

动态扰动下低轨预警卫星系统任务规划问题分析

简 平, 邹 鹏, 熊 伟

(复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

摘 要: 论文探索分析了动态扰动下低轨预警卫星系统任务规划问题, 讨论了低轨预警系统任务规划中的动态扰动因素, 并对其进行了定量化描述; 提出了低轨预警系统动态任务规划模式, 在此基础上研究探讨了系统动态规划中重规划周期的确定方法; 建立了动态扰动下低轨预警系统任务规划模型, 并将资源扰动下动态规划模型转化为新任务插入下基于二级优化目标的动态规划模型, 设计了求解动态规划模型的启发式方法, 并进行了实例验证, 为动态规划问题研究提供借鉴意义。

关键词: 低轨预警系统; 动态扰动; 任务规划; 混合型重规划; 启发式算法

中图分类号: E816 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)10-1894-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.10.004

Analyze on Task Planning of Early Warning System of LEO Under Dynamic Disturbances

JIAN Ping, ZOU Peng, XIONG Wei

(Science and Technology on Complex Electronic System Simulation Laboratory, Beijing 101416, China)

Abstract: The article analyzes on task planning of early warning system of LEO under dynamic disturbances innovatively. It discusses and quantifies the dynamic disturbances, puts forward the task dynamic planning model of early warning system of LEO. And then the passage researches on the solving method of the re-planning period, sets up the re-planning models under dynamic disturbances, and the model under resource disturbance is transformed into the model under new task disturbance based on two-level optimized goal. To solve the dynamic planning models, a heuristic algorithm is designed, and an example is validated for the content. The paper provides important inspiration to the dynamic task planning problem.

Key words: early warning system of LEO; dynamic disturbances; task planning; mixed re-planning; heuristic algorithm

1 引言

随着现代国土防御对弹道导弹预警需求的不断提高, 当多个目标同时或相继出现时, 系统能力可能无法满足对所有目标的探测需求, 如何有效地调度各星载传感器资源(尤其是低轨系统), 实现完成任务最多以及提高各任务平均完成效果等指标, 是一项困难的课题. 低轨预警系统任务规划问题^[1]是指当出现一个或多个可疑目标探测和跟踪任务需求时, 根据系统状态调用有限的资源(传感器), 合理安排其对目标的跟踪序列方案的过程. 系统在执行初始规划调度方案时, 由于卫星资源自身原因、外部环境变化、外界干扰等原因, 导致传感器失效、卫星失控等状况, 使得卫星资源不再可用, 初始规

划调度方案无法继续执行; 另外由于导弹发射的时间、地点、数量不可预测, 在执行规划指令的过程中随时可能插入新的任务, 需要进行动态规划. 低轨预警系统动态任务规划是指在初始规划调度方案的基础上, 当新导弹任务到达或预警资源状态发生变化的情况下, 能够较快地生成稳定的新规划调度方案, 为任务分配合适的传感器进行跟踪的过程.

国内外主要对低轨预警系统静态任务规划调度进行了相关研究, 初步建立了低轨预警系统资源调度问题的数学模型, 并给出了相应的求解算法, 如遗传算法, 模拟退火算法、禁忌搜索算法等^[2-5], 没有考虑到系统任务规划中的动态因素. 传感器管理和规划调度包括动态和静态两方面^[6], 动态方面主要集中在电子侦察卫星、

成像侦察卫星等动态任务规划研究^[7],对于预警卫星系统动态规划问题,从公开发表的论文来看鲜有学者做深入研究,文献[8]研究预警卫星系统动态重规划策略,并没有给出求解问题的具体方法,本文在低轨预警系统静态任务规划问题研究的基础上^[1],从系统任务规划中的动态扰动因素、动态任务规划策略、规划模型、模型的求解方法等方面对低轨预警卫星系统动态规划问题进行探索分析和研究,为面向多目标跟踪的动态任务规划研究奠定基础。

2 动态扰动分析

2.1 动态扰动描述

影响规划要素变化从而需要进行动态调整的因素称为扰动因素,低轨预警系统面临的扰动因素分为 4 类:预警资源失效、预警资源增加、预警跟踪任务删除、预警跟踪任务插入。在处理各类扰动时,需要分析扰动对初始方案的影响以及扰动相互之间隐形影响。资源增加实际上是可用于导弹跟踪的红外传感器资源增加,记为 $\text{sensor}_{\text{insert}}$;任务删除后释放了执行该任务的卫星资源,从某种程度上也可以看作是一种特殊的资源增加情况,记为 $\text{sensor}_{\text{release}}$;任务插入指在原方案执行过程中插入新导弹目标的跟踪任务,记为 $\text{Task}_{\text{insert}}$;资源失效指原方案中使用的预警卫星或卫星上的传感器资源无法继续工作,则该卫星上安排的任务需作为新任务进行规划,可看作是特殊的任务插入,记为 $\text{Task}_{\text{release}}$ 。因此,可以将本文讨论的 4 类扰动进行形式化描述如下:

