

控制与决策

Control and Decision

基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

李夏苗, 廖文昆, 伍国华, 陈黄科, 路辉, 陈新江

引用本文:

李夏苗, 廖文昆, 伍国华, 等. 基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1147–1156.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1193>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions

控制与决策. 2021, 36(5): 1191–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

Planning model and parallel competing memetic algorithm for space–near space–air based cooperative earth observation missions

控制与决策. 2021, 36(3): 523–533 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

基于双层规划的高超声速飞行器预警资源分配方法

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

控制与决策. 2021, 36(2): 443–449 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0717>

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>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm

控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法

李夏苗¹, 廖文昆¹, 伍国华^{1†}, 陈黄科², 路辉², 陈新江¹

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075; 2. 国防科学技术大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为提高空天观测资源协同观测能力, 基于分而治之的框架, 提出一种两阶段迭代优化方法以解决空天观测资源协同任务规划问题. 第1阶段, 根据观测机会和冲突度构造适应度函数, 基于适应度将任务分配到合适的子规划中心; 第2阶段, 子规划中心根据分配到的任务进行资源调度, 得到各类观测资源的观测计划, 并将资源观测方案和观测收益反馈给第1阶段. 第1阶段再根据第2阶段的反馈结果, 结合禁忌表策略, 对任务分配方案进行迭代调整和更新, 直到生成近似最优或满意的任务分配方案和资源观测方案. 为验证所提出方法的有效性, 开展大量仿真实验. 实验结果表明, 与最大权重最先分配算法、基于适应度的任务分配算法、基于资源优先度的任务分配算法相比, 所提出方法在任务收益率方面提高了2.40%~14.14%. 研究成果可为空天观测资源传感网络的协同管控提供技术支持.

关键词: 空天观测资源; 对地观测; 任务分配; 协同规划框架

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1193

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李夏苗, 廖文昆, 伍国华, 等. 基于两阶段迭代优化的空天观测资源协同任务规划方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1147-1156.

A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources

LI Xia-miao¹, LIAO Wen-kun¹, WU Guo-hua^{1†}, CHEN Huang-ke², LU Hui², CHEN Xin-jiang¹

(1. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. College of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to improve the coordinated observation efficiency of space and air observation resources, this study proposes a two-stage iterative optimization method to solve the coordinated task planning problem of space and air resources, which is under the divide and conquer framework. In the first stage, the fitness function is formed according to two indices, i.e., observation opportunity and conflict degree. And tasks are assigned to different sub-planners based on the fitness value. In the second stage, each sub-planner schedules observation resources according to the assigned tasks and generates corresponding task planning schemes. The resources observation schemes and related observation profit are returned to the first stage. Iteratively, the resources observation scheme is adjusted and updated to generate approximate optimal or satisfied task assignment schemes and resources observation schemes by using a tabu-list based optimization strategy, with the consideration of the feedback of task planning schemes. In order to verify the effectiveness of the proposed two-stage iterative optimization method, this study has done extensive simulated experiments. The results show that the proposed method can increase the total task profits by about 2.40%~14.14%, compared with the highest weight first assignment (HWFA) algorithm, the task assignment algorithm based on fitness value (TAAV) and the task assignment algorithm based on resource priority (TAARP). The achievement of this study can realize the effective coordinated task planning for space and air observation resources.

Keywords: space and air observation resources; earth observation; task assignment; coordinated planning architecture

0 引言

空天观测资源协同任务规划问题是利用空基平台和天基平台的各类异构观测载荷资源, 根据其运行

方式、机动能力、滞空能力、载荷特点等, 通过协同优化的方式对地面目标和海上目标等观测任务分配合理的观测资源并确定执行时间, 充分发挥天基资源和

收稿日期: 2019-08-22; 修回日期: 2019-11-26.

基金项目: 湖南省自然科学杰出青年基金项目(2019JJ20026); 国家自然科学基金青年基金项目(61603404).

责任编辑: 王凌.

†通讯作者. E-mail: guohuawu@csu.edu.cn.

空基资源的互补优势,最大化整体观测收益.一般而言,由无人机和飞艇为主构成的观测系统称为空基平台,以光学遥感卫星和SAR遥感卫星为主构成的观测系统称为天基平台.

单一类型的观测平台在情报侦察、战场监视、水体监测、目标跟踪、气象观测等方面应用广泛^[1-4],取得了较好的效果.然而各类观测平台孤立地执行观测任务,缺乏协同交互,如果要完成大量复杂的、面对应急条件下的观测任务,则观测平台所管控的观测资源需要从多维度、多时空、多层次的角度采集目标数据,单一类型的观测平台由于其资源和能力限制,无法满足其任务需求.一般而言,即使是同类观测资源,因为受不同的部门和机构管理,单一类型的观测平台也会被划分为众多的观测子系统.而各观测子系统由于缺乏交互,导致对部分观测任务重复进行采集数据,造成资源浪费^[5].

针对上述问题, Morris等^[6-7]和 Herold^[8]提出了分层分布式框架集成各类观测资源,将观测资源按照类别划分为多个子规划中心,并设立一个协同者接受用户提交的观测请求,根据一定的规则将观测请求分配给子规划中心去完成.目前,该任务规划框架受到了较多认可.

