

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.005

空地联合反 TBM 预警的任务分配优化

崔超, 李为民, 王前

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要: 为有效利用预警资源, 对空地联合反 TBM 预警的任务分配问题展开深入研究, 提出任务分配的准则, 建立任务分配的决策模型, 并结合空地联合反 TBM 预警任务的实际, 给出基于任务分解和粒子群算法的求解算法。仿真结果表明, 该优化方法符合反 TBM 预警的实际, 能较好地解决空地联合反 TBM 预警的任务分配问题。

关键词: 空地联合; TBM; 预警; 任务分配; 优化

中图分类号: N945.12; C934 **文献标识码:** A

Optimization of Task Assignment in Anti-TBM Warning by Satellite and Ground Radar

CUI Chao, LI Wei-min, WANG Qian

(College of Missile, Engineering University of PLA Air Force, Sanyuan 713800, China)

Abstract: In order to utilizing the warning resources effectively, deeply analyzes the task assignment of anti-Tactical Ballistic Missile (TBM) warning by satellite and ground radar. The assigning rules are put forward; the decision-making model is established based on the task assigning. Combined with the fact of ATBM warning task, the solving method is given, which bases on the decomposing of task and PSO. The simulation result shows that the method accords with the fact of anti-TBM warning, and it can deal with the task assigning effectively.

Keywords: Satellite and ground radar; TBM (Tactical Ballistic Missile); Warning; Task assignment; Optimization

0 引言

空间导弹预警系统(预警卫星)和地面导弹预警系统(远程相控阵雷达)是空地联合反 TBM 预警系统的重要组成部分^[1-2]。当有多个 TBM 目标出现时, 如何将预警任务合理地分配给有限的传感器资源, 以便对来袭 TBM 实现更好地探测, 是空地联合反 TBM 预警系统的一个重要问题, 更是系统在线任务规划中的关键环节。文献[3-4]分别采用了并行禁忌遗传算法和遗传模拟退火算法, 对面向任务的预警卫星调度问题进行了研究, 取得了一定的成果, 但都着力于算法的开发, 忽略了预警任务的特性, 缺乏实用性。故从反 TBM 预警任务的特性出发, 提出一种基于任务分解和粒子群算法的方法, 以解决空地反 TBM 预警的任务分配问题。

1 任务分配决策模型的建立

为了简化模型, 将空间问题转化为时间问题, 从 TBM 进入传感器监视区域到脱离监视范围为止的时间段为该传感器的可视化时间窗口, 而将传感器对处于其监视范围内的 TBM 开始探测到结束探测为止的时间段表示为该传感器的探测时间窗口。

1.1 任务分配的准则

空地联合反 TBM 预警任务分配优化的目标, 就是在有限的传感器资源限制和可视化窗口的约束下, 确定传感器对 TBM 的探测序列和探测时间窗口, 使整体的探测效能达到最大化。主要包括:

1) 从导弹防御的全局出发, 需要保证每个 TBM 目标都能被观测到, 威胁度大的目标要优先进行观测; 2) 从目标的角度出发, 每个目标被探测的效果要达到最佳, 需要被持续观测的时间尽可能长; 3) 从反 TBM 预警的操作的可靠性和技术复杂度出发, 需要使得交接次数尽可能少。

1.2 目标函数

设有 m 颗预警卫星和 n 部地基预警雷达对 k 个 TBM 实施探测和跟踪, 第 i 个传感器对第 j 个 TBM 的可视化时间窗口为 $[T_{ij1}, T_{ij2}]$, 探测时间窗口为 $[t_{ij1}, t_{ij2}]$, m 颗预警卫星和 n 部地基预警雷达目标容量分别为 R_1, R_2, \dots, R_{m+n} 。

则根据上述对任务分配的优化目标和优化准则的描述, 建立如下的目标函数:

收稿日期: 2009-07-28; 修回日期: 2009-09-31

作者简介: 崔超(1978-), 男, 河南人, 2007年硕士毕业于空军工程大学, 从事作战指挥研究。

$$\max z = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^k c_{ij} x_{ij} (t_{ij2} - t_{ij1}) \quad (1)$$

$$c_{ij} = \lambda w_j + (1 - \lambda) p_{ij} \quad (2)$$

式中, z 为整个空地反 TBM 预警的探测效益函数; 决策变量为确定第 i 个预警传感器是否对第 j 个 TBM 的探测的变量 x_{ij} , 以及探测的开始时刻 x_{ij1} 和结束时刻 t_{ij2} ; c_{ij} 为单位时间第 i 个传感器对第 j 个 TBM 的探测效益值, λ 为权重系数, 由军事专家事先量化给定; w_j 为第 j 个 TBM 的目标威胁度; p_{ij} 为第 i 个传感器对第 j 个 TBM 的探测有利度。

对于预警而言, 关键的问题是解决“看得见”, 所以传感器对 TBM 可视化时间的长短直接影响探测的效果, 时间太短, 传感器采样点十分有限, 对落点的预报精度影响很大, 对 TBM 探测的传感器交接就越频繁, 容易致使目标丢失。故采用如下的方法来对探测有利度 p_{ij} 予以度量。

设 d_{ij} 为第 i 个传感器对第 j 个 TBM 的可视化时间长度, 则:

$$d_{ij} = T_{ij2} - T_{ij1} \quad (3)$$

$$p_{ij} = \frac{d_{ij}}{\max_j(d_{ij})} \quad (4)$$

式中, $\max_j(d_{ij})$ 为所有传感器对第 j 个 TBM 可视化时间长度的最大值。

1.3 约束条件

在对约束条件描述之前, 先做如下定义:

$$x_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{时刻 } t \text{ 第 } i \text{ 个传感器对第 } j \text{ 个 TBM 进行探测} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

则根据上述的描述, 得约束条件如下:

1) $T_{ij1} \leq t_{ij1} \leq t_{ij2} \leq T_{ij2}$, 即传感器对 TBM 的探测必须在其可视化时间窗口内;

2) $\forall i, \sum_{j=1}^k x_{ij}(t) \leq R_i$, 即在任一时刻某一传感器探测 TBM 的数量不能超过其目标容量;

3) $\forall j, \sum_{i=1}^m x_{ij}(t) = \{0, 2\}$, 由于预警卫星采用红外传感器对 TBM 进行探测, 需要两颗预警卫星交汇才可以对 TBM 进行定位, 所以在任一时刻对 TBM 的探测必须是双星交汇。

2 基于任务分解和粒子群的求解算法

从任务分配的决策模型来看, 约束条件 2) 和 3) 决定了该模型就是一个随着时间推移而不断变化的 NP 难题, 决策变量数量多, 模型的求解很复杂。从空地反 TBM 预警的复杂对应关系着手, 提出了一

种基于任务分解和改进粒子群算法的求解算法。该算法将预警任务按时间段分解为多个子任务, 再针对每个子任务的运用粒子群算法进行分配的优化求解^[5], 不仅得到了最优任务分配方案, 而且很好地满足了反 TBM 预警的时效需求。

2.1 任务的分解

根据空地联合反 TBM 预警中每个预警传感器对 TBM 可视化时间窗口的开始时刻和结束时刻, 从时间上将预警任务生命周期化为多个连续或离散的时间段, 分解后的每个时间段就对应着一个子任务。如图 1, 将预警卫星 1、预警卫星 2 和地基预警雷达对 TBM1、TBM2、TBM3 的 9 个可视化时间窗口的开始时刻 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_7, t_9, t_{10}, t_{12}$ 和结束时刻 $t_5, t_6, t_8, t_{11}, t_{13}, t_{14}, t_{15}$, 按照时间上由小到大的顺序排列成 t_1, t_2, \dots, t_{15} 的序列, 然后从前往后两两之间组成一个时间段 $[t_1, t_2]$ 、 $[t_2, t_3]$ 、 \dots 、 $[t_{14}, t_{15}]$, 将整个任务分配任务化为 14 个时间段上的子任务。