- (1) if $\text{sensor}_{\text{insert}} \neq \emptyset$, 预警资源增加扰动。
- (2) if $\text{sensor}_{\text{release}} \neq \emptyset$, 跟踪任务删除扰动。
- (3) if $\text{Task}_{\text{insert}} \neq \emptyset$, 跟踪任务插入扰动。
- (4) if $\text{Task}_{\text{release}} \neq \emptyset$, 预警资源失效扰动。

2.2 动态扰动测度

动态任务规划方案对初始方案的变化一方面会影响任务执行的跟踪效果,另一方面任务的变更不利于对目标跟踪的稳定性。因此,可以依据初始规划调度方案与新方案中任务安排发生变化的数目来度量初始规划方案的变更程度。本文定义:动态扰动测度(Dynamic Disturbance Measurement, DDM)表示动态规划调度后的新方案与初始规划方案的变化程度(称为方案的调整幅度或调整率):

$$\tau(S_0, S_{\text{new}}) = \frac{\gamma_{\text{del}} N_{\text{del}} + \gamma_{\text{adj}} N_{\text{adj}}}{N} \quad (1)$$

其中 S_0 为初始规划调度方案, S_{new} 为动态调整后的跟踪方案; N_{del} 表示相对于 S_0, S_{new} 中删除的跟踪子任务总数; N_{adj} 表示相对于 S_0, S_{new} 中调整的跟踪子任务总数,这里的调整是指 S_0 中的子任务改变了执行时间或执行该任务的传感器资源组合; γ_{del} 表示删除跟踪子

任务的权重, γ_{adj} 表示调整子任务的权重,这两个参数可以根据需要动态调整,也可以为常数; N 为子任务总数。低轨预警系统动态规划调度的目标之一是最小化动态扰动测度,即 $\text{Min}(\tau(S_0, S_{\text{new}}))$ 。

3 低轨预警系统动态任务规划模式

3.1 动态规划框架

动态重规划调度是指在已有规划调度方案的执行过程中不断监测方案的执行情况,并将监测结果反馈给规划调度系统,一旦有干扰发生,及时修正调度策略,以保证系统的稳定性和有效性。动态重调度适用于处理不确定性动态因素较多的预警系统任务规划。根据低轨预警系统任务规划问题的特点,建立动态重规划框架,包括重规划调度策略、重规划调度方法以及重规划调度性能评价三个层面,如图 1 所示。

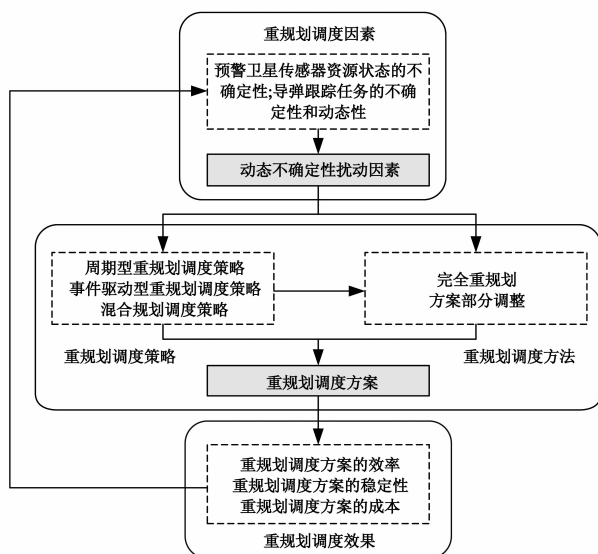


图1 动态重规划框架

重规划调度策略用于决定何时引发重调度以及选用哪种重调度方法。包括 3 种类型,即周期重调度策略、事件驱动重调度策略以及混合型重调度。重规划调度方法用于生成能够适应新情况的重规划调度方案。低轨预警系统动态任务规划问题的解决方法主要有两类:完全重规划和方案部分调整方法。重规划调度性能评价主要是从新方案的效率、稳定性、以及成本等几个方面进行考察,在实际应用中可以根据具体需要进行选取。