在求解空天观测资源协同任务规划问题上,大部分学者都是基于上述规划框架进行研究.白国庆等^[9]在顶层采用遗传算法进行任务分配,在底层采用分治-合作策略对任务进行规划.余婧^[10]提出了基于合同网思想的任务分配方法,将任务分配给卫星和飞艇观测系统,在飞艇观测系统采用多飞艇观测任务重调度算法,在卫星观测系统采用卫星多准则任务规划方法.李军^[11]提出了基于市场模型的异构MAS多阶段协同任务规划模型和基于自适应“超级步”的资源Agent协同任务规划算法,将卫星观测系统和无人机观测系统看作独立的资源Agent,针对卫星Agent采用遗传算法,针对无人机Agent采用粒子群算法. Wu等^[12]以总效用值作为目标函数评价任务分配方案的质量,通过最大化目标函数值得到空天观测资源协同任务分配方案,并设计了结合禁忌表的模拟退火算法进行任务规划.梁星星等^[13-15]构建了面向海上移动目标的连续观测模型,提出了空天连续观测策略,对海上移动目标使用卫星进行观测,协同者根据卫星的观测结果设计遗传算法对无人机进行路径规划.

从现有的研究文献可以看出,由于观测资源的异构性,不同类型的观测资源在运行方式、使用约束等方面差异巨大,采用精确算法和协同进化的智能优化

算法求解时间成本过高,为了降低时间开销,大多数学者都采用先进行任务分配,再进行观测资源调度的两阶段方法,较少学者研究任务分配和观测资源调度不断迭代调整和更新的两阶段迭代优化方法.

本文在分析面向地面点目标观测和空天观测资源(无人机和卫星)协同任务规划问题的基础上,具体贡献与创新点如下:

1) 基于分而治之框架,提出了解决空天观测资源协同任务规划问题的两阶段迭代优化方法.分而治之是指异构观测资源由不同的子规划中心管控,子规划中心具有独立性和自治性,为分配到的任务制定观测计划.两阶段迭代优化方法对任务分配方案和资源观测方案进行迭代优化,从而最大化整体观测收益.

2) 设计了基于观测机会和冲突度的适应度函数作为任务分配给子规划中心的评价函数,并引入禁忌表策略,可较为快速地获得近似最优解.根据仿真实验,引入禁忌表策略与不引入禁忌表策略的任务分配算法以及基于资源优先度的任务分配算法相比,所提出算法在任务收益率上分别提升约3%和5%.

1 空天观测资源协同任务规划问题描述

空天观测资源协同任务规划问题的基础是无人机调度和卫星调度问题,对两类问题进行拓展和延伸便是多无人机观测平台与多卫星观测平台融合的观测资源协同调度问题.本文研究的多无人机观测资源调度问题(即多无人机任务规划问题)和多星调度问题如文献[16-17]所示,其约束主要包括唯一性约束(同一个任务只能被观测一次)、可见时间窗约束、持续观测时间约束、连续观测转换时间约束、传感器累计开关机次数限制和传感器累计开机时间限制、最大航程限制等.

在分析文献[16-17]研究问题和数学模型的基础上,对空天观测资源协同任务规划问题作出具体描述.假设有 M 个任务, $T = \{1, 2, \dots, M\}$ 是待观测的任务集合,空天资源协同观测系统的观测资源集合设为

$$R = \{r_u, r_s | u = 1, 2, \dots, N_V, s = 1, 2, \dots, N_A\}.$$

其中: N_V 为无人机的数量, N_A 为卫星的数量.

$BPos = \{[Blon_u, Blat_u]\}$ 表示无人机 u 的基地地理坐标, $S = \{SAT_\alpha, UAV_\beta | \alpha = 1, 2, \dots, N_S, \beta = 1, 2, \dots, N_U\}$ 为子规划中心集.其中: SAT_α 表示第 α 个卫星子规划中心, UAV_β 为第 β 个无人机子规划中心,并且每个子规划中心管控若干个同类观测资源.

1) 任务需求特征要素.

任务需求特征要素可以用一个五元组 $\{p_i, dur_i, t_{start_i}, t_{end_i}, pos_i\}$ 表示. 其中: p_i 为任务 i 的优先级, 用来衡量任务的重要程度, 用权重表示, 权重越大优先级越高; dur_i 为任务 i 的持续观测时间; $[t_{start_i}, t_{end_i}]$ 为任务 i 的服务时间窗, 如果观测资源不在服务时间窗内执行任务 i , 则观测无效, t_{start_i} 为任务 i 的最早可观测时刻, t_{end_i} 为任务 i 的最晚结束观测时刻; pos_i 为任务 i 的地理坐标, 用 $[lon_i, lat_i]$ 表示, lon_i 为任务 i 的纬度坐标, lat_i 为任务 i 的经度坐标.

2) 资源能力特征要素.

资源能力特征要素可以用一个六元组 $\{ts_{i,r}^l, k, te_{i,r}^l, sw_{ij,r}, M_r, E_r, D_r\}$ 表示. 其中: $[ts_{i,r}^l, te_{i,r}^l]$ 为任务 i 在观测资源 r 下的第 l 个可见时间窗口, $ts_{i,r}^l$ 为第 l 个可见时间窗口的最早可见时刻, $te_{i,r}^l$ 为第 l 个可见时间窗口的最晚可见时刻; $sw_{ij,r}$ 为观测资源 r 连续观测任务 i 和任务 j 所需的转换时间, 即无人机从任务 i 飞到任务 j 的飞行时间, 卫星连续观测任务 i 和任务 j 的姿态调整时间; M_r 、 E_r 分别为观测资源 r 的传感器最大累计开关机次数和最长累计开机时间, 假设卫星和无人机只有在观测任务时传感器才开机, 当观测结束后传感器关机; D_r 为无人机的最大航程.

根据上述定义, 空天观测资源协同任务规划问题可以描述为: 在满足任务需求和资源能力的各类约束下, 通过协同优化的方法, 确定最优的任务分配方案 P , 将待观测任务分配给不同的子规划中心, 子规划中心调度管控的观测资源对分配到的任务确定最优的资源观测方案, 最大化空天观测系统的整体观测收益.

