

# 采用自适应概率粒子群算法的反导预警资源调度方法

任俊亮<sup>1</sup>, 邢清华<sup>1</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 贾 哲<sup>3</sup>

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;

2.空军工程大学训练部,陕西西安,710051;3.空军指挥学院,北京海淀,100097)

**摘要** 根据反导预警资源的实际特点,采用多 Agent 技术研究反导预警调度问题。设计资源管理 Agent 和预警资源 Agent,给出卫星与雷达探测目标的适宜度计算方法,以方案适宜度最大化为目标生成调度方案。为提高调度方案的时效性设计一种基于自适应概率的粒子群算法,算法中粒子的每一维分量根据方案适宜度以不同概率取值,反映粒子的思考过程。实例分析表明,该算法与现有的预警资源调度算法相比,能较快地收敛到一个较优值,使调度方案满足反导预警作战实时高效的要求。

**关键词** 反导;预警;自适应;粒子群

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.010

**中图分类号** TP391.1 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0045-04

## Resource Scheduling Method of Missile Defense Early Warning System Based on Self-Adaptive Probability Particle Swarm Optimization

REN Jun-liang<sup>1</sup>, XING Qing-hua<sup>1</sup>, Li Qiang<sup>2</sup>, JIA Zhe<sup>3</sup>

(1.College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an, 710051, China;

2.Training department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

3.Air Force Command College, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Based on the practical characteristics of the resources for missile defense early warning system, the multi-agent technology is used to study the problem of how to schedule resource of missile defense early warning system. And two agents which are resource management agent and resource agent are designed. Then, a method of fit value computation of a scheme is given, and the optimization scheme has the maximum fit value. For reducing the time of creating scheme, an improved particle swarm optimization algorithm—self adaptive probability particle swarm optimization (SAPPSO) algorithm is designed, in this algorithm, every element in a particle will be changed by the probability which decided by the fit value of scheduling scheme, this course shows how the particles think. By analyzing a real case, and through a contrast with other methods, the result shows that the SAPPSO algorithm can quickly focus on a better value, which can make the scheme meet the operational requirements.

**Key words:** missile defense; early warning; self-adaptive; particle swarm optimization

**收稿日期:** 2014-04-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61272011)

**作者简介:** 任俊亮(1985—),男,山西洪洞人,博士生,主要从事反导预警资源的优化配置与调度研究.E-mail: rjl19850106@sina.com

**引用格式:** 任俊亮,邢清华,李强,等.采用自适应概率粒子群算法的反导预警资源调度方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):45-48. REN Junliang, XING Qinghua, Li Qiang, et al. Resource scheduling method of missile defense early warning system based on self-adaptive probability particle swarm optimization[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(6): 45-48.

反导预警资源调度是反导预警作战的一个核心问题,调度方案的合理性与实时性对反导作战的成败具有重要影响。目前关于反导预警资源调度问题研究的文献,大多数是针对反导预警卫星的调度问题<sup>[1-4]</sup>,且偏重对算法的设计。由于未来一段时间内部署完整天基预警系统的可能性不大,模型应用范围受限。因此,本文针对未来反导预警将主要采用天基与地基预警资源相结合的模式,设计2类 Agent(预警资源 Agent 和资源管理 Agent)来研究预警资源调度问题。预警资源 Agent 主要是计算资源探测各目标的适宜度,资源管理 Agent 主要是根据资源探测目标的适宜度计算最佳调度方案。为提高调度方案的时效性设计基于自适应概率的粒子群(Self-Adaptive Probability Particle Swarm Optimization, SAPPSSO)算法求解调度方案。

## 1 资源探测目标的适宜度

资源探测目标的适宜度主要用来衡量资源探测目标的匹配程度。主要考虑以下几个方面:

1)能力匹配因子  $F_1$ 。根据资源能否满足探测任务的需求能力,匹配因子取值为“1”或“0”,表达式为:

$$F_1 = \begin{cases} 1, & \text{满足} \\ 0, & \text{不满足} \end{cases} \quad (1)$$

2)可视时间区间长度因子  $F_2$ 。可视时间区间长度因子为资源对目标后续探测时间与资源探测目标最长时间的比值,其计算式为:

$$F_2 = (\text{time}_e^{ij} - t) / \max\{\text{time}_e^{ij} - t\} \quad (2)$$

式中:  $\text{time}_e^{ij}$  为资源  $R_i$  对目标  $T_j$  可视时间结束时刻;  $t$  为当前时刻;  $\max\{\text{time}_e^{ij} - t\}$  为所有资源对目标  $T_j$  的最长后续可探测时间。

