

基于混合机制的防空反导一体化目标分配方法

高嘉乐, 王刚, 姚小强, 郭相科

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 分析了现有的目标分配机制,并对防空反导任务中目标分配的机制的适宜性进行讨论。根据弹道目标反应时间短、攻击意图明确等特点,选择分布式机制作为协调机制并用拍卖算法进行建模;根据气动目标反应时间相对较长、不确定性因素较多等特点,选择集中统筹的机制并用改进遗传算法进行建模分析。最后将两种机制有效结合,应用到防空反导一体化作战中,构建了混编作战动态目标分配的混合协调机制。通过算例分析,结果表明混合机制可以有效应对弹道目标和气动目标的多重联合打击,在攻击达到饱和时,该方法具有一定的抗饱和攻击能力。

关键词 防空反导;协调机制;目标分配;一体化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.006

中图分类号 TJ768 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0024-05

Target Assignment of Integration in Air and Missile Defense Based on Mixed Mechanism

GAO Jiale, WANG Gang, YAO Xiaoqiang, GUO Xiangke

(School of Air and Missile Defence, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: At the basis of analyzing the target assignment mechanism, the discussion about the suitability of target assignment in the task of air and missile defense is given. Because the ballistic missile targets have clear goals and need short response time, a distributed mechanism is adopted and analyzed through modeling with market bidding algorithm; while the aerodynamic targets have more uncertain factors and need longer response time, a centralized mechanism is chosen and analyzed through modeling with improved genetic algorithm. Combining two mechanisms finally, the mixed mechanism of dynamical target assignment is presented for the task of air and missile defense. A simulation example is demonstrated, and the result shows that the mixed coordinate mechanism could deal with large numbers of ballistic missile targets and aerodynamic targets. The mechanism also could deal in some ways, when saturation attacks coming.

Key words: air and missile defense; coordinate mechanism; target assignment; integration

现代空防对抗是体系与体系之间的对抗,具有网络化的资源配置、一体化的火力打击、无缝连接的协同作战等特点,要求防空体系中指控系统与武器系统进行深度交链、各子系统之间的相互协调一致,

这样才能构建防空反导一体化作战体系,适应未来复杂、涌现性多、不确定性高的战场环境。防空体系中的交链深度高低和协调性的好坏很大程度上反映在防空作战中目标分配这一环节。但是由于防空反

收稿日期: 2015-01-26

作者简介: 高嘉乐(1990—),男,辽宁鞍山人,硕士生,主要从事防空反导智能信息处理技术研究。E-mail: gaojiale_kgd@163.com

引用格式: 高嘉乐,王刚,姚小强,等. 基于混合机制的防空反导一体化目标分配方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):24-28.
GAO Jiale, WANG Gang, YAO Xiaoqiang, et al. Target Assignment of Integration in Air and Missile Defense Based on Mixed Mechanism [J].
Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 24-28.

导武器系统的类型多样化、多种威胁目标特性差异大等原因,导致目标分配方法没有统一的标准。在通过多武器系统混编组网构建防空反导一体化作战体系时,针对类型多样、数量饱和的威胁目标的目标分配,指控系统难以在差异中求得最佳或满意解,最终防空体系难以形成战斗力。

基于上述原因,顺应未来防空反导一体化作战发展的趋势,针对威胁目标类型多、攻击饱和化等问题,本文针对不同威胁目标采用不同方法,并提出了基于混合机制动态目标分配,并将改进的启发式遗传算法和改进的拍卖算法应用到防空反导作战动态目标分配的混合机制中,提高了目标分配的合理性、时效性、动态性,对于构建防空反导一体化作战体系具有借鉴意义。