2 空天观测资源协同任务规划框架

在分析任务需求和资源能力的基础上, 提出基于分而治之框架解决空天观测资源协同任务规划问题的两阶段迭代优化方法. 如图1所示, 该框架分为两个阶段, 第1阶段是任务分配阶段, 根据任务需求和子规划中心的资源能力, 设计高效的任务分配启发式算法将待观测的任务分配给子规划中心; 第2阶段是子规划中心的观测资源调度阶段, 子规划中心在满足任务需求和资源能力约束的情况下, 设计观测资源优化调度算法, 确定一个最优的资源观测方案, 最大化子规划中心局部的观测收益.

在迭代优化时, 首先判断是否满足终止条件, 如果不满足则将子规划中心的资源观测方案合并反馈给第1阶段. 第1阶段根据反馈结果对原任务分配

方案进行迭代调整和更新, 生成更优的任务分配方案. 子规划中心重新进行观测资源的调度, 从而最大化整体观测收益.

在任务分配阶段, 设计基于禁忌表策略的任务分配算法(task assignment algorithm based on tabu list, TAATL)对待观测任务进行分配. 在观测资源调度阶段, 子规划中心对分配的任务集进行观测资源的调度, 无人机子规划中心采用结合禁忌表策略的模拟退火算法, 卫星子规划中心采用混合蚁群算法^[18]. 多无人机调度问题和多星调度问题的研究相对成熟, 在优化框架中集成上述已有多无人机和多星调度算法求解, 本文重点解决面向迭代优化的协同任务分配问题.

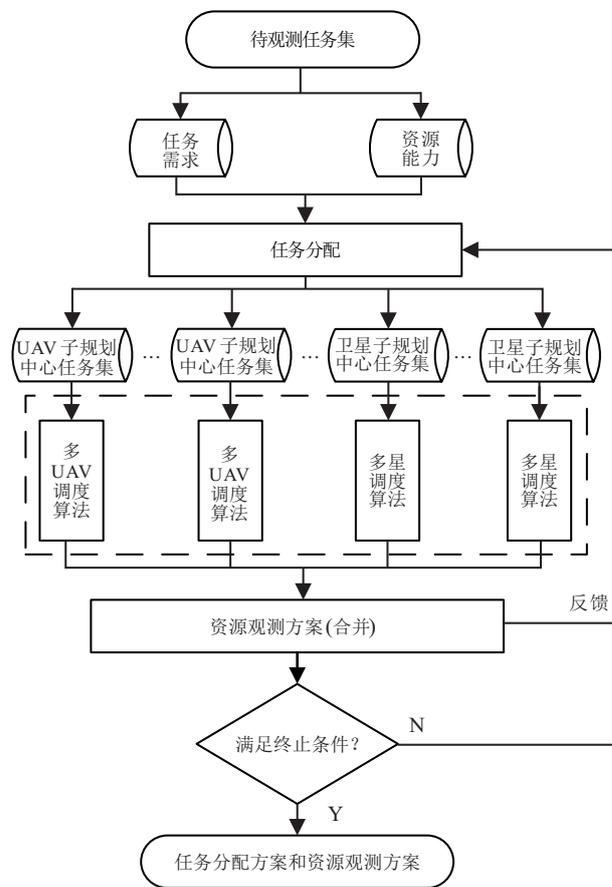


图1 空天观测资源协同任务规划框架

3 基于禁忌表策略的任务分配算法

为解决面向迭代优化的协同任务分配问题, 设计基于禁忌表策略的任务分配算法. 该算法提出了观测机会和冲突度两个启发式准则, 根据观测机会和冲突度构造适应度函数, 作为将待观测任务分配到子规划中心的标准, 得到初始任务分配方案. 在迭代优化过程中, 根据观测资源调度阶段的反馈结果, 结合禁忌表策略, 迭代调整原任务分配方案, 生成更优的任务分配方案.

3.1 启发式准则计算

3.1.1 观测机会

对观测机会进行量化,在一个调度周期内,任务在观测资源下的观测机会数量等于任务在该观测资源下的可用时间窗数量.可用时间窗即任务在该观测资源下的可见时间窗 $[ts_{i,r}^k, te_{i,r}^k]$ 和任务服务时间窗 $[t_start_i, t_end_i]$ 的交集,且满足

$$[[ts_{i,r}^k, te_{i,r}^k] \wedge [t_start_i, t_end_i]] \geq dur_i. \quad (1)$$

式(1)表示两个时间窗交集部分的长度大于等于任务的持续观测时间.定义任务 i 在观测资源 r 观测下的可用时间窗集合为

$$TW_{ir} = \{[tws_{ir}^l, twe_{ir}^l] | l = 1, 2, \dots, z_{ir}\},$$

其中 z_{ir} 为任务 i 在观测资源 r 下的可用时间窗数量,即任务 i 在观测资源 r 下的观测机会数量.

通过 STK 软件构造场景,可获得任务在卫星观测下的可见时间窗集合.由于卫星在一个调度周期内绕地球运动多圈,导致任务在卫星观测下的可见时间窗可能超过1个.根据式(1),任务在卫星观测下的可用时间窗数目也可能超过1个.

3.1.2 冲突度

由于资源能力和任务服务时间窗的约束,待分配的任务与已分配的任务可能会发生冲突.冲突具体表现为待分配任务分配到子规划中心后,会干扰子规划中心管控的观测资源对已分配任务的执行,或者执行待分配的任务需要消耗过多的资源.

