

控制与决策

Control and Decision

基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法

罗艺, 谭贤四, 王红, 曲智国

引用本文:

罗艺, 谭贤四, 王红, 等. 基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 443–449.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0717>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于鲁棒优化的云医疗资源配置问题

Robust optimization based medical resource allocation problem in cloud healthcare system

控制与决策. 2021, 36(2): 469–474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0455>

无人飞行器航迹方案的VIKOR择优评价

Unmanned aerial vehicle path scheme optimal evaluation based–VIKOR

控制与决策. 2020, 35(12): 2950–2958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0415>

基于操作风险的双模式传感器管理方法

A dual–mode sensor management method based on operational risk

控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event–triggered consensus for Markovian jumping multi–agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法

罗 艺^{1,2†}, 谭贤四¹, 王 红¹, 曲智国¹

(1. 空军预警学院, 武汉 430019; 2. 中国人民解放军 94326 部队, 济南 250023)

摘要: 针对高超声速飞行器预警系统中资源难以合理利用的问题, 提出一种基于双层规划的预警资源分配方法. 首先, 建立高超声速飞行器运动状态的马尔可夫模型, 提出威胁评估的方法; 其次, 基于隐马尔可夫模型和卡尔曼滤波, 提出双层规划的高超声速飞行器预警资源分配模型, 下层规划以单位资源损耗下信息增益为目标函数, 上层规划以风险的降低为目标函数; 然后, 针对模型的求解, 提出改进的广义粒子群优化算法; 最后, 通过仿真分析验证所提分配方法和算法的有效性和可行性.

关键词: 高超声速飞行器; 预警资源分配; 双层规划; 威胁评估; 卡尔曼滤波; 隐马尔可夫模型

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0717

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 罗艺, 谭贤四, 王红, 等. 基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 443-449.

Early warning resource allocation method for hypersonic vehicle based on bi-level programming

LUO Yi^{1,2†}, TAN Xian-si¹, WANG Hong¹, QU Zhi-guo¹

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Unit 94326 of the PLA, Jinan 250023, China)

Abstract: In order to solve the problem of that it is difficult to make reasonable use of resources in a hypersonic vehicles early warning system, an early warning resource allocation method based on bi-level programming is proposed. Firstly, the Markov state transition model of target motion state is established, and the method of threat assessment is proposed. Secondly, based on hidden Markov model and Kalman filter, a hypersonic vehicle early warning resource allocation model based on bi-level programming is proposed. The lower level planning takes the information gain under the unit resource loss as the objective function, and the upper level planning takes the risk reduction as the objective function. In order to solve the model, an improved generalized particle swarm optimization algorithm is proposed. Finally, the effectiveness and feasibility of the resource allocation method and algorithm proposed are verified by simulation analysis.

Keywords: hypersonic vehicles; early warning resources allocation; bi-level programming; threat assessment; Kalman filter; hidden Markov model

0 引言

近年来,随着高超声速飞行器技术的发展,俄罗斯已有多型号的高超声速导弹进入战斗值班状态.高超声速飞行器由于具有飞行速度快(大于5马赫)、机动突防能力强、全球快速响应等特点,已成为各强国军事上关注的焦点^[1-2].针对此类目标的威胁,研究相关的防御对策具有重要的战略意义.对于高超声速飞行器防御对策的研究,目前主要集中在轨迹预测^[3]、目标检测和识别^[4]、跟踪^[5]以及拦截^[6]等领域,此类目标预警资源管理的研究还很少.

预警资源是指空天防御体系中各平台的雷达装备.预警资源管理是基于传感器管理理论的,传感器管理理论在军用和民用领域都有非常重要的应用价值,对于这方面的研究也取得了一些成果.传感器管理的方法可以分为两种:一种是基于信息指标优化的方法,另一种是基于决策过程优化的方法.第1种方法将信息评价指标^[7-9]作为目标函数对传感器进行资源分配,从而提高跟踪精度;第2种方法将控制策略^[10-12]、回报函数^[13-14]或风险函数^[15-16]作为目标函数进行资源分配.这些方法为预警资源分配提供

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-09-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401504).

责任编辑: 程龙.

†通讯作者. E-mail: 13297983885@163.com.

了理论基础. 对于高超声速目标的预警资源分配还需要针对目标的特性进行研究, 而且资源分配要适应任务的需求. 现有的研究缺少对高超声速目标的针对性以及对作战任务的适用性.