1 基于混合机制的目标优化分配机制分析

1.1 混合机制设计

目前,由于防空反导武器系统种类繁多,目标分配方法也是多种多样,但从机制角度进行分类,总体上可分为分布式和集中式 2 种类型。

从目标分配机制对于威胁目标的适宜性分析,分布式的目标分配机制具有生存性强、协调性强、计算精度高等优势,但是对通信的依赖性高,对于拥有反应时间短、威胁度和拦截难度高等特点的弹道目标的目标分配具有较好效果^[1-2];集中式的目标分配机制具有良好的统筹能力,但是计算精度相对较低,对于具有攻击样式多变、威胁意图模糊、反应时间相对较长等特点的气动目标的目标分配具有比较好的效果^[3-4]。

从目标分配机制对武器系统协调能力的角度分

析,集中式的目标分配中,指控系统拥有很大的控制权限,在防空反导作战中可以统一协调下属火力单元行动,但是在很大程度上限制各火力单元的自主性;分布式的目标分配在使各火力单元拥有相对较高的自主性同时,火力单元的自私性也体现出来,由于缺乏统一的协调,目标分配结果容易出现局部最优、火力单元之间协调不一致等现象^[5-6]。

虽然 2 种机制各有千秋,但是目前对于防空反导武器系统的目标分配机制的选择没有明确的统一的答案。

通过以上对目标分配机制分析,结合防空反导作战任务特点提出了以集中式的改进遗传算法统筹协调为主、分布式拍卖算法处理弹道目标分配的混合机制。图 1 和图 2 分别表示了基于混合机制的防空反导作战时的信息交互和目标分配流程。混合机制设计共分 3 个部分,分别为弹道目标分配机制、气动目标分配机制、冲突协调机制。

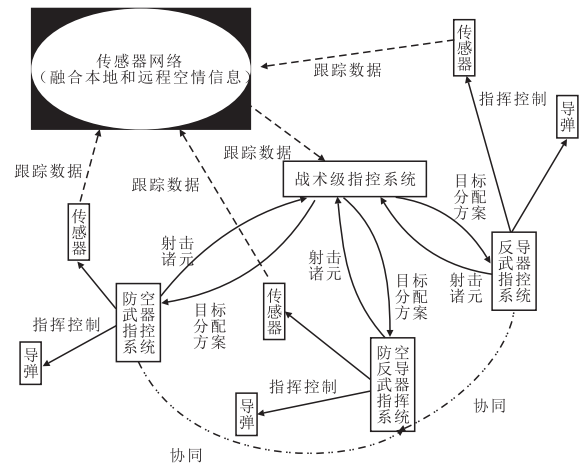


图 1 区域防空反导协调信息交互

Fig.1 The information interaction of regional air and missile defense

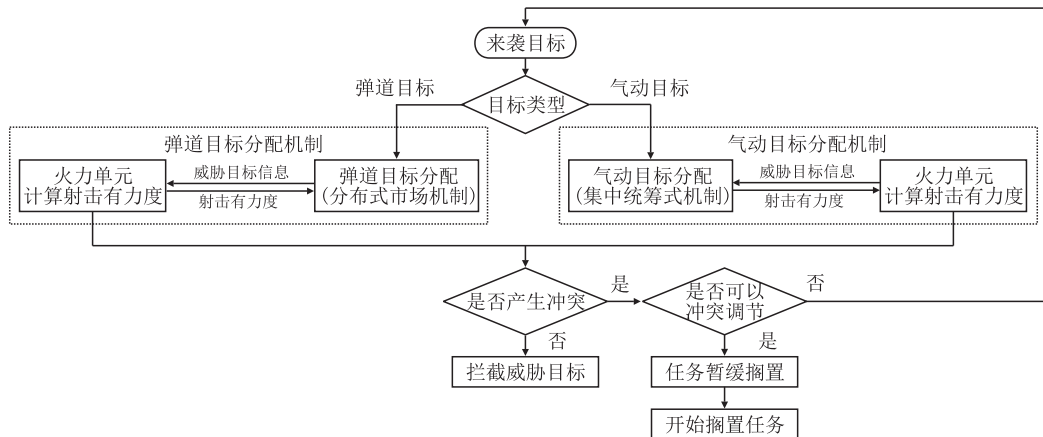


图 2 区域防空反导混合机制流程

Fig.1 The flow chart of regional air and missile defense based on mixed mechanism