任务 i 插入到不同的可用时间窗,冲突度也不一样.如果两个任务由不同的观测资源观测,则两个任务发生冲突的可能性为0.因此计算任务 i 插入到可用时间窗 $[tws_{ir}^l, twe_{ir}^l]$ 的冲突度,需要预先判断已分配任务插入的可用时间窗是否属于同一观测资源 r .

假设已分配任务集中,插入的可用时间窗属于观测资源 r 的任务子集为 $T_r = \{1, 2, \dots, j, \dots, m | j \in T\}$.定义任务 i 插入到观测资源 r 下的第 l 个可用时间窗的冲突度为

$$c_{ir,j} = \sum_{j=1}^m P_{ij,r} p_j. \quad (2)$$

其中: p_j 为 T_r 中任务 j 的权重; $P_{ij,r}$ 为任务 i 与任务 j 发生冲突的可能性, $P_{ij,r} = 1$ 表示任务 i 与任务 j 一定会发生冲突, $P_{ij,r} = 0$ 表示任务 i 与任务 j 不可能发生冲突.

判断两个任务在同一颗卫星观测下是否会发生冲突,本文采用基于可用时间窗交叉的冲突判断方法.当可用时间窗交叉,则认为两个任务必定发生冲

突,即 $P_{ij,r} = 1$, 否则不发生冲突, $P_{ij,r} = 0$.

由于观测资源的异构性,任务在卫星的观测下可用时间窗很短,这种方法效果较好.但是任务在无人机的观测下可用时间窗一般较长,两个任务的可用时间窗交叉的可能性较大,却不一定会发生冲突.因此,本文针对无人机观测,提出一种基于线性几何思想的冲突可能性计算方法.任务 i 和任务 j 在无人机 u 的观测下如果可能会发生冲突,且不违反航程和任务截止期约束,则一般遵循如下公式:

$$\begin{cases} t_2 - t_1 < dur_i + \frac{d_{ij}}{V_u}, t_2 \geq t_1; \\ t_1 - t_2 < dur_i + \frac{d_{ij}}{V_u}, t_2 < t_1; \\ t_1 \in [tws_{iu}, twe_{iu}], t_2 \in [tws_{ju}, twe_{ju}]. \end{cases} \quad (3)$$

其中: t_1 、 t_2 分别为无人机 u 观测任务 i 和任务 j 的时刻, $[tws_{iu}, twe_{iu}]$ 、 $[tws_{ju}, twe_{ju}]$ 分别为任务 i 和任务 j 在无人机 u 观测下的可用时间窗.

式(3)的第1个约束条件表示如果 u 先执行任务 i , 假设在 t_1 时刻执行,则在 $[t_1, t_1 + dur_i + d_{ij}/V_u]$ 时间范围内, u 不能执行任务 j , 否则会发生冲突;第2个约束条件表示 u 先执行任务 j , 如果满足此约束则两个任务会发生冲突.

基于式(3)构建二维平面,如图2所示.若落在阴影面积内,则表示两个任务满足式(3)的约束,即两个任务会发生冲突.因此任务 i 和任务 j 发生冲突的可能性可以用阴影部分的面积除以矩形 ABCD 的面积表示,计算方法如下:

$$P_{ij,u} = \frac{\int_{a_1}^{b_1} (t_1 + \text{adjust}_1) dt_1 - \int_{a_2}^{b_2} (t_2 - \text{adjust}_2) dt_2}{(twe_{iu} - tws_{iu})(twe_{ju} - tws_{ju})} + \frac{tws_{ju}(a_1 - a_2) + twe_{ju}(b_1 - b_2)}{(twe_{iu} - tws_{iu})(twe_{ju} - tws_{ju})}. \quad (4)$$

其中 adjust_1 、 adjust_2 分别为 u 从一个任务飞往另一个任务所需要的调整时间,有

$$\begin{cases} \text{adjust}_1 = dur_i + \frac{d_{ij}}{V_u}, \\ \text{adjust}_2 = dur_j + \frac{d_{ij}}{V_u}, \\ a_1 = \max\{tws_{iu}, tws_{ju} - \text{adjust}_1\}, \\ b_1 = \max\{twe_{iu}, twe_{ju} - \text{adjust}_1\}, \\ a_2 = \max\{tws_{iu}, tws_{ju} + \text{adjust}_2\}, \\ b_2 = \max\{twe_{iu}, twe_{ju} + \text{adjust}_2\}. \end{cases} \quad (5)$$

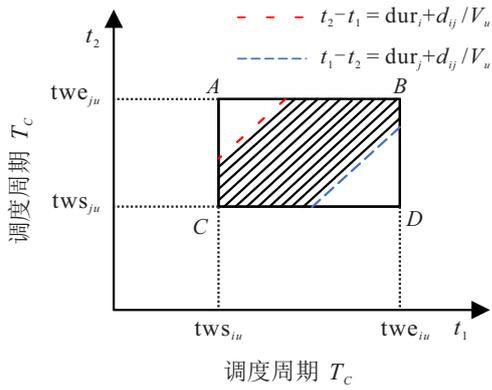


图2 冲突可能性计算方法示意图

任务在无人机观测下还可能发生最大飞行距离冲突、任务截止期冲突和不发生冲突。

最大飞行距离冲突: 假设 $d_{i,BPos_u}$ 、 $d_{j,BPos_u}$ 和 d_{ij} 表示任务 i 和任务 j 分别与无人机 u 基地 $BPos_u$ 之间的距离以及任务 i 与任务 j 之间的距离。如果满足

$$d_{i,BPos_u} + d_{j,BPos_u} + d_{ij} > D_u, \quad (6)$$

则意味着 u 在一次飞行过程中同时完成任务 i 和任务 j 违反航程约束, 即任务 i 和任务 j 发生冲突的可能性 $P_{ij,u} = 1$ 。

任务截止期冲突: 由于任务具有可用时间窗的约束, 如果满足

$$tws_{ju} + \frac{d_{ij}}{V_u} + dur_j > twe_{iu}, \quad tws_{iu} \geq twe_{ju}, \quad (7)$$