3.2 周期重规划

周期性重规划调度策略是指根据低轨预警系统状态和任务特点,按照一定的周期重新对任务分配资源,在周期内暂不考虑干扰事件的影响,优点是可以较好地处理对目标估计不断积累的误差等变化量不明显的

渐变性不确定性因素,当系统状态发生重大变化时性能较差.其难点是确定重规划调度周期的长度,重规划调度周期不一定是固定的,可以根据系统执行情况动态调整,以适应动态规划需求.周期重规划主要考虑对目标预测和跟踪误差的积累达到一定程度而无法有效跟踪目标,因此在时间 T 时,重新构造预警卫星和目标的观测活动,对资源进行重调度,得出更优的任务规划方案.在每一个周期 T 内,其调度是个相对静态的过程,系统按预先生成的方案执行.

3.3 事件驱动型重规划

事件驱动型重规划调度策略是指根据低轨预警系统状态,按照动态扰动事件的特性对任务重新分配传感器资源,能及时响应系统中突发的扰动事件(如新导弹跟踪任务的到达和资源的突然故障等),调整初始规划调度方案信息,但对于渐变性不确定因素(如误差的不断累积),完全的事件响应则会导致系统资源调度过于频繁,不利于方案的执行.事件驱动型任务规划主要考虑当系统有新任务插入时,更新任务列表,构造卫星传感器与新目标的观测活动,对初始规划调度方案进

行调整,满足对新任务和原有任务的跟踪需求.

3.4 混合型重规划

混合型重调度策略将上述两种策略相结合,在周期性重调度的基础上,当有突发性事件发生时进行重调度,既能够处理突变性不确定因素,也能处理渐变性不确定因素.当每个新的周期时刻到来或者重大干扰发生时更新原调度,混合重调度策略比单一的周期调度和连续调度取得的效果更好.

一次完整的低轨预警系统任务规划采用混合型重规划策略,如图 2 所示.在每个周期点 T 进行一次周期重规划的求解过程;每当系统中产生了一个因跟踪任务需求或资源状态变化引起的事件时,进行一次事件重规划的求解过程.在周期点进行重规划调度求解时,对下一周期内的调度序列进行优化,保证生成的调度序列使系统的效能最大化.在进行事件重规划调度求解时,尽量少改动现有调度序列的基础上,快速实现对调度指令的更新,应尽量降低求解的复杂性,减少求解时间.

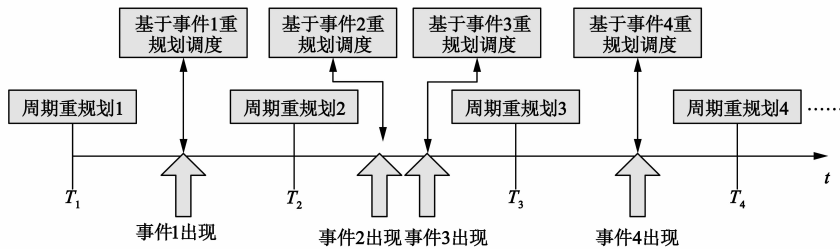


图2 低轨预警系统动态任务规划示意图

4 基于误差的重规划周期的确定

本文从目标估计的误差出发,分析重规划周期 T 的确定方法.导弹目标和传感器所在平台的运动特性可预测或可知,目标预测误差可用图 3 来表示,其运动轨迹如图中粗实线表示,对目标的全过程轨迹进行预测,其预测误差分布在以细实线条为中心,以细实线条为边界的直径不断增大(反映了预测误差的不断累积)的柱体内.

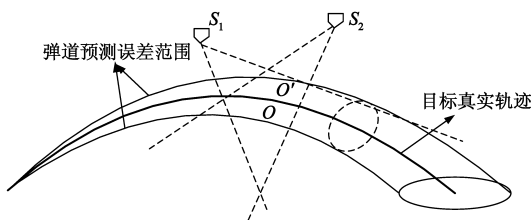


图3 目标预测误差分布

初始信息的初始时刻 t_0 有关,当 $t - t_0$ 的值较大时,预测误差的绝对值也就越大;反之预测误差的绝对值较小.因此周期 T 的选择可以通过计算弹道预测中位置预测误差椭圆和卫星传感器组合对目标的定位精度来确定,当对目标的定位精度在误差椭圆范围之内,满足目标跟踪需求,此时不需要进行任务重规划,否则后面的预测无效,初始规划调度方案对传感器目标跟踪起不到指示作用.此时,需要根据已经获得的跟踪数据重新预测弹道,对任务进行重规划,然后指导传感器对目标进行跟踪.对于多个目标跟踪的任务规划中,每个目标对应一个重规划周期 T ,只需选用最小的一个 T 作为系统重新预测弹道位置并进行动态重规划的周期,周期 T 的确定可用图 4 来表示. T 确定方法的两个关键问题是弹道预测误差椭圆和定位精度,二者可参考文献[9,10].系统重规划周期确定后,可以释放相应跟踪误差过大的原子任务,转化为新任务插入扰动下的动态规划问题进行分析.