战术级指控系统对来袭的威胁目标进行威胁估计,然后按火力单元主要防御方向粗略分配,由火力单元计算对威胁目标的射击诸元形成射击有力度,再上传至战术级指控系统,战术级指控系统依据射击有力度对威胁目标进行分配。混合机制设计原则如下:

1) 战术级指控系统对威胁目标的分配以集中式统筹为主,对弹道目标采用分布式拍卖算法进行目标分配;

2) 除上级指定目标外,一般情况下弹道目标威胁度高于气动目标,因此弹道目标分配时不考虑已分配气动目标所占用的火力通道,当发生冲突时,火力单元自行调解或上报冲突;

3) 目标被分配和拦截授权之后,拦截导弹未发射之前,如有需要,任何目标分配及相应的拦截授权都可被取消;

4) 构建目标分配截止时间队列,此队列实时进行更新,依据队列判断威胁目标是否必须被分配,不再需要对此目标的分配方案优化。

5) 火力单元具有一定的自主权限,此权限不仅包括火力单元对威胁目标拦截时机的判定,还包括是否参与弹道目标分配和自行调解分配冲突目标的权限。

基于上述原则,本文对弹道目标和气动目标分别应用拍卖算法和改进遗传算法设计目标分配机制。目标分配的信息交互流程图见图 3、图 4,图中(1)~(5)编号分别对应混合机制设计原则。

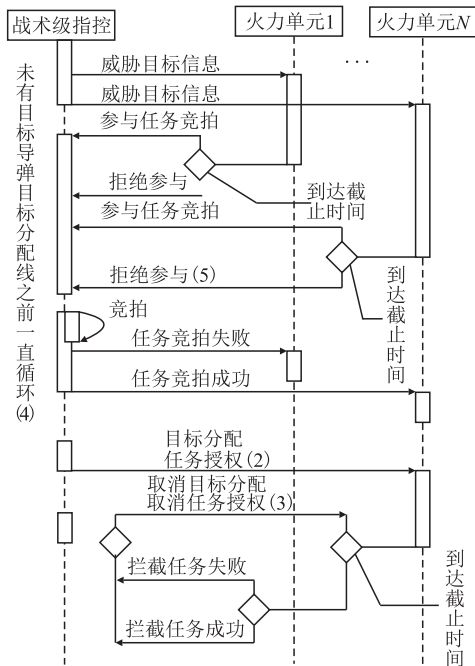


图 3 弹道目标分配信息交互流程图
Fig.3 The informative intevation flow chart of missile target assignment

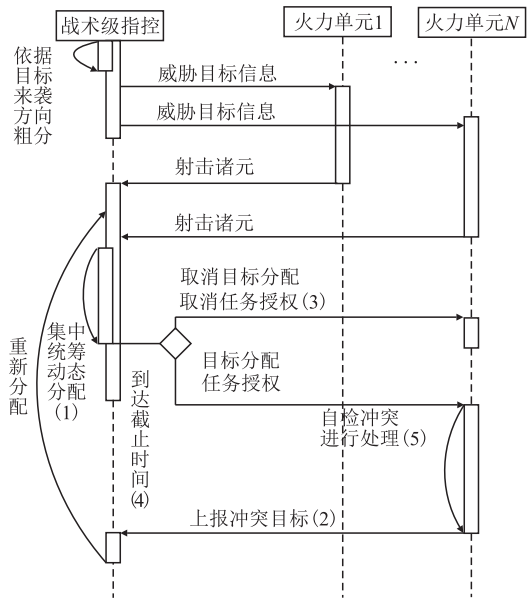


图 4 气动目标分配信息交互流程图
Fig.4 The information flow chart of anrodynamic target assignment