则意味着在无人机 u 下, 任务 i 和任务 j 发生冲突的可能性 $P_{ij,u} = 1$ 。

式(7)表示任务 i 的最早开始时间晚于任务 j 的截止时间, 则无人机 u 在任务 j 的最早可用时间观测, 并以飞行速度 V_u 飞到任务 i 时违反了任务 i 的截止期约束。

两个任务不发生冲突: 在不违反航程约束的情况下, 如果满足

$$twe_{iu} + dur_i + \frac{d_{ij}}{V_u} \leq tws_{ju}, \quad (8)$$

则意味着在无人机 u 下, 先执行任务 i 不影响任务 j , 任务 i 和任务 j 的冲突可能性 $P_{ij,u} = 0$ 。

3.2 适应度函数

一般认为待分配的任务分配到子规划中心观测机会越多越好, 与已分配的任务冲突越小越好, 因此基于观测机会和冲突度构建适应度函数, 通过计算任务插入到观测资源下各个可用时间窗的冲突度, 根据式(9)累计计算任务在子规划中心的适应度, 并作为待分配的任务分配到子规划中心的标准。定义适应度函数为

$$U_{ik} = \sum_{r \in S_k} \sum_{l=1}^{z_{ir}} \left(1 - \frac{c_{ir,l}}{\max_{1 \leq k \leq n} \max_{r \in S_k} c_{ir,l}} \right). \quad (9)$$

其中: U_{ik} 为任务 i 在子规划中心 k 的适应度, $c_{ir,l}$ 为任务 i 插入到观测资源 r 的第 l 个可用时间窗上的冲突度, z_{ir} 为任务 i 在观测资源 r 下的观测机会数量, S_k 为子规划中心管控的观测资源集, n 为子规划中心的数量。

3.3 生成初始任务分配方案

在初始任务分配方案的生成过程中, 基于最大权重最先分配的思想, 在待观测的任务集中选择优先级最高的任务最先分配。根据任务分配给可用子规划中心的适应度, 按照适应度最大的原则将任务分配给可用子规划中心。

在任务分配到子规划中心后, 继续将任务插入到该子规划中心冲突度最小的可用时间窗, 这是为了方便继续计算下一个待分配任务的冲突度, 并不意味着任务一定在插入的可用时间窗内被观测。其在哪个可用时间窗被观测是由任务的需求、子规划中心管控的观测资源能力以及子规划中心观测资源调度算法的寻优能力等因素决定的。

将任务分配给子规划中心后, 从待观测的任务集中删除此任务, 重新选择优先级最高的任务按照上述步骤进行分配, 最终生成初始任务分配方案。

3.4 迭代优化方法

任务分配方案采用 0-1 编码的方式, 如图3所示。当基因位为 1 时, 表示该任务分配给该子规划中心, 否则不分配。任务分配方案迭代优化的主要步骤如下。

step 1: 根据任务分配方案 P 进行观测资源的调度, 得到当前任务分配方案下的资源观测方案 G 和任务收益值 $f(P)$ 。

step 2: 根据资源观测方案 G 得到未被调度的任务集 UT , 在任务分配方案 P 中删除任务集 UT 中任务, 即在任务分配方案 P 中将任务集 UT 中任务对应的基因位由 1 变为 0, 删除操作如图3所示, 删除完毕后得到过渡任务分配方案 PS 。

step 3: 结合禁忌表策略, 根据删除任务的启发式规则对任务分配方案 PS 的部分任务进行删除, 删除的任务划分到任务集 UT 中。

step 4: 根据观测资源调度的结果, 将任务分配方案 PS 中基因位为 1 的任务插入到任务在资源观测方案中选择的可用时间窗中。

step 5: 结合禁忌表策略, 将任务集 UT 中的任务

重新分配到适应度最大的可用子规划中心,并继续插入到该子规划中心冲突度最小的可用时间窗.分配完毕,生成一个完整的任务分配方案 P' ,分配任务的操作如图3所示.

step 6: 更新禁忌表,并根据任务分配方案 P' 进行观测资源的调度,得到资源观测方案 G' 和任务收益值 $f(P')$.

step 7: 将 $f(P')$ 与原任务分配方案的任务收益值 $f(P)$ 进行比较,如果优于原方案,则用 P' 替换 P , G' 替换 G ,否则原任务分配方案 P 和 G 保持不变.

step 8: 是否满足终止条件,如果满足,则算法结束,否则返回step 2.

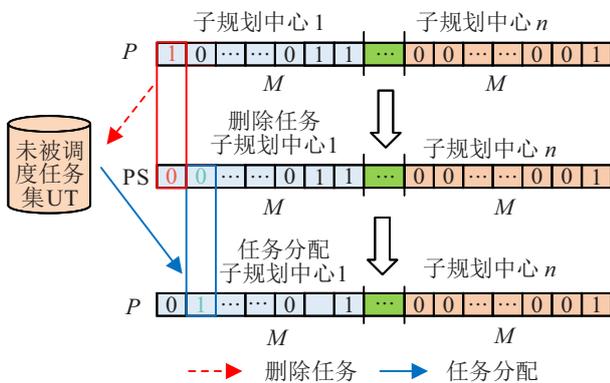


图3 解的编码方式及邻域结构

1) 禁忌表策略.