针对以上问题, 本文提出基于双层规划的预警资源分配方法. 首先, 研究高超声速飞行器的运动特性, 建立马尔可夫状态转移模型并提出这类目标的威胁评估方法. 然后, 根据隐马尔可夫模型(HMM)和卡尔曼滤波, 提出基于双层规划的预警资源分配模型. 在上层规划中, 为了能够优先处理威胁大的目标, 根据高超声速飞行器的威胁度, 将风险降低最大化作为目标函数. 在下层规划中, 为了有效地利用预警资源, 把单位资源损耗下信息增益最大化作为目标函数. 针对预警资源双层规划模型的求解提出改进的广义粒子群算法. 最后, 通过仿真分析验证双层规划的预警资源分配模型和改进的广义粒子群算法的有效性和可行性.

1 高超声速飞行器模型和威胁评估

1.1 目标的马尔可夫模型

高超声速飞行器具有高升阻比的气动布局, 当其再进入大气后, 在气动升力的托举下可以跳跃滑翔飞行, 因此高超声速飞行器的运动特性与常规目标存在显著差异. 尽管高超声速飞行器具有高机动的运动特性, 但是其跳跃滑翔运动阶段的轨迹存在近似的解析关系, 可用简化的三自由度弹道方程组^[17]表示.

高超声速飞行器跳跃滑翔运动过程由5个状态组成, 分别为: 再入机动状态、下降状态、跳跃机动状态、上升状态和攻击状态. 当飞行器的垂直运动速度方向向上, 且垂直方向受力向上时, 飞行器当前状态为上升状态 s_1 ; 当飞行器的垂直运动速度方向向上, 且垂直方向受力向下时, 飞行器当前状态为再入机动状态 s_2 ; 当飞行器的垂直运动速度方向向下, 且垂直方向受力向下时, 飞行器当前状态为下降状态 s_3 ; 当飞行器的垂直运动速度方向向下, 且垂直方向受力向上时, 飞行器当前状态为跳跃机动状态 s_4 ; 当飞行器的垂直运动速度向下, 且已飞过最低跳跃点升阻比仍小于1时, 飞行器当前状态为攻击状态 s_5 . 因此, 定义高超声速飞行器跳跃滑翔运动过程为连续时间的马尔可夫模型 $\{X(t), t \geq 0\}$, 其状态空间 $S = \{s_n | n = 1, 2, 3, 4, 5\}$, 对于任意 $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_{n+1}$ 及 $s_1, s_2, \dots, s_{n+1} \in S$, 有

$$\begin{aligned} P\{X(t_{n+1}) = s_{n+1} | X(t_1) = s_1, \dots, X(t_n) = s_n\} = \\ P\{X(t_{n+1}) = s_{n+1} | X(t_n) = s_n\}. \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 目标威胁评估

根据高超声速飞行器的运动参数和状态, 对其威胁进行评估. 当高超声速飞行器来袭时, 飞行器与其攻击目标的距离 d_s 越小, 其威胁度越高; 同理, 高超声速飞行器的飞行速度 v_s 越大, 其威胁度越高. 由于高超声速飞行器在攻击过程中机动灵活, 当前的运动状态难以反映其攻击意图, 因此威胁评估指标中引入状态转移概率 p_s , 表示由当前状态变为攻击状态的概率(当前状态为攻击状态时 $p_s = 1$). 根据以上分析, 结合弹道导弹目标威胁评估方法^[18], 可以得到高超声速飞行器的威胁度计算公式为

$$\text{Threat} = p_s \left(\alpha_1 \frac{1}{1 + e^{-k_d(d_s - d_0)}} + \alpha_2 e^{-k_v(v_s - v_0)} \right). \quad (2)$$

其中: α_1, α_2 为权系数, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; k_d 和 k_v 分别为距离和速度的增益系数; d_0 和 v_0 分别为距离和速度的门限值; $\text{Threat} \in (0, 1)$.

2 预警资源分配的双层规划模型

预警资源分配通常采用“观测-预测-分配”的方法: 首先通过使用预警资源对目标进行观测, 然后根据观测值预测出目标下一时刻的状态, 最后根据预测值分配最佳资源在下一时刻对目标进行观测.