1.2 资源冲突协调

假定弹道目标威胁始终大于气动目标威胁。因此,在弹道目标和气动目标同时被分配给一个火力单元,且此火力单元仅剩一个空闲火力通道;或此火力单元火力通道全被占用,但仍有一个弹道目标被分配过来时,产生资源冲突。此时,由此火力单元进行计算弹道目标拦截时间 T_d 和气动目标拦截时间 T_q , 以及弹道目标到最晚拦截点时刻 $T_{d_{at}}$ 、气动目标到最晚拦截点时刻 $T_{q_{at}}$, 假设当前时刻为 T_0 。则拦截弹道目标剩余时间为 $T_{d_{at}} - T_0$, 拦截气动目标剩余时间为 $T_{q_{at}} - T_0$ 。冲突协调过程为:

Step1 计算 T_d 、 T_q 、 $T_{d_{at}}$ 、 $T_{q_{at}}$

If $T_{q_{at}} \geq T_{d_{at}}$

跳转 **Step2**。

Else 跳转 **Step3**。

Step2 If $T_{d_{at}} - T_0 > T_q$

搁置气动目标拦截,优先拦截弹道目标,使用此火力通道延后拦截气动目标。

Else 上报威胁度低的威胁目标。

Step3 If $T_{q_{at}} - T_0 > T_d$

搁置弹道目标拦截,优先拦截气动目标,使用此火力通道延后拦截弹道目标。

Else 上报威胁度低的威胁目标。

2 混合机制目标分配模型和算法改进

2.1 数学模型描述

基于上述目标分配混合机制,本文设计如下数

学模型。假定来袭威胁目标为 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, 其中 $T_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 批威胁目标。火力单元为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 其中 $U_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 。假设火力单元 U_j 对目标 T_i 的射击有力度为 P_{ij} , 第 i 批目标的威胁度为 Th_i 。

目标函数如下:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^N \{Th_i \times \{1 - \prod_j^M (1 - P_{ij}(T_i))^{x_{ij}}\}\} \\ \text{s.t. } x_{ij} \in G \end{cases}$$

则目标收益为:

$$Y = \max \sum_{i=1}^N \{Th_i \times \{1 - \prod_j^M (1 - P_{ij}(T_i))^{x_{ij}}\}\}$$

其中, G 为约束集, 每个火力单元不能被分配超过自身火力通道数量的威胁目标。若分配超过限制, 则由火力单元自行进行资源调解, 若无法调解则上报战术级指控系统。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 火力单元拦截第 } j \text{ 批目标} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 火力单元不拦截第 } j \text{ 批目标} \end{cases}$$

2.2 算法改进

对于拍卖算法的改进, 借鉴文献[8]对目标分配截止时间的定义, 构建弹道目标分配截止时间队列, 若有目标分配截止时刻到来, 则该目标分配方案是算法迭代生成的整体最优方案中的该目标分配方案。由于单次拍卖不能保证目标分配结果最优, 因此, 竞拍火力单元每次竞拍循环前生成伪随机队列, 依据队列顺序进行多次竞拍。每次竞拍与前次结果比较, 若目标收益增加, 则替换前一方案, 否则再次循环。

对于遗传算法的改进, 借鉴文献[7]动态目标分配的思想, 对于单个目标到达目标分配终线, 则该目标依据整体最优方案被分配。此时火力通道被占用直至目标拦截结束。针对快速收敛问题, 本文选用贪婪算法优化初始种群, 为避免陷入局部最优, 采用变化的变异概率, 使种群在陷入局部最优时, 变异概率呈指数级增加。