构造两个禁忌表,禁忌表 tabu_1 对删除任务的操作进行禁忌,删除任务按照4个启发式规则从子规划中心删除任务,即在任务分配方案 PS 上将对应位置的基因位由1变为0.如果任务重新分配后被调度,则将此任务从子规划中心删除的操作加入到 tabu_1 .禁忌表 tabu_2 对任务分配到某个子规划中心的操作进行禁忌,当任务分配到某个子规划中心后却没有被调度,则将此任务分配该子规划中心的操作加入到 tabu_2 .禁忌表的作用是对近期执行的搜索操作进行记忆,并对某些操作进行禁忌和解禁,可以避免算法快速陷入局部循环.

2) 删除任务分配方案 PS 中的部分任务.

本文提出的两种邻域结构,其中一种为删除邻域结构,即通过改变任务分配方案 PS 中部分位置的基因位来变换到原任务分配方案的邻域解.删除邻域结构通过启发式规则引导删除操作,将任务分配方案 PS 中部分位置的基因位由1变为0,由任务分配方案的迭代优化的主要理论及步骤可知,任务分配方案 PS 中基因位为1的任务即为子规划中心资源观测方案中被调度的任务,当基因位从1变为0后,任务在资源观测方案中被删除,需要重新进行分配.在删除任

务分配方案 PS 中的部分任务时,设计4个启发式规则,在4个启发式规则中引入禁忌表策略.

启发式规则1 随机选择一个子规划中心,若为卫星子规划中心,则为任务集 UT 中的任务随机选择一个在该卫星子规划中心下的可用时间窗.从该子规划中心调度的任务集中,删除与任务集 UT 累计冲突最大的任务.若为无人机子规划中心,则从其调度的任务集中删除与该任务集中其他任务累计冲突最大的任务.若删除该任务的操作被禁忌,则选择下一个累计冲突最大的任务进行删除.

启发式规则2 随机选择一个子规划中心,删除该子规划中心调度的任务集中权重最小的任务,若删除该任务的操作被禁忌,则选择下一个权重最小的任务进行删除.

启发式规则3 随机选择一个子规划中心,在该子规划中心调度的任务集中随机删除一个任务,若被禁忌,则随机选择下一个任务进行删除.

启发式规则4 从所有无人机子规划中心调度的任务集中,选择可以获得最大节省航程资源的任务进行删除.该操作可以在一定程度上减少任务对无人机航程资源的平均消耗,间接提高无人机的总体观测收益.若删除该任务的操作被禁忌,则选择下一个可以获得最大节省航程资源的任务进行删除.

3) 分配任务集 UT 中的任务.

第2种邻域结构为分配任务邻域结构,将任务集 UT 中的任务重新分配给子规划中心,生成一个完整的任务分配方案.在分配 UT 中的任务前,将任务分配方案 PS 中基因位为1的任务插入到任务在资源观测方案中选择的可用时间窗中.

在分配 UT 中的任务时,选择优先级最高的任务重新计算适应度,将该任务分配给适应度最大的可用子规划中心,并继续插入到冲突度最小的可用时间窗.如果该分配操作被禁忌,则将任务分配给下一个适应度最大的可用子规划中心.分配完成后,从任务集 UT 中删除此任务,重复执行上述操作,直到 UT 中的任务被分配完毕为止.

4 实验仿真

在配置为2.80 GHz Intel Core CPU、8 GB内存、Win10操作系统的PC机上,使用Matlab 2018b进行仿真实验.假设有7颗卫星,7架无人机.子规划中心1和子规划中心2分别控制4颗和3颗卫星,子规划中心3和子规划中心4的基地分别是基地1和基地2,分别控制4架和3架无人机.待观测任务的可见时间窗使用STK软件仿真生成,参数如表1所示.

表1 实验参数表

参数	设置
任务点规模/个	200, 400, 600, 800, 1000
任务点的权重	[1, 10]
任务所需持续观测时间/s	[1, 10]
无人机最大飞行速度/(km/h)	1440
无人机、卫星最大持续开机时间/s	3000
无人机、卫星最大开关机次数	200
无人机最大巡航半径/km	2500
无人机基地位置1	(27°N, 95°E)
无人机基地位置2	(29°N, 105°E)
完成每个任务所需开关机次数	1
任务的服务时间窗长度/h	5-6
任务点区域	北纬[25°, 30°] 东经[90°, 110°]

确定两个禁忌表的禁忌长度,以200、400、600个任务规模为实验对象,两个禁忌表的长度在[3, 6]的区间内实验,每一组禁忌长度重复实验10次。根据实验结果,得到结果稳定且效果良好的禁忌表长度为 $tabul_1 = tabul_2 = 3$ 。

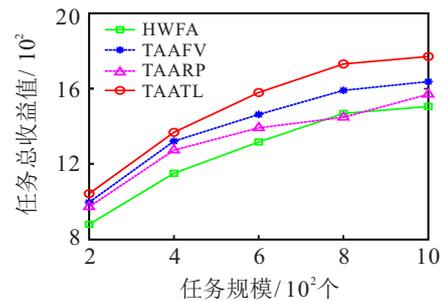
由于多无人机调度问题和多星调度问题的研究相对成熟,本文利用基于禁忌表策略的任务分配算法(task assignment algorithm based on tabu list, TAATL)与其他3种任务分配算法进行对比,不再进行观测资源调度算法的对比。

第1种算法是最大权重最先分配算法(highest weight first assignment algorithm, HWFA),第2种算法是基于适应度的任务分配算法(task assignment algorithm based on fitness value, TAAFV),第3种算法是基于资源优先度的任务分配算法(task assignment algorithm based on resource priority, TAARP)。HWFA算法是基于贪婪规则的任务分配算法,首先计算任务分配给子规划中心的适应度,再根据适应度的大小进行任务分配。在任务分配结束后,子规划中心根据任