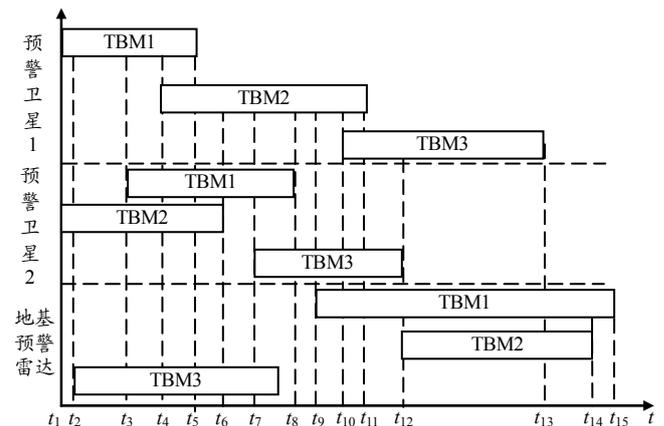


图 1 临空器和地基预警雷达预警协同任务分解示意图

为表述方便, 分别定义子任务可视化矩阵和子任务探测矩阵 2 个概念:

定义 1 子任务可视化矩阵是指在该子任务所处时间段内, 由预警传感器对 TBM 的可视化关系为元素所构成的矩阵。

定义 2 子任务分配矩阵是指在该子任务所处时间段内, 基于子任务可视化矩阵基础之上, 由预警传感器对 TBM 的探测关系为元素所构成的矩阵。

设任务分解后第 i 个子任务 A_i 所处的时间段为 $[t_{i1}, t_{i2}]$, 则 A_i 的子任务可视化矩阵为:

$$S_i = \begin{bmatrix} x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{im1} & x_{im2} & \dots & x_{imk} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i(m+n)1} & x_{i(m+n)2} & \dots & x_{i(m+n)k} \end{bmatrix}$$

A_i 的子任务分配矩阵为:

$$G_i = \begin{bmatrix} y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mk} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{(m+n)1} & y_{(m+n)2} & \cdots & y_{(m+n)k} \end{bmatrix}$$

显然,子任务 A_i 中,当第 j 个 TBM 在时间段 $[t_{i1}, t_{i2}]$ 中处于第 i 个预警传感器的监视范围以内,则 $x_{ij}=1$, 否则 $x_{ij}=0$; $y_{ij}=1$ 表示在时间段 $[t_{i1}, t_{i2}]$ 中第 i 个预警传感器对第 j 个 TBM 的进行探测,反之 $y_{ij}=0$ 。任务分解以后,第 i 个子任务 A_i 的任务分配决策模型变为:

$$\max z = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^k c_{ij} y_{ij} \quad (5)$$

$$s.t: \begin{cases} 0 \leq y_{ij} \leq x_{ij} \\ \sum_{j=1}^k y_{ij} \leq R_i \\ \sum_{i=1}^m y_{ij} = \{0,2\} (i \leq m) \\ x_{ij} \in S_i \\ y_{ij} = \{0,1\} \end{cases} \quad (6)$$

决策变量为 y_{ij} , 且 $y_{ij} \in G_i$ 。

2.2 粒子群算法在子任务分配中的应用

1) 编码: 采用二进制编码方式,子任务探测矩阵按行分解转换成一维的行向量,各粒子位置向量的各个分量即与转换后所得行向量的分量一一对应。例如,子任务探测矩阵为 $\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$, 则按行分解转换后的行向量为 $[y_{11}, y_{12}, y_{21}, y_{22}]$, 粒子位置向量的分量与之对应,假设粒子位置向量为 $[1,0,0,1]$, 即代表该子任务所在时间段内第 1 颗预警卫星对 TBM1 探测,对 TBM2 不探测,第 2 颗预警卫星对 TBM1 不探测,而对 TBM2 探测。

2) 参数设计: 初始种群规模为 30, 学习因子 $c_1=2.0, c_2=1.9$, 惯性权重因子 $w=0.4+0.5(1-i/N)$, N 为最大允许迭代次数, i 为当前迭代次数, 终止条件迭代次数达 100 代。

3) 适应度函数: PSO 适应度函数取目标函数, 即子任务探测效益值函数。

4) 算法实现流程如图 2。

(1) 依据编码的方式和初始化参数的设定, 随机生成初始种群;

(2) 根据式 (7) 和式 (8) 对粒子的速度和位置进行更新;

$$v_i^{t+1} = w \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_{1i} \cdot (p_i^t - x_i^t) + c_2 \cdot r_{2i} \cdot (p_g^t - x_i^t) \quad (7)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t \quad (8)$$