3 仿真分析

空中有 12 批气动目标, 编号为 $t_1 \sim t_{12}$, 5 批弹道目标, 编号为 $t_{13} \sim t_{17}$, 分别从 3 个方向来袭。需要将这 17 批目标分配给 6 个火力单元, 这 6 个火力单元由于武器系统性能不同, 自身作战能力不同。火力单元 1 只能进行反导作战, 火力单元 2 只能进行防空作战, 火力单元 3 至火力单元 6 可进行防空反导作战。火力单元 1 有 4 个火力通道, 其余火力单元则有 3 个火力通道。假设每个目标的威胁度是

恒定的, 即威胁目标不会在空中改变攻击意图, 则每个火力单元对威胁目标的射击有力度不变。表 1 给出每个威胁目标的威胁度和每个火力单元对每批目标的射击有力度。

表 1 威胁目标威胁度和火力单元射击有力度

Tab.1 The threatening degree of threatening targets and the shooting probability of fire units

威胁目标	威胁度	火力单元射击有力度					
		1	2	3	4	5	6
1	0.55	0.00	0.25	0.88	0.76	0.25	0.00
2	0.56	0.00	0.36	0.80	0.80	0.31	0.00
3	0.45	0.00	0.21	0.78	0.85	0.29	0.00
4	0.34	0.00	0.33	0.79	0.83	0.17	0.00
5	0.52	0.00	0.70	0.64	0.87	0.12	0.45
6	0.48	0.00	0.58	0.66	0.82	0.76	0.48
7	0.59	0.00	0.61	0.56	0.78	0.72	0.53
8	0.41	0.00	0.67	0.54	0.79	0.80	0.47
9	0.33	0.00	0.00	0.21	0.67	0.81	0.89
10	0.45	0.00	0.00	0.17	0.44	0.88	0.78
11	0.35	0.00	0.00	0.13	0.54	0.86	0.82
12	0.49	0.00	0.00	0.10	0.43	0.80	0.79
13	0.78	0.90	0.00	0.49	0.58	0.20	0.21
14	0.80	0.85	0.00	0.45	0.54	0.14	0.35
15	0.82	0.85	0.00	0.36	0.64	0.38	0.29
16	0.73	0.89	0.00	0.21	0.33	0.60	0.55
17	0.89	0.86	0.00	0.22	0.32	0.61	0.59

每一个仿真时间为目标分配一个周期。初始设定威胁目标 $t_1 \sim t_4$ 和 $t_9 \sim t_{17}$ 在仿真时间为 5 s 时来袭, 在仿真时间为 50 s, 威胁目标 $t_5 \sim t_8$ 来袭, 在仿真时间 40、90、95 s 分别有多批目标到达分配终线, 具体动态分配过程见表 2。

表 2 基于混合机制的动态分配过程

Tab.2 The dynamic target assignment procedure based on mixed mechanism

仿真时间/s	威胁目标	分配火力单元	目标分配收益
5	$t_1 \sim t_4, t_9 \sim t_{17}$ 来袭		
	t_2 到目标分配终线	3	
40	t_3 到目标分配终线	4	6.47
	t_9 到目标分配终线	6	
50	t_5, t_6, t_7, t_8 来袭		
	t_1 到目标分配终线	3	
	t_4 到目标分配终线	3	
	t_6 到目标分配终线	4	7.74
90	t_8 到目标分配终线	5	
	t_{17} 到目标分配终线	1	
	t_5 到目标分配终线	4	
	t_7 到目标分配终线	4	
	t_{13} 到目标分配终线	4	13.97
	t_{14} 到目标分配终线	1	
95	t_{15} 到目标分配终线	1	
	t_{16} 到目标分配终线	1	

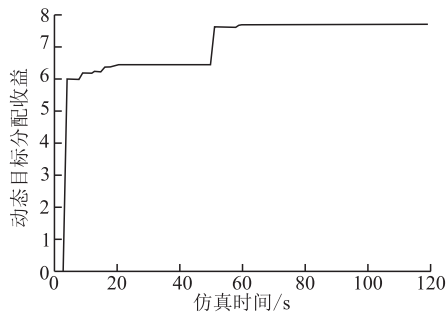


图5 基于混合机制的动态目标分配收益

Fig.5 The dynamic target assignment efficiency based on mixed mechanism

表3 最终分配结果

Tab.3 Final assignment

威胁目标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
被分配火力单元	3	3	4	3	3	4	4	5	6	5	5	5	4	1	1	1	1