由于预测未来 t 时刻的导弹位置误差与获得目标

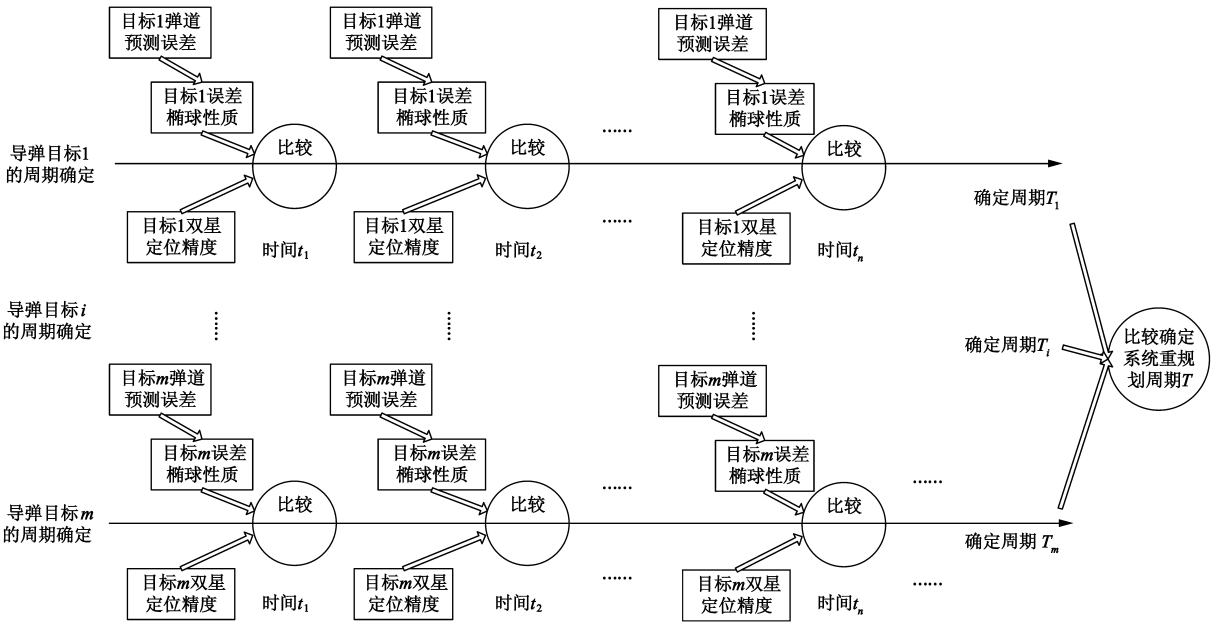


图4 重规划周期 T 的确定方法

5 动态扰动下规划模型

5.1 任务扰动的 DCSP 模型

任务扰动包括导弹目标跟踪新任务到达和任务删除或取消两种情况,前者是 $\text{Task}_{\text{insert}} \neq \emptyset$,后者会释放传感器资源,即 $\text{sensor}_{\text{release}} \neq \emptyset$,可转化为资源扰动下的动态任务规划问题,本节只考虑新任务插入情况下的动态规划模型.低轨预警系统在执行初始方案序列时,新任务会对原问题模型中任务集、时间窗口集和约束集产生直接或间接的影响.在动态规划问题 $\Theta = \{T, R, TW, C\}$ 基础上,新任务情况下的系统动态任务规划问题的 DCSP 模型可表示为: $\Theta_{\text{addtask}} = \{\Theta_0, S_0, T_{\text{new}}, TW_{\text{new}}, C_{\text{add}}\}$.其中, Θ_0 为低轨预警系统初始任务规划问题.