3)距离因子  $F_3$ 。当资源与目标间的距离较近时,可以获得更好的探测效果<sup>[5]</sup>。距离因子的计算式为:

$$\begin{cases} F_3 = 1 - (|d_{ij}| / \max\{|d_{ij}|\}) \\ d_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $|d_{ij}|$  为目标  $T_j$  与资源  $R_i$  间的距离;  $\max\{|d_{ij}|\}$  为目标  $T_j$  与所有资源距离中的最大值;  $\mathbf{r}_i$  为资源  $R_i$  当前位置向量;  $\mathbf{r}_j$  为目标  $T_j$  当前位置向量。

4)能量剩余因子  $F_4$ 。资源能量剩余的多少影响其后续探测目标的能力。能量剩余因子为:

$$F_4 = e_r^{ij} / \max\{e_r^{ij}\} \quad (4)$$

式中:  $e_r^{ij}$  为资源  $R_i$  探测目标  $T_j$  后剩余的能量;  $\max\{e_r^{ij}\}$  为所有资源探测目标  $T_j$  后剩余能量的最大值。

5)视线角度因子  $F_5$ 。在地基雷达对目标的识别过程中,雷达视线与目标之间的夹角是影响识别效果的一个重要因素<sup>[6]</sup>。视线角度因子:

$$\begin{cases} F_5 = 1 - (A + B) / \max\{A + B\} \\ A = |a_o - \arccos[(\mathbf{r}_i^{t_s^{ij}} \cdot \mathbf{v}_i^{t_s^{ij}}) / (|\mathbf{r}_i^{t_s^{ij}}| \cdot |\mathbf{v}_i^{t_s^{ij}}|)]| \\ B = |a_o - \arccos[(\mathbf{r}_i^{t_e^{ij}} \cdot \mathbf{v}_i^{t_e^{ij}}) / (|\mathbf{r}_i^{t_e^{ij}}| \cdot |\mathbf{v}_i^{t_e^{ij}}|)]| \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $a_o$  为资源探测目标的最佳角度;  $\mathbf{r}_i^{t_s^{ij}}$  为  $t_s^{ij}$  时刻从资源  $R_i$  到目标  $T_j$  的向量;  $t_s^{ij}$  为调度区间的开始时刻;  $\mathbf{v}_i^{t_s^{ij}}$  为  $t_s^{ij}$  时刻目标  $T_j$  的速度;  $\mathbf{r}_i^{t_e^{ij}}$  为  $t_e^{ij}$  时刻从资源  $R_i$  到目标  $T_j$  的向量;  $t_e^{ij}$  为调度区间的结束时刻;  $\mathbf{v}_i^{t_e^{ij}}$  为  $t_e^{ij}$  时刻目标  $T_j$  的速度。

6)资源切换因子  $F_6$ 。资源切换过程中需要消耗时间,影响资源探测目标的效果。资源切换因子的计算式为:

$$F_6 = 1 - t_{j_1 \rightarrow j_2}^i / \max\{t_{j_1 \rightarrow j_2}^i\} \quad (6)$$

式中:  $t_{j_1 \rightarrow j_2}^i$  为资源  $R_i$  从当前探测目标  $T_{j_1}$  转移到探测目标  $T_{j_2}$  所需要的时间;  $\max\{t_{j_1 \rightarrow j_2}^i\}$  为所有资源转移到探测目标  $T_{j_2}$  所需时间中的最大值。

上述因子中  $F_1$  为决定性因子,  $F_2 \sim F_6$  越大越有利于目标探测。卫星资源的目标探测适宜度主要考虑 1)~4)、6),其匹配适宜度计算式为:

$$f_{ij} = F_1 \sum_{k \in K} F_k, K = \{1, 2, 3, 4, 6\} \quad (7)$$

雷达资源的目标探测适宜度主要考虑 1)~3)、5)、6),其匹配适宜度计算式为:

$$f_{ij} = F_1 \sum_{q \in Q} F_q, Q = \{1, 2, 3, 5, 6\} \quad (8)$$

资源探测各目标的适宜度向量为  $\mathbf{f}_i = [f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}]$ 。

## 2 适宜度矩阵与调度求解算法

### 2.1 适宜度矩阵

当资源管理 Agent 接收到资源 Agent 返回的资源探测目标适宜度信息后,将其合并为一个适宜度矩阵:

$$\mathbf{F}_{IJ} = \begin{Bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & \cdots & f_{mn} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$\mathbf{F}$  由所有资源探测目标的  $\mathbf{f}_i$  组成,  $\mathbf{f}_i$  对应  $\mathbf{F}$  的第  $i$  行向量。