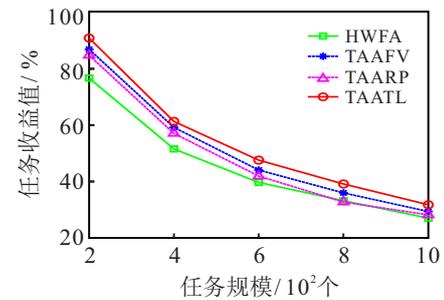
务分配的结果调度观测资源去执行任务,不再进行任务分配方案的迭代优化。TAAFV也是按照适应度的大小选择子规划中心进行任务的分配,与TAATL类似,在迭代优化时按照同样的规则更新任务分配方案,但是没有引入禁忌表策略。

TAARP是基于资源优先度的任务分配算法,在进行任务分配时需要优先考虑稀缺资源,对于受限制更大的观测资源,任务应优先分配给管控该类观测资源的子规划中心。因此该算法先将任务分配给卫星子规划中心,采用多星调度算法得到未被调度的任务,对未被调度的任务使用K-means算法进行聚类,再将类中的任务分配给合适的无人机子规划中心,并设计相应的邻域结构更新任务分配方案。

在不同的任务规模下,采用HWFA、TAAFV、TAARP、TAATL重复实验15次,得到任务收益值和任务收益率。上述4种算法的具体求解结果如图4和表2所示。



(a) 不同算法的任务收益



(b) 不同算法的任务收益率

图4 不同任务分配算法的计算结果

表2 不同算法的求解结果对比

case	任务规模	HWFA		TAAFV		TAARP		TAATL	
		收益值	收益率/%	收益值	收益率/%	收益值	收益率/%	收益值	收益率/%
C1	200	880.60	76.51	997.40	86.67	973.40	84.57	1043.40	90.65
C2	400	1151.40	51.47	1321.65	59.08	1274.10	56.96	1368.50	61.18
C3	600	1317.50	39.61	1463.40	44.00	1392.50	41.87	1579.85	47.50
C4	800	1468.70	33.15	1591.20	35.91	1448.25	32.68	1731.20	39.07
C5	1000	1505.65	26.98	1637.60	29.34	1570.25	28.14	1770.85	31.73

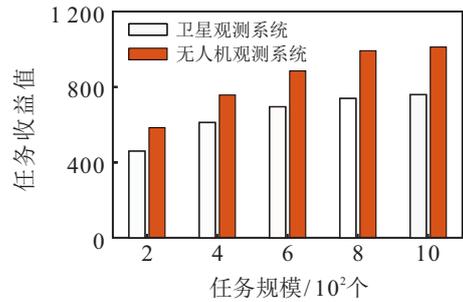
仿真实验结果表明,在求解空天观测资源协同任务规划问题时,TAATL总是优于HWFA、TAAFV和TAARP.在任务收益值上,TAATL高于其他算法40~260;在任务收益率上,TAATL高于其他算法2.40%~14.14%.由于HWFA算法缺乏任务分配方案的迭代优化,在大多情况下,HWFA算法的收益值总是最低的.引入任务分配方案的迭代更新机制后,结合禁忌表策略的TAATL比没有结合禁忌表策略的TAAFV在任务收益率上提升了2.40%~4.00%,表明了禁忌表策略的有效性.

TAARP将任务优先分配给资源稀缺的卫星去执行,对未被调度的任务选择灵活程度更高的无人机去执行.基于资源优先度分配任务的思想可以得到较好的初始任务分配方案,但在任务分配方案更新时容易使得更有利于无人机执行的任务却分配给了卫星执行,导致算法过早地陷入局部最优,因此TAATL的任务收益值和任务收益率都比TAARP更好.在任务收益值上,TAATL算法比TAARP算法提升了70~200;在任务收益率上,TAATL算法比TAARP算法提升了3.59%~6.08%.值得注意的是,虽然随着任务规模的扩大观测收益有了显著的增长,但是全部任务累计权重的增长幅度更大.因此在任务规模扩大时,HWFA、TAAFV、TAARP、TAATL任务收益率之间的差距也越来越小.

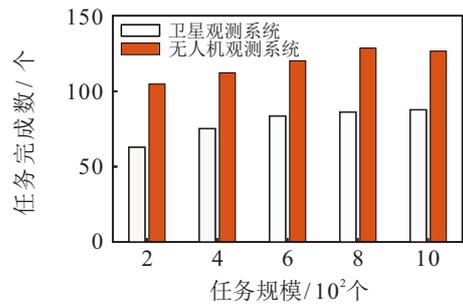
同时,分析4种算法中效果最优的算法TAATL求解到的最优任务分配方案,在经过任务规划后卫星观测系统和无人机观测系统的任务收益情况.对两类观测资源所构成的观测系统的收益情况进行对比,可知在整个协同观测系统中哪类观测资源对任务收益能提供更大帮助.观测系统指由同类观测资源组成的观测传感网络,如卫星观测系统包括所有的卫星子规划中心.卫星和无人机观测系统的任务收益情况如表3和图5所示.

