合同和交换合同对任务进行分布式分配。由于基于多 Agent 分布协同拍卖的舰艇编队目标分配采取逐个分配目标的方式,各 WA 在计算当前分配目标时可以很好地考虑以前分配方案的影响,因此其总体分配方案的质量比同时对所有目标进行分配的方案要好。当出现新目标

或是平台有损失时,它可以直接在以前分配的基础上进行基于合同机制的再分配,避免了全局分配方案的重新计算,系统鲁棒性较强。

## [参 考 文 献]

- [1] 余舟毅,陈宗基,周锐. 基于遗传算法的动态资源调度问题研究[J]. 控制与决策,2004,19(11).
- [2] Lee Z J, Su S F, Lee C Y. Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics[J]. IEEE Transactions on Systems(Man and Cybernetics-Part B), 2003, 33(1).
- [3] 黄树采,李为民. 目标分配问题的蚁群算法研究[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(1).
- [4] 段海滨,王道波. 蚁群算法的全局收敛性研究及改进[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(10).
- [5] 陈晓梅. 蚁群算法的原理及其改进[J]. 广东技术师范学院学报,2006,4(4).
- [6] 石纯一,张伟,基于 Agent 的计算[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [7] 李伟,康晓予,赵晓哲. 基于多智能体的舰艇防空目标分配模型设计[J]. 军事运筹与系统工程,2005,19(3).
- [8] 陈华东,王航宇,王树宗,等. 基于合同机制的协同作战分布式目标分配研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(16).
- [9] 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(2).
- [10] 王艳霞,钱龙军,郭治. 满足期望毁伤概率的防空武器目标分配[J]. 电光与控制,2008,15(8).
- [11] 陈中起,张斌,任波. 随机优化蚁群算法在空战决策中的应用[J]. 电光与控制,2008,15(6).

(上接第 55 页)

- [4] 朱永根,等. 导弹武器系统全寿命 R&M 管理工程[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [5] 武文军,等. 战术导弹武器装备退役的模糊聚类分析[J]. 战术导弹技术,2005,4(4).
- [6] 蒋丹. 设备更新决策的模糊评价[J]. 设备管理维修,1994,(3).
- [7] 李宏模,等. 防空导弹武器系统分析[J]. 陕西:空军导弹学报,1998,4(5).