任务扰动对初始方案中的任务集、时间窗口集的影响如下:新增加的任务集为 T_{add} ,其中 $T_{\text{add}(i)} = \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_n^i\}$,则 $T_{\text{new}} = T_0 \cup T_{\text{add}}, T_0 = \text{Task}_i$; T_{add} 与资源集 R_0 进行资源匹配和可见时间窗口计算,可得对任务 T_{add} 的可用时间窗口集为 $TW_{\text{add}}, TW_{\text{new}} = TW_0 \cup TW_{\text{add}}$.对约束集的变化如下 C_{add} :

$$\begin{cases} C_{\text{add}} = C_k \wedge C_{\text{tadd}} \\ C_k: S_{\text{new}} = S_0(t), t \notin tw_{\text{new}} \\ C_{\text{tadd}} = (D_m = 1), m \in M \end{cases} \quad (2)$$

设 T_{add} 中任务 i 的时间段要求为开始时间 t_{st}^i 、结束时间 t_{end}^i ,则 T_{add} 的时间段 tw_{new} 要求为 $(\min(t_{\text{st}}^i), \max(t_{\text{end}}^i))$; $C_k: S_{\text{new}} = S_0(t), t \notin tw_{\text{new}}$ 表示原方案中在时间段 tw_{new} 之外的任务不需要做动态调整; C_{tadd} 是对

任务执行约束,即原约束集中 C_i 的扩展.新增加约束 $C_{\text{tadd}} = (D_m = 1), m \in M$ 表示增加的任务 T_{add} 都必须执行, M 为 C_{tadd} 的下标集.除了约束 C_{add} 外, T_{add} 必须遵守原 CSP 模型中的约束,对原有的约束集 C_0 而言, T_{new} 和 TW_{new} 的增加拓展了 C_0 的约束范围,不会对 C_0 产生影响.

5.2 资源扰动的 DCSP 模型

资源扰动包括新预警资源增加和预警资源故障两种情况,前者是 $\text{sensor}_{\text{insert}} \neq \emptyset$,后者会释放故障资源安排的任务,即 $\text{Task}_{\text{release}} \neq \emptyset$.资源扰动主要引起资源集的变化,从而导致对导弹目标任务的可见时间窗口集发生变化,新预警资源增加不会对初始规划调度方案产生显著影响,本文主要建立预警资源故障扰动下的 DCSP 模型.预警资源故障下的系统动态任务规划问题的 DCSP 模型表示为: $\Theta_{\text{resfault}} = \{\Theta_0, S_0, T_d, R_{\text{new}}, TW_{\text{new}}, C_{\text{add}}\}$.其中 T_d 为已故障的资源集合上安排的任务集合;设故障资源集合为 R_f ,其对各导弹目标的可用时间窗口集为 TW_f, R_{new} 为 R_0 除去 R_f 的集合; TW_{new} 为 TW_0 除去 TW_f 的集合. C_{add} 用 $S_{\text{new}} = S_0(t), t \notin tw_{\text{new}}$ 来表示, tw_{new} 表示资源故障的时间段.令故障开始时间和资源的修复时间分别为 tw_{mewstart} 和 tw_{mewend} ,则 tw_{new} 为 $(tw_{\text{mewstart}}, tw_{\text{mewend}})$.

5.3 动态规划模型分析

将失效预警资源无法完成的任务记为 TASK_{off} ,如果将 TASK_{off} 看成是到达的新任务集合 T_{new} ,则资源故障情况下动态规划调度问题可转化为新任务到达情况下动态规划调度问题.转化过程为:

(1) 将预警资源失效而无法完成的任务从 $\text{Task} = \{\text{Task}_1, \text{Task}_2, \dots\}$ 中滤除. 记过滤后的任务集合为 Task_{on} .

(2) 确定过滤不可用的预警资源失效时段 TW_f . 记过滤后的预警资源对目标的可见时间窗口为 TW_{new} .

(3) 按可用预警资源的时间窗口 TW_{new} 对失效任务集合 Task_{off} 进行任务预处理, 形成跟踪原子任务集合 Task_{off} . 并将 Task_{off} 作为新增加任务插入到规划体系当中, 按照新任务到达方式对 Task_{off} 和 Task_{on} 执行重规划调度操作.

通过上述转化关系, 在后续求解过程中只需考虑新任务插入情况下系统动态任务重规划调度. 在 DCSP 模型的基础上, 低轨预警系统动态任务规划目标函数采用两级阶梯优化, 第一级优化目标保证动态调整的方案在跟踪精度、资源利用率和松弛度综合指标值在一定范围内尽量小(按照初始规划建模方法得到), 第二级优化目标是对初始规划方案的最小化调整幅度, 即动态扰动测度最小.

一级目标:

$$f = \frac{1}{(E_{\text{Task}})^{\lambda_3}} \cdot \left(\frac{E_{\text{GDOP}}}{\max_{i,j} (P_i^j \times \text{GDOP}_i^j)} \right)^{\lambda_1} \cdot (E_{\text{Lax}})^{\lambda_2} \cdot (E_n)^{\lambda_4} \quad (3)$$

式中 E_{GDOP} 为跟踪精度指标, E_{Lax} 为资源松弛度指标, E_{Task} 为任务完成率指标, E_n 为卫星传感器切换率指标, 各变量的具体含义见文献[11].