针对多个高超声速飞行器进行预警资源分配, 既要合理地利用资源, 减小目标机动带来的观测的不确定性, 又要考虑各个目标的威胁程度. 对威胁程度较大的目标要优先进行处理, 在分配的过程中还要使资源得到有效利用. 为了在预警资源分配中解决这两个问题, 建立高超声速飞行器预警资源分配的双层规划模型.

上层规划针对高超声速飞行器的威胁性, 以风险降低最大化为目标函数, 下层规划针对高超声速飞行器的机动特性, 以单位资源损耗下信息增益最大化为目标, 可表示为

$$\begin{cases} \text{Obj}_{\text{up}} = \max \sum_n (\text{Risk}_n - \text{Risk}'_n), \\ \text{Obj}_{\text{down}} = \max \sum_n \frac{I_n}{c_n}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: Risk 为目标的危险值, I 为信息增益, c 为资源损耗. 其中上层规划与下层规划的约束条件是一样的, 都是以资源约束为约束条件.

在双层规划中, 上层规划根据威胁度决定优先分配资源的目标, 下层规划根据目标的机动性决定如何合理分配资源, 同时下层目标函数会随上层目标函数变化而变化. 两个目标函数在相互影响中最终做出

满足条件的决定.

2.1 下层规划

2.1.1 基于HMM的资源分配模型

假设对高超声速飞行器的预警探测时刻为 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, k 时刻高超声速飞行器的状态转移概率矩阵为

$$\mathbf{A}(k) = [a_{ij}(k)] = \{P(x(k) = s_j | x(k-1) = s_i)\}. \quad (4)$$

其中: $x(k)$ 为HMM在 k 时刻的隐状态, $x(k) \in \{s_i | i = 1, 2, \dots, 5\}$; s_i 为高超声速飞行器的运动状态.

k 时刻高超声速飞行器的观测概率矩阵为

$$\mathbf{Y}(k) = \{P(y(k) = s_o | x(k) = s_i)\}. \quad (5)$$

若初始状态的概率分布为 η , 则隐马尔可夫模型可表示为

$$\lambda(k) = (\mathbf{A}(k), \mathbf{Y}(k), \eta), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (6)$$

k 时刻可用的预警资源为 $\omega(k) \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$, m 为预警资源的数量, 对目标进行观察的资源为 $w(k) \in \omega(k)$, 则基于HMM预警资源的分配模型可表示为 $(x(k), \mathbf{W}(k), \mathbf{Y}(k), \eta(k|k), \eta(k+1|k))$, 其中 $\mathbf{W}(k)$ 为资源分配矩阵. 在 $\mathbf{Y}(k)$ 、 $\mathbf{W}(k)$ 的基础上对隐状态 $x(k)$ 的预测概率可表示为

$$\eta(k+1|k) = P(x(k)|\mathbf{Y}(k), \mathbf{W}(k)). \quad (7)$$

2.1.2 目标函数

为了合理地利用资源对目标进行观测, 资源分配要保证观测质量并提高资源的利用率. 这里采用信息增益作为衡量目标观测所获得的信息的指标.

目标隐状态预测的信息熵为

$$H(\eta(k|k-1)) = - \sum_{i=1}^5 \eta_i(k|k-1) \log_2 \eta_i(k|k-1). \quad (8)$$

资源分配的信息熵为

$$H(w(k)) = - \sum_{o=1}^5 P[y(k) = s_o | Y_{k-1}, W_{k-1}, w(k)], \quad (9)$$

$$\log_2 P[y(k) = s_o | \mathbf{Y}(k-1), \mathbf{W}(k-1), w(k)].$$

在目标状态预测条件下进行资源分配的条件熵为

$$H(w(k)|\eta(k|k-1)) = - \sum_{i=1}^5 \eta_i(k|k-1) H(w(k)|\eta_i(k|k-1)). \quad (10)$$

预警资源分配后对高超声速目标观察的信息增

益为

$$I(\eta(k|k-1), w(k)) = H(w(k)) - H(w(k)|\eta(k|k-1)). \quad (11)$$

预警资源消耗所带来的信息增益可以表示为 $\frac{I(\eta(k|k-1), w(k))}{c(w(k), \eta(k|k-1))}$, 其中 c 为预警资源的损耗总成本. 由此可得下层规划的目标函数为

$$\text{Obj}_{\text{down}} = \max \frac{\sum_i^{n_k} I^i(\eta(k|k-1), w(k))}{\sum_i^{n_k} \sum_j^{m_k} c^{ij}(w(k), \eta(k|k-1))}. \quad (12)$$

其中: n_k 为 k 时刻的目标个数, m_k 为 k 时刻需要分配的资源个数, 上标 i 为第 i 个目标, 上标 j 为第 j 个资源.