### 2.2 基于自适应概率的离散粒子群求解算法

粒子群算法以其简单,易于实现,在许多领域取得很大的成就<sup>[7-10]</sup>,但解决反导预警资源调度方案生成问题时需作一定的改进。

1)对粒子编码与初始化。令粒子的每一维分量分别表示对应目标选择的资源,第  $k$  代粒子值为:

$$\mathbf{X}^k = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_j^k, \dots, x_n^k\} \quad (10)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $x_j^k$  为目标  $T_j$  选择的资源编号,  $x_j^k$  的取值范围由  $\mathbf{F}$  中第  $j$  列非 0 元素的行序号组成;随机生成粒子,若粒子中元素无重复,则可认为一个初始粒子;  $n$  表示目标数量。

2)粒子更新。 $\mathbf{X}^{k+1}$  的分量  $x_j^{k+1}$  根据概率取值:

$$x_j^{k+1} = \begin{cases} x_j^k, & r \in [0, S_1) \\ b_j^k, & r \in [S_1, S_2) \\ g_j^k, & r \in [S_2, S_3) \\ \text{其它 } x_j^k, & r \in [S_3, S_4] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $r$  为 0 到 1 间的随机数;  $b_j^k$  为局部极值对应粒子  $\mathbf{X}_i^k$  的第  $j$  维分量;  $g_j^k$  为全局极值对应粒子  $\mathbf{X}_g^k$  的第  $j$  维分量;当  $x_j^{k+1}$  选择其他  $x_j^k$  时,  $x_j^{k+1}$  在其为可选值中等概率选择一个值;  $S_1 \sim S_4$  的值分别为:

$$\begin{cases} S_1 = P_1 \\ S_2 = P_1 + P_2 \\ S_3 = P_1 + P_2 + P_3 \\ S_4 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_1 \sim P_4$  分别为  $x_j^{k+1}$  取  $x_j^k$ 、 $b_j^k$ 、 $g_j^k$  和  $x_j^k$  其他可选值时的概率,  $P_4$  随迭代次数线性递减,可使算法初期具较好的搜索能力,后期能够逐渐收敛,其计算式为:

$$P_4 = 1 - kp/N_i \quad (13)$$

式中:  $N_i$  为设定的总迭代次数,  $N_i$  根据调度时的最大允许计算时间确定,  $N_i$  越大,需要的计算时间越多;  $p \in (0, 1)$ ,  $p$  使得计算后期粒子仍具有跳出的能力,  $p$  值越大,粒子在后期跳出的能力越强,其值可根据需要的跳出能力强弱来确定;  $P_1 \sim P_3$  由粒子  $X$  的适宜度  $F_X$  决定。它们的计算公式为:

$$\begin{cases} P_1 = (1 - P_4) F_{X_b} / (F_{X_b} + F_{X_g} + F_{X_k}) \\ P_2 = (1 - P_4) F_{X_b} / (F_{X_b} + F_{X_g} + F_{X_k}) \\ P_3 = (1 - P_4) F_{X_g} / (F_{X_b} + F_{X_g} + F_{X_k}) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $F_X$  为目标选择  $f_{ij}$  的线性:

$$F_X = \sum_{j=1, i=x_j}^{j=n} f_{ij} \quad (15)$$

为避免新产生的粒子中有重复元素,前一维粒子选择的资源编号,在后面的粒子分量可选值中将被剔除。

3)终止条件。为保证调度方案的实时性,给出最大迭代次数。当迭代次数达到最大时计算终止,输出结果。

### 3 仿真分析

假设有 6 枚弹道导弹从不同方向打击同一地点 A, 预警资源主要有 4 颗低轨预警卫星和 4 部地基雷达,每部雷达可同时跟踪 4 批目标,弹道与资源部署位置见图 1。



图 1 弹道与资源部署位置

Fig. 1 Trajectories and sites of resources

根据文献[3]中的任务分解方法对反导预警任务进行分解,计算在 12:15:00 至 12:20:00 目标适宜度矩阵,设定 SAPPSSO 算法的初始粒子为 50 个,  $N_i = 400$ ,  $p = 0.3$ ,计算得到方案: {6, 11, 17, 12, 13, 1}。针对同一适宜度矩阵,分别采用 SAPPSSO 算法、GOBPSO 算法<sup>[4]</sup>和 PSO 算法<sup>[7]</sup>运算 50 次,将每次迭代的结果求平均值,3 种算法的结果和耗时情况,见图 2 和表 1。