(3) 将每个粒子对应的基因四舍五入调整为二进制 0、1 形式;

(4) 根据子任务可视化矩阵和式 (6) 的约束条件, 调整每个粒子的基因, 使每个粒子成为可行解;

(5) 计算每个粒子的适应度;

(6) 对于粒子 i , 将其适应度值与其所经历过的最好位置的适应度值 $pbest_i$ 比较, 若较好, 则将当前适应度值 $pbest_i$ 所对应的位置作为当前的个体最好位置;

(7) 对于粒子 i , 将其适应度值与其全局所经历过的最好位置的适应度值 $gbest$ 比较, 若较好, 则将当前适应度值 $pbest_i$ 所对应的位置作为当前的全局最好位置;

(8) 如果未达到最大允许迭代次数, 则返回(2), 否则转入(9);

(9) 依据编码的逆过程进行解码, 得到子任务探测矩阵, 结束。

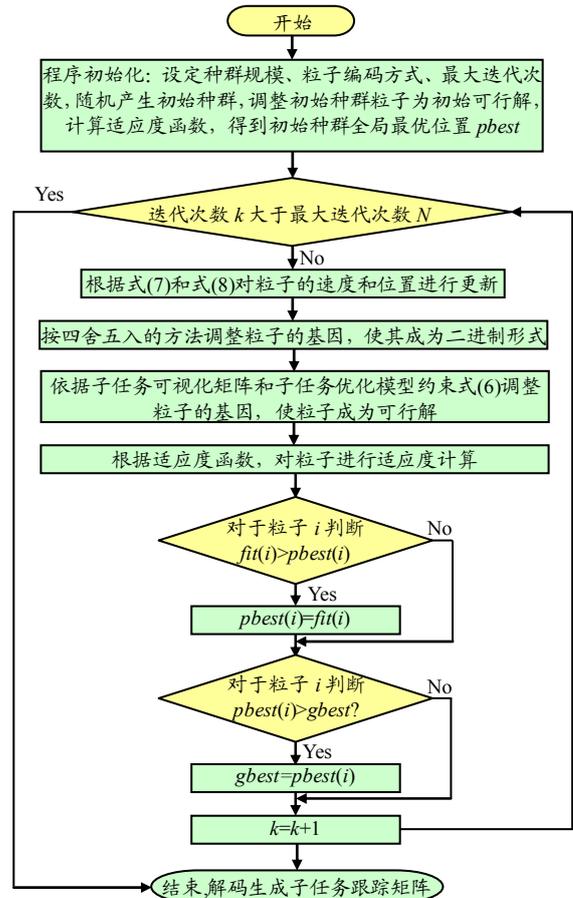


图 2 粒子群算法求解子任务流程框图

2.3 基于任务分配和粒子群的求解算法设计

1) 初始化 $k=1$, 将空地联合预警中传感器对 TBM 的可视化时间窗口的开始时刻和结束时刻, 按从小到大的顺序排列生成时间队列 TQ , 并得到 TQ 的队列长度 m ;

2) 从 TQ 取第 k 个成员 T_k 和第 $k+1$ 个成员 T_{k+1} 组成第 k 个子任务的时间窗口;

3) 依据 T_k 和 T_{k+1} 的值以及所有可视化时间窗口的开始时刻和结束时刻, 判断对每一个可视化时间窗口而言, T_k 是否大于或等于其开始时刻的值, 同时 T_{k+1} 是否小于或等于其结束时刻的值, 推算出第 k 个子任务的可视化矩阵;

4) 结合上述对算法的参数设计和编码方法, 运用 PSO 求解得到第 k 个子任务探测矩阵;

5) 根据得到的探测矩阵中的对应关系, 生成该子任务的分配方案和探测时间窗口 $[T_k, T_{k+1}]$;

6) $k=k+1$, 如 $k \neq m-1$, 则转 2), 否则转 7);

7) 将得到的所有 TBM 在 k 个子任务的探测时间窗口按进行一一对应地聚合, 确定每个 TBM 被预警卫星和地基预警雷达探测的序列和探测时间窗口, 转入 8);