2.1.3 约束条件

1) 资源协同约束.

由于高超声速飞行器具有高速高机动的作战特性, 在其飞行过程中至少要分配一个预警资源对其进行跟踪, 此约束条件可表示为

$$\sum_j^m w_k^{ij} = 1, \quad (13)$$

其中 w_k^{ij} 表示 k 时刻将资源 j 分配给目标 i .

2) 资源容量约束.

假定每个预警资源的目标容量为 C_j , 这里不考虑多个资源数据融合的情况, 即每个目标只分配一个资源, 此约束条件可表示为

$$\sum_i^n w_k^{ij} \leq C_j. \quad (14)$$

3) 资源探测能力约束.

对于预警资源而言并不具备无限探测的能力, 每个预警资源都具有一定的探测威力范围 M_j , 目标必须在分配资源的威力范围内, 由此可得约束条件为 $l_i \notin M_j$, 则 $w_k^{ij} = 0$, l_i 为目标的位置.

2.2 上层规划

2.2.1 基于卡尔曼滤波的资源分配模型

预警装备对高超声速飞行器跟踪常用的方法是使用卡尔曼滤波器^[19]. 描述高超声速飞行器运动参数的向量为 $\mathbf{X}(k)$, 则 $k+1$ 时刻的运动参数向量为

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{Q}(k). \quad (15)$$

其中: $\mathbf{F}(k)$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{Q}(k)$ 为过程噪声.

预警资源对目标观察的量测方程为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{R}(k). \quad (16)$$

其中: $\mathbf{Z}(k)$ 为传感器在 k 时刻收到的量测, $\mathbf{H}(k)$ 为观

测矩阵, $\mathbf{R}(k)$ 为量测噪声.

基于卡尔曼滤波的预警资源分配模型可表示为 $(\mathbf{X}(k), w(k), \mathbf{Z}(k), \hat{\mathbf{X}}(k|k), \hat{\mathbf{X}}(k|k+1))$. $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 为卡尔曼滤波对目标参数的估计值, $\hat{\mathbf{X}}(k|k+1)$ 为目标参数预测值.

$\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 可表示为

$$\hat{\mathbf{X}}(k|k) = \hat{\mathbf{X}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)]. \quad (17)$$

$\mathbf{K}(k)$ 为增益矩阵, 即

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k)\mathbf{H}'(k)\mathbf{S}^{-1}(k). \quad (18)$$

$\mathbf{S}(k)$ 为新息协方差

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k)\mathbf{H}'(k) + \mathbf{R}(k). \quad (19)$$

$\mathbf{P}(k|k)$ 为协方差矩阵

$$\mathbf{P}(k|k) = \mathbf{P}(k|k-1) - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1). \quad (20)$$

目标参数预测值可表示为

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\hat{\mathbf{X}}(k|k). \quad (21)$$

2.2.2 目标函数

为了优先处理威胁较大的目标, 以降低目标风险作为资源分配的目标函数. 由卡尔曼滤波器对高超声速飞行器进行跟踪可以得到目标的运动参数服从 $N(\hat{\mathbf{X}}(k|k), \mathbf{P}(k|k))$ 分布. 因此, 目标位于跟踪波门内的概率 p_t 可以表示为

$$p_t = \int \int \int_{\tau} f(x, y, z) dx dy dz. \quad (22)$$

其中: $f(x, y, z) \sim N(\hat{\mathbf{X}}(k|k), \mathbf{P}(k|k))$, τ 为跟踪波门的范围.

由此可以得到预警资源跟踪过程中丢失目标的概率为 $p_m = 1 - p_d p_t$, 其中 p_d 为预警资源检测概率.