二级优化目标(动态扰动测度最小):

$$\text{Min: } \tau(S_0, S_{\text{new}}) = \frac{\gamma_{\text{del}} N_{\text{del}} + \gamma_{\text{adj}} N_{\text{adj}}}{N} \quad (4)$$

$\tau(S_0, S_{\text{new}})$ 为动态扰动测度.

6 动态规划启发式求解方法

变邻域搜索^[12]是一种致力于以简单方式求解问题的启发式方法, 已广泛应用于解决组合优化问题. 针对低轨预警系统任务动态规划问题的特点, 本文提出的变邻域搜索算法总体流程如图5所示.

算法主要由新任务直接插入、任务重新分配、任务替换和任务删除等过程组成. 新任务直接插入是指在不影响原任务序列顺序的情况下直接插入新任务, 该方式可以保证调度方案的稳定性. 任务重新分配是指在不删除原方案任务的情况下将与新任务相冲突的任务插入到其他资源的时间窗口中, 新任务插入到原任务时间窗口中, 该方式会造成规划调度方案中部分任务安排的资源和时间发生变化. 任务替换是指在无法直接插入和重新分配的情况下, 为了进一步提高规划调度方案性能, 用高优先级的新任务替代原方案中低

优先级任务, 该方式会删除原方案中的任务, 对原方案的稳定性有一定影响. 任务删除是指在前三种方式都无法满足的情况下, 删除新原子任务, 放弃对其进行资源安排. 在有新任务情况下的动态规划中, 依次进行直接插入、任务重新分配、任务替换和删除操作的尝试, 然后进行迭代, 得出较为理想的动态规划调整方案. 算法的核心思想是: 通过函数 $\text{InitialSolution}()$ 获取初始任务规划方案 S_0 , 从 S_0 出发对新原子任务 Task_{new} 进行直接插入操作, 最大限度保证原规划调度方案的稳定性, 记录无法插入的新任务集 $\text{Task}'_{\text{new}}$, 基于资源等约束, 并通过函数 $\text{Conflict}(S_0, \text{Task}'_{\text{new}})$ 构建 $\text{Task}'_{\text{new}}$ 的冲突集 (\bar{T}, \bar{C}) , 然后调用函数 $\text{Reassign}(\text{Task}'_{\text{new}})$ 、 $\text{Replace}(\text{Task}'_{\text{new}})$ 、 $\text{Delete}(\text{Task}'_{\text{new}})$ 完成在相关邻域结构内对解的搜索, 获得局部最优解 S^* , 然后进行迭代, 在满足算法终止条件下输出动态规划的最优解方案 S_{new} .

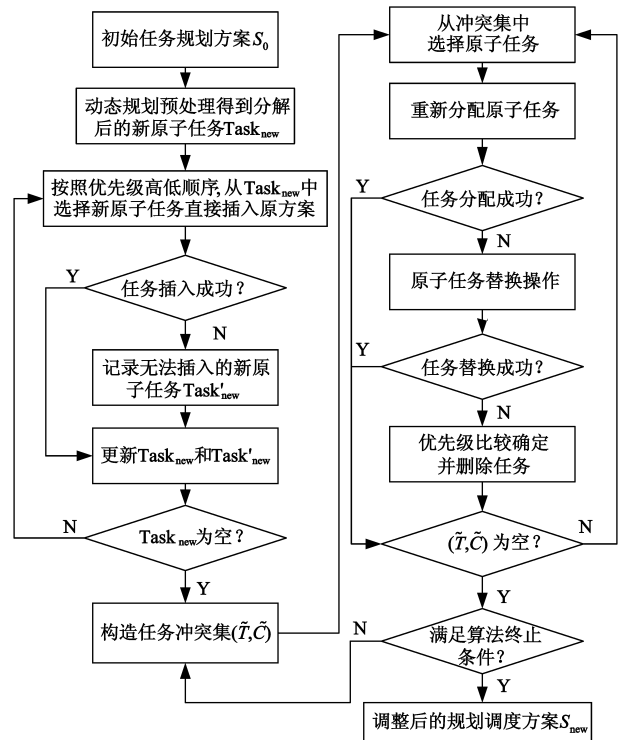


图5 算法总体流程

7 案例分析

针对文中的动态任务规划模型和设计的变邻域启发式求解算法, 本节设计典型的动态任务规划实例进行分析, 说明模型和算法的可行性和有效性, 与之比较的方法是完全重规划方法、插入和替换邻域算法. 其中算法的复杂性用平均运行时间 t 来体现.