4 结语

动态目标分配是防空反导一体化作战战术级指控系统关键技术之一,本文针对威胁目标类型及特点的不同,设计了混合协调机制。混合协调机制选用集中式统筹作为主要协调方式,选择分布式市场机制进行弹道目标分配,对不同机制组合带来的资源冲突问题,设计了冲突调解机制。通过算例仿真分析,混合机制对于多方向、多批次、多类型威胁的空袭威胁目标具有很好的协调能力和动态性能,能够有效应对饱和攻击。

参考文献(References):

- [1] 唐苏妍,梅珊,朱一凡,等. 基于扩展合同网协议的分布式武器目标分配方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(3): 568-574.
TANG Suyan, MEI Shan, ZHU Yifan, et al. Distributed Weapon Target Assignment Algorithm Based on Extended Contract Net Protocol[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(3): 568-574. (in Chinese)
- [2] Yong B W. Future Integrated Fire Control[C]//Proceeding of International Command and Control Research and Technology Symposium. 2005: 1-21.
- [3] 丁铸. 基于群智能的区域防空作战指挥决策研究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2006.
DING Zhu. Research on the Region Air-defense Campaign Command Decision Based on Swarm Intelligence[D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] 刘传波, 邱志明, 吴玲, 等. 动态武器目标分配问题研究现状与展望[J]. 电光与控制, 2010, 11(17): 43-48.
LIU Chuanbo, QIU Zhiming, WU Ling, et al. Review on

表2与图5相对应,在仿真时间5s和50s,由于大批威胁目标的到来,目标分配收益快速上升,通过算法的优化,目标分配方案快速收敛趋于稳定。在仿真时间95s时,威胁目标 t_{13} 因为火力单元1的火力通道限制,所以目标被分配给火力单元4,火力单元4产生资源冲突,由于资源冲突可调节,虽然火力单元4火力通道饱和,但目标 t_7 仍被分配给火力单元4。最终分配结果见表3。

Current Status and Prospect of Researches on Dynamic Weapon Target Assignment[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 11(17): 43-48. (in Chinese)

- [5] 唐贤伦. 群体智能与多 Agent 交叉结合[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
TANG Xianlun. Swarm Intelligence Cross-link with Multi-Agent System[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [6] Tan M. Multi-agent Reinforcement Learning: Independent vs Cooperative Agents[C]//Proceeding of the 10th international Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1993: 330-337.
- [7] 黎子芬, 李相民, 陈金柱, 等. 分布式协同拍卖算法的动态联合火力分配方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 11(37): 49-52.
LI Zifen, LI Xiangmin, CHEN Jinzhu, et al. Dynamic Joint Fire Distribution Method Based on Decentralized Cooperative Auction Algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 11(37): 49-52. (in Chinese)
- [8] Xu Kehu, Huang Dashan, Wang Tianzhao. The Application of Improved Genetic Algorithm on Weapon-Target Assignment[C]// 2012 4th Inf on Intelligent Human-Machine System and Cybernetics. 2012: 311-313.
- [9] LI Xiaoquan, ZHAN Haiyang, YOU Kai, et al. Fire Assignment Optimization of Network-centric Artillery Combat Based on Genetic Algorithm[C]//Proceeding of 2011 International Conference of Information Technology, Computer Engineer and Management Science. 2011: 290-293.
- [10] 王幸运, 田野, 强晓明, 等. 基于协同效能的反导作战任务分配模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(4): 27-31.
WANG Xingyun, TIAN Ye, QIANG Xiaoming, et al. Mission Assignment Model for Anti-missile Combat Based on Cooperative Efficiency[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(4): 27-31. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)