资源分配中的风险 (Risk) 可以定义为: 使用当前资源分配方案下造成的损失, 这里可以表示为威胁与目标丢失概率的乘积

$$\text{Risk} = \text{Threat} \cdot (1 - p_d p_t). \quad (23)$$

在 k 时刻的资源分配方案, 其目的就是使 $k+1$ 时刻的风险值降低到最小, 由此可得上层规划的目标函数为

$$\begin{aligned} \text{Obj}_{\text{up}} &= \max \left(\sum_i^{n_k} \text{Risk}_k^i - \sum_i^{n_{k+1}} \text{Risk}_{k+1}^i \right) = \\ & \max \left(\sum_i^{n_k} \sum_j^{m_k} w_k^{ij} \text{Threat}_k^i (1 - p_{d_k}^{ij} p_{t_k}^{ij}) - \right. \\ & \left. \sum_i^{n_{k+1}} \sum_j^{m_{k+1}} w_{k+1}^{ij} \text{Threat}_{k+1}^i (1 - p_{d_{k+1}}^{ij} p_{t_{k+1}}^{ij}) \right). \quad (24) \end{aligned}$$

2.3 双层规划模型求解

不同于单目标规划模型进行求解, 针对双层规划问题, 本文采用双层迭代的思想, 即在上层规划与下层规划之间反复迭代进行求解. 本文提出的双层规划资源分配方法采用改进的广义粒子群算法 (GPSO) 进行求解. 传统粒子群算法的粒子更新方式单一, 对不同的问题适应性差, 求解过程收敛慢. 广义粒子群算法通过多种形式对粒子进行更新 (例如, 通过遗传算法中的交叉和变异进行更新, 通过局部搜索进行更新等), 能够实现对解空间的快速搜索, 加快收敛速度. 本文使用的改进的广义粒子群算法通过粒子群在上层规划与下层规划之间反复迭代更新, 实现双层规划的求解, 如图1所示.

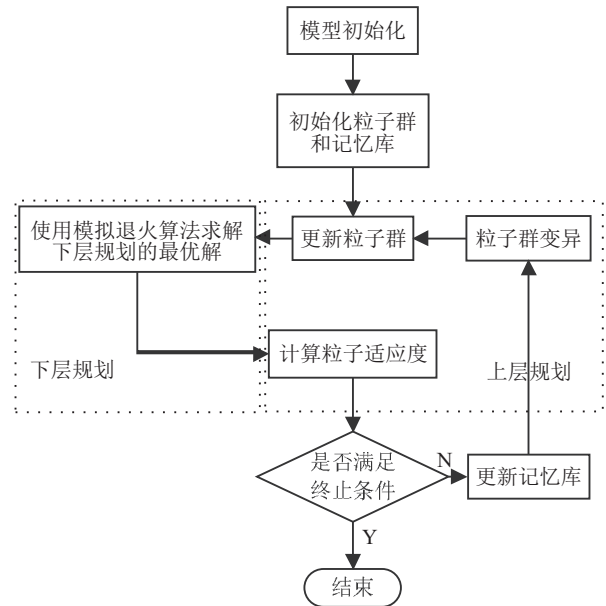


图1 算法流程

求解步骤如下.

step 1: 模型初始化. 初始化预警资源分配模型.

step 2: 算法初始化.

初始化粒子群 $\{x_{id} | id = 1, 2, \dots, n_1\}$ 和记忆库 $\{x'_{id} | id = 1, 2, \dots, n_2\}$, 设定粒子群规模为 n_1 , 记忆库规模为 n_2 , 以 n_2/n_1 的概率选取粒子群中的粒子进入记忆库.

step 3: 更新粒子群.

对粒子群中的所有粒子按照概率 ϵ 选择下面两种更新方式更新粒子群:

1) 在记忆库中随机选取一个粒子, 对该粒子与粒子群中的粒子进行交叉操作 (交叉算子使用均匀交叉算子), 取适应度高的粒子取代当前粒子 (适应度函数为上层规划的目标函数).

2) 当前粒子按照式(24)进行更新.

$$v_{id} = w \cdot v_{id} + c_1 \cdot \text{random}(0, 1) \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot \text{random}(0, 1) \cdot (p_{gd} - x_{id}),$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}. \quad (25)$$

其中: v_{id} 为更新速度, w 为权重, c_1 和 c_2 为加速因子, $\text{random}(0,1)$ 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, p_{id} 为当前粒子的最优解, p_{gd} 为粒子群的最优解.

step 4: 进入下层规划, 再一次更新粒子群.