8) 生成最优解, 求解结束。

3 仿真算例

以由 4 颗预警卫星和 1 部地基预警雷达组成的空地反 TBM 预警系统, 对 3 个来袭 TBM 的预警任务分配为例, 各预警传感器对 TBM 的可视化时间窗口和探测有利度分别如表 1、表 2。TBM1、TBM2、TBM3 的威胁度分别为 1、0.662 4、0.337 4, λ 取 0.7, 将该任务分解为 18 个子任务, 每个子任务对应的时段分别为 [179,192]、[192,199]、[199,206]、[206,284]、[284,292]、[292,330]、[330,345]、[345,355]、[355,457]、[457,463]、[463,472]、[472,492]、[492,518]、[518,523]、[523,553]、[553,561]、[561,586]、[586,614]。

表 1 预警传感器对 TBM 的可视化时间窗口

	TBM1	TBM2	TBM3
预警卫星 1	[179, 292]	[179, 472]	[179, 518]
预警卫星 2	[179, 284]	[179, 457]	[179, 523]
预警卫星 3	[179, 355]	[179, 553]	[192, 463]
预警卫星 4	[179, 345]	[179, 561]	[199, 492]
地基预警雷达	[179, 330]	[179, 586]	[206, 614]

结合子任务所对应的时段, 运用文中的模型进行求解, 并将得到的所有子任务的探测时间窗口进行聚合, 得到任务分配的结果如表 3, 每个子任务的探测效益的最佳值如图 3。

表 2 预警传感器对 TBM 的探测有利度

	TBM1	TBM2	TBM3
预警卫星 1	0.642 0	0.719 9	0.830 9
预警卫星 2	0.596 6	0.683 0	0.843 1
预警卫星 3	1	0.918 9	0.664 2
预警卫星 4	0.943 2	0.938 6	0.718 1
地基预警雷达	0.858 0	1	1

表 3 任务分配的结果表

	TBM1	TBM2	TBM3
预警卫星 1		[179, 345]	[345, 518]
预警卫星 2		[179, 345]	[345, 518]
预警卫星 3	[179, 345]	[345, 553]	
预警卫星 4	[179, 345]	[345, 553]	
地基预警雷达	[179, 330]	[179, 614]	[206, 586]

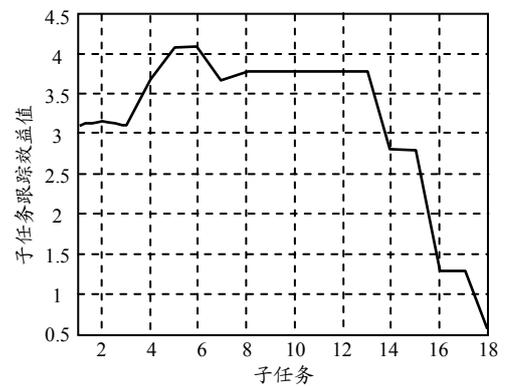


图 3 子任务探测效益最佳值

4 结束语

仿真实例表明, 该模型符合空地联合反 TBM 预警的实际, 便于实施, 具有一定的借鉴意义。但是由于空地联合反 TBM 预警的任务分配是涉及众多复杂因素的系统工程, 只是对其进行了初步尝试, 考虑多个因素的任务分配问题还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 童丽, 王正明, 朱矩波. 空地联合预警系统的弹道估计实时算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005(12): 2064-2067.
- [2] 邵正途, 朱和平. 空地联合反导预警技术探讨[J]. 传感器与微系统, 2008(4): 59-65.
- [3] 阎志伟, 牛轶峰, 李汉铃. 基于并行禁忌遗传算法(PTGA)的预警卫星传感器调度研究[J]. 宇航学报, 2003(6): 598-603.
- [4] 郭浩波, 王颖龙, 曾辉. 采用遗传模拟退火算法研究导弹预警卫星传感器调度[J]. 电光与控制, 2006(8): 71-74.
- [5] James Kennedy, Russell C.Eberhart. Particle Swarm Optimization[C]. Perth, Western Australia: IEEE International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [6] 袁礼飞, 刘新学, 沈生, 等. 基于混沌粒子群算法的导弹火力分配方法[J]. 四川兵工学报, 2008(6): 39-41.