采用星座构型为 24/3/2 的 Walker 星座进行仿真, 卫星轨道高度 1577.93km, 轨道倾角 51.856°, 第一个轨

道面的第一颗卫星的升交点赤径为 44.702° , 纬度幅角为 29.694° , 传感器最大探测距离为 7000km , 引入的方位角和俯仰角误差为 $80\mu\text{rad}$. 采用内存为 4G 的 Intel(R) Core(TM) i3 CPU 3.2GHz 的计算机, 使用 matlab 工具对算法编程进行仿真, 仿真过程时间为 1 Jul 2012 12:00:00.000 至 2 Jul 2012 12:00:00.000. 算法的仿真参数为: 迭代次数为 50, 优化目标中 λ_1 取 0.3, λ_2 取 0.2, λ_3 取 0.2, λ_4 取 0.3, γ_{del} 为 0.6, γ_{adj} 为 0.4.

主要分 3 种情况进行分析: 第 1 种情况是系统中有 1 个导弹目标(M1), 并正在执行初始任务规划方案, 系统新发现并确认 1 个新导弹目标(M2), 需要对其任务规划, 即是在面向单目标初始任务规划方案中, 针对 1 个新目标任务插入的动态任务规划; 第 2 种情况是在面向 2 个目标初始任务规划方案中(M1 和 M2), 针对 2 个新目标任务插入的动态任务规划(M3 和 M4); 第 3 种情况是在面向 3 个目标的初始任务规划方案中(M1、M2 和 M3), 针对 2 个新目标任务插入的动态规划实例(2 个 M4). 其中目标 M1 的发射点 S-13, E76, 落地为 N48, E106, 导弹飞行时间为 1550s , 发射时间为 1 Jul 2012

12:10:00.000, 威胁度值为 3. M2 发射点 N3, E59, 落地为 N30, E112, 导弹飞行时间为 1500s , 发射时间为 1 Jul 2012 12:11:00.000, 威胁度值为 2.5. 目标 M3 的发射点、落点和飞行时间和 M1 一样, 发射时间比 M1 晚 1min . 目标 M4 的属性和目标 M2 一致, 发射时间比 M1 晚 0.5min .

对以上 3 种动态规划实例重复进行 30 次实验统计规划结果, 三种规划方法的各指标平均值如表 1 所示, 其中平均跟踪精度 GDOP、资源松弛度 E_{Lax} 、传感器切换率 E_n 、适应度 f 、方案调整率 τ 和算法平均运行时间 t 指标越小越好, 任务完成率 E_{Task} 指标越大越好. 综合各个指标值可以看出, 完全重规划方法在 GDOP、 E_{Lax} 、 E_n 、 f 等指标上的规划质量较好, 但方案调整率 τ 太高, 不符合最小调整的动态规划原则; 插入和替换邻域算法能够较快获得动态规划方案, 但规划质量较差; 本文的变邻域启发式算法在动态规划质量、初始方案调整幅度、时效性等方面都较好, 能够满足动态规划基本原则, 而且目标数越多, 和其他两种方法相比优势更明显.

表 1 不同实例的动态任务规划性能 30 次实验统计对比

动态规划实例	规划方法	GDOP	E_{Lax}	E_{Task}	E_n	f	τ	t
初始规划 1 个目标、新插入 1 个目标	DPSO-SA 完全重规划	337.0919	0.2164	1	0.3948	3.1539	0.1635	10.91s
	插入和替换邻域算法	338.7703	0.2219	1	0.3648	3.1298	0	6.52s
	变邻域启发式搜索算法	338.7703	0.2219	1	0.3648	3.1298	0	6.52s
初始规划 2 个目标、新插入 2 个目标	DPSO-SA 完全重规划	469.2514	0.3521	0.8101	0.6085	4.6145	0.3927	13.55s
	插入和替换邻域算法	530.4296	0.3993	0.7796	0.5693	4.6467	0.2446	8.92s
	变邻域启发式搜索算法	524.8939	0.4082	0.8492	0.5667	4.5954	0.2035	9.10s
初始规划 3 个目标、新插入 2 个目标	DPSO-SA 完全重规划	475.3216	0.3654	0.8024	0.6136	4.6183	0.4227	14.39s
	插入和替换邻域算法	548.5135	0.3988	0.7654	0.5702	4.6501	0.2736	9.12s
	变邻域启发式搜索算法	539.6447	0.4012	0.8341	0.5695	4.6157	0.2209	9.34s