将下层规划的目标函数式作为适应度函数, 设置初始温度 T_0 和终止温度 T_f . 将粒子群中的每一个粒子作为初始解使用模拟退火算法求最优适应度, 用结果更新当前粒子.

step 5: 计算粒子群适应度.

将上层规划的目标函数作为适应度函数, 计算当前粒子群中每个粒子的适应度, 更新每个粒子的最优适应度 p_{id} 和粒子群的最优适应度 p_{gd} .

step 6: 判断是否满足终止条件.

若满足终止条件 (计算结果收敛或达到迭代次数), 则算法结束.

step 7: 更新记忆库.

将粒子群中的每一个粒子与记忆库中的适应度最差的粒子进行比较, 如果该粒子优于记忆库中适应度最差的粒子, 且记忆库中不存在此粒子, 则用该粒子替换记忆库中的最差粒子.

step 8: 粒子群变异.

对粒子群中的每一个粒子, 以一定的概率进行变异操作 (变异算子使用均匀变异算子), 将变异后的粒子取代当前粒子, 变异操作后跳转到 step 3.

3 实验仿真

为了验证本文提出的方法, 进行仿真分析. 设定仿真场景如下: 某时刻, 高超声速飞行器 a 、 b 、 c 分别以 5 马赫、10 马赫、8 马赫的速度向我方袭来, 飞入我方领空后预警资源的部署如图 2 所示.

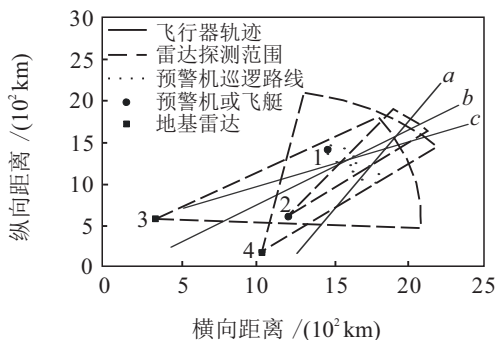


图 2 仿真场景

图 2 中: 1 为预警机, 正在进行 8 字巡逻, 2 为艇载雷达部署在空中, 3 和 4 为地基雷达.

3.1 预警资源分配仿真

使用 Matlab 软件对假设场景进行仿真, 预警资源分配的仿真结果如图 3 所示, 分配过程中目标函数的值如图 4 所示.

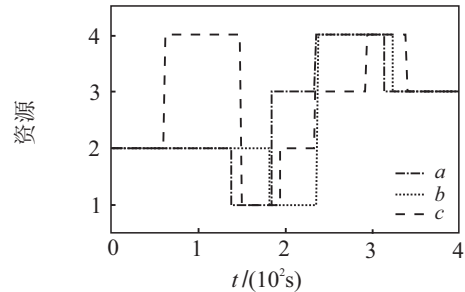
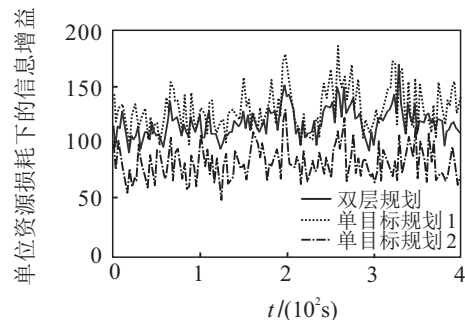
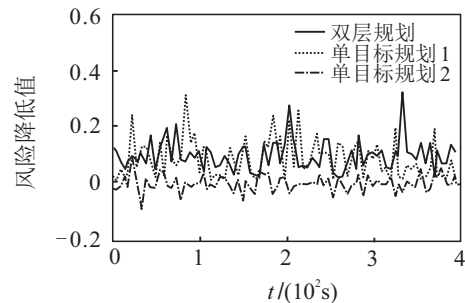


图 3 资源分配仿真结果



(a) 下层规划



(b) 上层规划

图 4 目标函数值

通过对图 3 和图 4 进行分析可以看出:

- 1) 在 $t = 83 \text{ s}$ 时, 资源分配发生了变化, 上层规划中风险降低值得到了优化;
- 2) 在 $t = 200 \text{ s}$ 时, 为了优先处理威胁, 通过资源分配, 使上层规划的目标值得到了优化, 但下层规划目标值降低了;
- 3) 在 $t = 246 \text{ s}$ 时, 通过资源分配, 使下层规划的资源利用得到了优化;
- 4) 在 $t = 335 \text{ s}$ 时, 通过资源分配, 使上层规划和下层规划的目标值同时得到了优化.