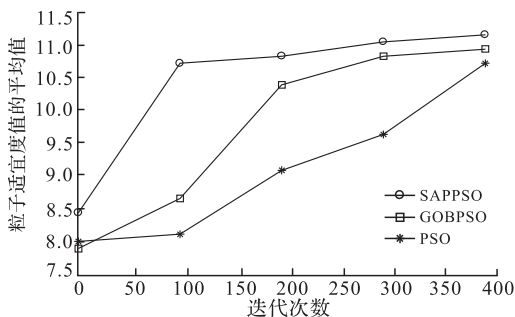


图 2 SAPPSSO、GOBPSO 与 PSO 算法结果对比

Fig. 2 Results of SAPPSSO, GOBPSO and PSO algorithm

表 1 3 种算法 50 次运算的耗时

Tab. 1 Spend time of SAPPSSO, GOBPSO and PSO algorithm after running 50 times

算法	最大耗时	最小耗时	平均耗时
PSO	16.035 2	7.326 5	11.257 6
GOBPSO	10.451 2	6.648 9	8.054 6
SAPPSSO	6.321 6	3.526 9	4.780 7

图 2 与表 1 说明,与 GOBPSO 算法和 PSO 算法相比,SAPPSSO 算法能够较快地寻找到一个较大

的方案适宜值,原因有2点:一是改进的粒子编码方式避免了不可行方案的计算,节约了时间;二是粒子分量的取值总是倾向于取更优粒子的分量,使得方案适宜值不断增加。另外,当粒子迭代到后期,适宜值仍能增加,说明粒子仍有跳出能力。

## 4 结语

通过以上分析可以发现,采用多 Agent 技术研究反导预警资源的调度问题能提高调度方案实时性与合理性;SAPPSO 算法与其他 2 种算法的对比结果说明,SAPPSO 算法在生成反导预警资源调度方案时具有更快的速度。但算法是基于概率的,其稳定性仍需研究。

### 参考文献(References):

- [1] 姜维,李一军. 天基预警调度的启发式优化方法[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(10):1834-1840.  
JIANG Wei, LI Yijun. Heuristic optimization of resource allocation in space based early-warning system [J]. Systems engineering-theory & practice, 2010, 30(10):1834-1840. (in Chinese)
- [2] 程洪玮,王博,安玮. 一种基于信息决策树的低轨星座传感器调度方法[J]. 电子学报,2010,38(11):2630-2633.  
CHENG Hongwei, WANG Bo, AN Wei. A sensor scheduling method of LEO constellation based on information decision tree[J]. ACTA electronica sinica, 2010, 38(11):2630-2633. (in Chinese)
- [3] 汤绍勋,易先清,罗雪山. 面向预警卫星调度问题的改进粒子群算法[J]. 系统工程,2012,30(1):116-121.  
TANG Shaoxun, YI Xianqing, LUO Xueshan. An improved particle swarm optimization algorithm for early warning satellites scheduling problems[J]. Systems engineering, 2012, 30(1):116-121. (in Chinese)
- [4] 汤绍勋. 天基预警低轨星座星载传感器资源管理与预警探测任务调度问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.  
TANG Shaoxun. Research on satellite sensor resources management and detection tasks scheduling

problem for LEO constellation of space-based early warning system [D]. Changsha: National university of defense technology, 2011. (in Chinese)

- [5] 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)
- [6] 马梁,王雪松,李永祯,等. 雷达部署对进动目标微多普勒频率的可测性分析[J]. 国防科技大学学报,2011,33(2):54-59.  
MA Liang, WANG Xuesong, Li Yongzhen, et al. Influence of radar location on the measurability of micro-doppler detecting for precession target[J]. Journal of national university of defense technology, 2011, 33(2):54-59. (in Chinese)
- [7] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary of the particle swarm algorithm [C]//Proc IEEE international conference on systems, man and cybernetics. Piscataway: IEEE service center, 1997:4101-4109.
- [8] 李龙跃,刘付显,梅颖颖. 末段反 TBM 火力目标匹配优化及 APSO 求解算法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(5):993-999.  
Li Longyue, LIU Fuxian, MEI Yingying. Attractor particle swarm optimization for anti-TBM firepower-target match modeling in terminal phase [J]. Systems engineering and electronics, 2013, 35(5):993-999. (in Chinese)
- [9] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [C]//Proc of the IEEE international conference on neural networks. [S.L.]: IEEE press, 1995:1942-1948.
- [10] Juan Rada Vilela, Mengjie Zhang, Winston Seah. A performance study on synchronicity and neighborhood size in particle swarm optimization [J]. Soft computing a fusion of foundations, methodologies and applications, 2013, 17(6):1019-1030.

(编辑:田新华)