8 结束语

任务规划对于提高低轨预警系统资源利用率、增强系统对导弹跟踪能力具有重要作用. 不同扰动因素下的低轨预警系统动态任务规划可统一归纳为新任务插入扰动下的动态规划问题进行求解, 求出的动态规划方案作为下一动态事件扰动下的初始任务规划调度方案, 使动态规划形成一个高效的闭环. 本文针对动态扰动下的低轨预警系统任务规划问题, 从其动态扰动因素特点、动态任务规划模式、重规划周期、动态规划模型和求解方法等方面进行了比较系统的界定和分析研究, 并进行了案例分析, 明确了低轨预警系统动态任务规划问题的基本内涵, 有助于动态任务规划问题的进一步研究.

参考文献

- [1] 简平, 邹鹏, 熊伟, 等. 天基低轨预警系统任务规划问题研究[J]. 空军工程大学学报(军事科学版), 2011, (4): 26-29.
JIAN Ping, ZOU Peng, XIONG Wei, et al. Research on the original task planning problem of early warning system of LEO [J]. Journal of Air Force Engineering University (Military Science Edition), 2011, (4): 26-29. (in Chinese)
- [2] 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, 13(4): 72-74.
Guo Hao-bo, WANG Ying-long, ZENG Hui. Sensor scheduling for missile early-warning satellite based on genetic and simulated annealing algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2006,

- 13(4):72-74. (in Chinese)
- [3] 薛永宏, 王博. 低轨星座传感器调度方法[J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(5): 19-23.
XUE Yong-hong, WANG Bo. LEO constellation sensor scheduling algorithm [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(5): 19-23. (in Chinese)
- [4] 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): 2630-2634.
CHENG Hong-wei, WANG Bo, AN Wei. A sensor scheduling method of LEO constellation based on information decision tree [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2630-2634. (in Chinese)
- [5] Deng Yong, Sun Fuchun, Zhang Zhongzhao. A heuristic method for sensor scheduling in infrared LEO constellation [A]. Proceedings of the 6th International Conference on Natural Computation [C]. USA: IEEE, 2010. 3692-3696.
- [6] 罗开平, 姜维, 李一军. 传感器管理述评[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1900-1907.
LUO Kai-ping, JIANG Wei, LI Yi-jun. Review of sensor management [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1900-1907. (in Chinese)
- [7] 邱涤珊, 黄维, 黄小军, 王慧林. 多类扰动下电子侦察卫星动态调度问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(5): 239-243.
Qiu Dishan, Huang Wei, Huang Xiao jun, Wang Hui lin. Research on dynamic scheduling for electro-magnetic detection satellite under multi-disturbances [J]. Computer Engineering Applications, 2012, 48(5): 239-243. (in Chinese)
- [8] Tang Shao-xun, Yi Xian-qing, Luo Xue-shan. Research on early-warning detecting tasks re-scheduling and sensor resources allocation strategy of midcourse maneuverable ballistic targets [A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications [C]. USA: IEEE, 2010. 357-362.
- [9] 郭同德, 贾军国. 误差椭球的性质及其在置信域问题中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 27(3): 116-118.
Guo Tong-de, JIA Jun-guo. The properties of error ellipsoid and its applications in confidence regions of points [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 27(3): 116-118. (in Chinese)
- [10] 王博, 周一宇, 鲁建华等. 基于实值粒子群优化的 STSS 系统传感器管理算法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7287-7291.
WANG Bo, ZHOU Yi-yu, LU Jian-Hua. Research on sensor management algorithm of STSS based on real-number particle swarm optimization [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7287-7291. (in Chinese)
- [11] JIAN Ping, ZOU Peng, XIONG Wei. Research on the original task planning model of early warning system of LEO [A]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Science and Information Engineering [C]. USA: IEEE, 2012. 92-96.
- [12] Wang Pei, Tan Yue-jin. A heuristic method for selecting and scheduling observations of satellites with limited agility [A]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. USA: IEEE, 2008. 5292-5297.

作者简介



简平男, 1985年7月出生, 江西新余人. 2013年毕业于解放军装备学院, 在装备学院复杂电子系统仿真实验室工作, 从事信息系统设计理论与方法、任务规划方面的研究工作.

E-mail: jianping85730@sina.com

邹鹏男, 1957年6月出生, 山东高清人. 教授、博士生导师, 现在解放军装备学院复杂电子系统仿真实验室工作, 从事计算机网络安全、国产操作系统、任务规划方面的研究.