本文提出的双层规划算法, 既可以同时兼顾两个目标函数, 又可以在两个目标函数冲突时, 优先使上

层规划风险降低值达到最优。

3.2 双层规划与单目标规划资源分配对比

为了对比分析,在图2仿真场景的条件下,将双层规划的两个目标函数分别作为两个单目标规划的目标函数进行仿真,仿真结果如图4所示。图4中:单目标规划1为将单位资源消耗下的信息增益最大化作为目标函数的资源分配方法;单目标规划2为将风险降低值最大化作为目标函数的资源分配方法。

从仿真结果可以看出:

1) 双层规划可以使两个目标函数同时取得较优值,单目标规划只能使一个目标函数取得最优值,而无法兼顾另一个目标函数;

2) 在图4(b)中,双层规划的结果与单目标规划2的结果相差不大,说明双层规划的求解过程中优先求解上层规划。

3.3 求解算法对比

在图2仿真场景的条件下, $k=0$ 时,分别采用另外3种算法与本文改进的广义粒子群算法进行对比,对比结果如图5所示。图5中算法1为改进的广义粒子群算法,算法2为模拟退火算法,算法3为遗传算法,算法4为粒子群算法。

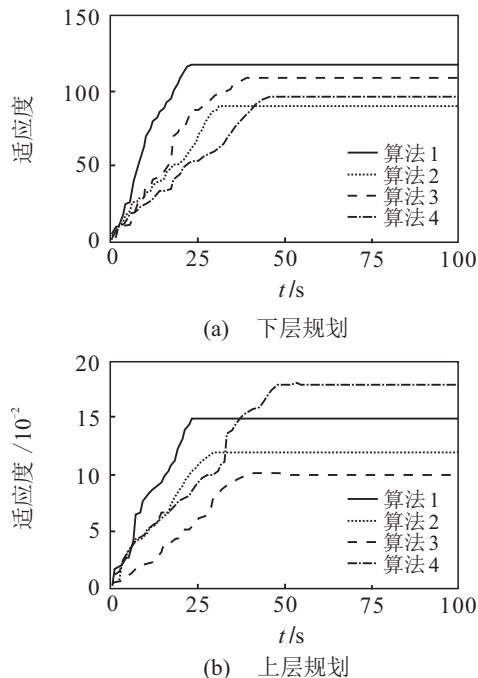


图5 算法性能对比

从仿真结果可以看出,本文算法收敛速度和求解质量均为最优。

4 结论

本文基于双层规划的思想研究了高超声速飞行器预警资源分配方法。首先,研究了高超声速飞行器

的运动特性,建立了目标运动状态的马尔可夫模型,并提出了高超声速飞行器的威胁评估方法。其次,建立了基于双层规划的预警资源分配模型。在双层规划模型中,下层规划基于HHM的资源分配方法,以单位资源损耗的信息增益最大化为目标函数;上层规划基于卡尔曼滤波的资源分配方法,以目标的风险降低的最大化为目标函数。为了求解双层规划,提出了改进的广义粒子群算法。最后,进行了仿真实验,通过对比分析,验证了本文模型以及算法的有效性和可行性。由于战场环境复杂多变,对预警资源分配的实时性要求较高,分配模型求解算法的效率提升是下一步的研究方向。

参考文献(References)

- [1] Kimmel R L, Adamczak D W, Hartley D, et al. Hypersonic international flight research experimentation-5b flight overview[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, 55(6): 1303-1314.
- [2] Hu Qinglei, Meng Yao, Wang Chenliang, et al. Adaptive backstepping control for air-breathing hypersonic vehicles with input nonlinearities[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 73: 289-299.
- [3] Chen-long Yu, Xian-si Tan, Zhi-guo Qu, et al. Marginal tracking algorithm for hypersonic reentry gliding vehicle[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(1): 156-166.
- [4] 李志淮, 谭贤四, 王红, 等. 基于运动参数估计的高超声速目标检测方法研究[J]. *宇航学报*, 2012, 33(3): 346-352.
(Li Z H, Tan X S, Wang H, et al. Detection algorithm for hypersonic targets based on motion parameter estimation[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(3): 346-352.)
- [5] Hailong Cui, Weifeng Liu, Shujun Zhu, et al. A hypersonic vehicle tracking algorithm based on the UKF generalized labeled multi-bernoulli filter[C]. *The 35th Chinese Control Conference*. Chengdu: IEEE, 2016: 4911-4916.
- [6] 王华吉, 雷虎民, 张大元, 等. 反临近空间高超声速目标拦截弹中末制导交接窗口[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(5): 1-8.
(Wang H J, Lei H M, Zhang D Y, et al. Midcourse and terminal guidance handover window for interceptor against near space hypersonic target[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(5): 1-8.)
- [7] Gabriele Ferri, Andrea Munaf, Kevin D LePage. An autonomous underwater vehicle data-driven control strategy for target tracking[J]. *IEEE Journal of Oceanic*

- Engineering, 2018, 43(2): 323-343.
- [8] Muhammed O Sayin, Chung-Wei Lin, Shinichi Shiraishi, et al. Information-driven autonomous intersection control via incentive compatible mechanisms[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(3): 912-924.
- [9] Mario Bukal, Ivan Marković, Ivan Petrović. Score matching based assumed density filtering with the von mises-fisher distribution[C]. The 20th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2017: 433-438.
- [10] Gehly Steven, Jones Brandon, Axelrad Penina. Sensor allocation for tracking geosynchronous space objects[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2018, 41(1): 149-163.
- [11] Ahmad Bilal Asghar, Syed Talha Jawaid, Stephen L Smith. A complete greedy algorithm for infinite-horizon sensor scheduling[J]. Automatica, 2017, 81(1): 335-341.
- [12] Saurav Subedi, Yimin D Zhang, Moeness G Amin, et al. Cramer-rao type bounds for sparsity-aware multi-sensor multi-target tracking[J]. Signal Processing, 2018, 145(1): 68-77.
- [13] James Z Hare, Shalabh Gupta, Thomas A Wettergren. POSE: Prediction-based opportunistic sensing for energy efficiency in sensor networks using distributed supervisors[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 48(7): 2114-2127.
- [14] Prince Singh, Min Chen, Luca Carlone, et al. Supermodular mean squared error minimization for sensor scheduling in optimal Kalman filtering[C]. 2017 American Control Conference (ACC). Seattle: IEEE, 2017: 5787-5794.
- [15] Marcos Eduardo Gomes-Borges, Dominique Maltese, Philippe Vanheeghe, et al. A risk-based sensor management using random finite sets and POMDP[C]. The 20th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE, 2017: 1-9.
- [16] Amirali Khodadadian Gostar, Reza Hoseinnezhad, Alireza Bab-Hadiashar, et al. Sensor-management for multitarget filters via minimization of posterior dispersion[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(6): 2877-2884.
- [17] 喻晨龙, 谭贤四, 曲智国, 等. 临近空间升力式再入飞行器跳跃空域预测[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(1): 61-65.
(Yu C L, Tan X S, Qu Z G, et al. Jumping airspace prediction for near-space lifting-reentry vehicle[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(1): 61-65.)
- [18] 吴舒然, 刘昌云, 高嘉乐, 等. 双层动态变权的弹道目标威胁评估算法研究[J]. 战术导弹技术, 2018(3): 60-66.
(Wu S R, Liu C Y, Gao J L, et al. Study of the ballistic target threat assessment algorithm of dual dynamic variable weight[J]. Tactical Missile Technology, 2018(3): 60-66.)
- [19] Joshua A Taylor, Natchanon Luangsomboon, Dariush Fooladivanda. Allocating sensors and actuators via optimal estimation and control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(3): 1060-1067.

作者简介

罗艺(1986-), 男, 博士生, 从事高超声速飞行器及其相关领域的研究, E-mail: 13297983885@163.com;

谭贤四(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 从事预警监视装备体系建设与运用等研究, E-mail: tanxs-hust@163.com;

王红(1962-), 女, 教授, 从事体系结构技术、装备论证等研究, E-mail: wanghong572g@sina.com;

曲智国(1982-), 男, 讲师, 博士后, 从事图像处理、预警监视等研究, E-mail: green20001@sina.com.

(责任编辑: 闫妍)