表3 无人机和卫星观测系统的任务收益情况

case	任务规模	无人机观测系统		卫星观测系统	
		任务完成数	收益值	任务完成数	收益值
C6	200	104.67	583.92	62.75	459.50
C7	400	112.13	757.13	75.13	611.38
C8	600	120.08	884.89	83.46	694.97
C9	800	128.53	992.20	86.07	739.00
C10	1000	126.50	1011.71	87.64	759.14



(a) 卫星和无人机观测系统的任务收益值



(b) 卫星和无人机观测系统的任务完成数

图5 卫星和无人机观测系统的任务收益情况

表3和图5的结果表明,无人机观测系统的任务收益值和任务完成数量总是高于卫星观测系统.经过计算,无人机观测系统在任务收益率上比卫星观测系统约高4.53%~11.26%,表明对于小范围区域内任务的观测,无人机的观测能力比卫星要强.当任务规模为200、400、600、800、1000时,虽然无人机观测系统的任务收益值更大,但是卫星完成任务获得的平均收益(任务收益值除以任务完成数)却比无人机分别高1.74、1.39、0.96、0.87、0.66.由此可知,当任务规模扩大时,平均收益之间的差距一直在缩小,表明任务在进行分配时稀缺资源执行的任务优先级一般较高,而灵活性强的观测资源安排执行的任务优先级不是很高,但是对资源的平均消耗较少.因此,当任务规模较大时,区域内任务密度增大,且具有较高优先级的任务数增多,这对无人机而言,意味着对资源消耗少且优先级较高的任务数增多,因此无人机观测系统的任务收益值与卫星观测系统的差距逐渐增大.

最后分析在200、400和600个任务规模下,总的观测资源数量的变化对观测收益的影响.对每个任务规模分别设置6组实验,每组实验无人机与卫星数量相同,重复实验10次,探讨观测资源数量变化对观测收益的影响.例如,C11设置无人机和卫星的数量均为2,结果如表4和图6所示.

表4和图6的结果表明,当总的观测资源数量增加时,任务的收益也随之增加.当任务规模为200、400、600,无人机和卫星的数量从2个增加到7个时,任务收益率分别增加了56.09%、39.08%、31.92%.

表4 无人机和卫星观测系统的任务收益情况

任务规模	case	无人机和卫星数量	任务收益值	任务收益率/%
200	C11	2	399.10	34.67
	C12	3	574.60	49.92
	C13	4	727.30	63.19
	C14	5	864.70	75.13
	C15	6	967.30	84.04
	C16	7	1044.60	90.76
400	C17	2	495.40	22.15
	C18	3	677.50	30.29
	C19	4	892.10	39.88
	C20	5	1104.10	49.36
	C21	6	1247.10	55.75
	C22	7	1369.70	61.23
600	C23	2	519.30	15.61
	C24	3	747.00	22.46
	C25	4	962.90	28.95
	C26	5	1174.60	35.32
	C27	6	1399.10	42.07
	C28	7	1581.00	47.53

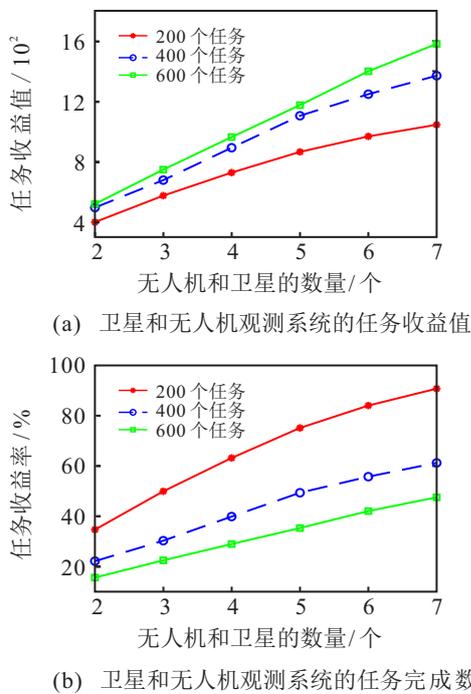


图6 不同数量的观测资源的任务收益情况

3种不同任务规模的实验结果均反映了观测资源数量的增加会促进任务收益的增长,并且无人机和卫星的数量每增加一个,任务收益率平均增加6.38%~11.22%。

5 结论

本文基于分而治之的框架,提出了两阶段迭代优化方法解决空天观测资源协同任务规划问题.在任务分配阶段,提出了基于禁忌表策略的任务分配启发式算法(TAATL),一种针对任务分配方案的迭代优化方法.该算法设计了任务分配的两个启发式准则,并构造适应度函数,将任务合理地分配给各子规划中心.在观测资源调度阶段,集成了两种智能优化算法分别求解多无人机和多星调度问题.大量的仿真实验验证了所提出方法的有效性,可以获得以下结论:

1)所设计的4种任务分配算法中,TAATL效果最好,与HWFA、TAAFV、TAARP相比,TAATL对任务的总收益率可以提升2.40%~14.14%。

2)对于小范围区域内任务的观测,无人机的观测能力比卫星强,在协同观测系统中,同样数量的两种观测资源,无人机观测系统的收益率比卫星观测系统约高4.53%~11.26%。

3)当总的观测资源数量增加时,任务的收益也会随之增加,无人机和卫星的数量每增加一个,任务收益率平均增加6.38%~11.22%。

参考文献(References)

- [1] Wu G H, Wang H L, Pedrycz W, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 113: 576-588.
- [2] Jia Z Y, Yu J Q, Ai X L, et al. Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 112-125.
- [3] 沈占锋, 李均力, 于新菊. 基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 690-698.
(Shen Z F, Li J L, Yu X J. Water Information Extraction of Baiyangdian Wet Land Based on the Collaborative Computing Method[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(5): 690-698.)
- [4] 刘重, 高晓光, 符小卫. 基于通信与观测联合优化的多无人机协同目标跟踪控制[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1747-1756.
(Liu C, Gao X G, Fu X W. Co-optimization of communication and observation for multiple UAVs in cooperative target tracking[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1747-1756.)
- [5] Robinson E, Balakrishnan H, Abramson M, et al. Optimized stochastic coordinated planning of

- asynchronous air and space assets[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2017, 14(1): 10-25.
- [6] Morris R A, Dungan J L, Bresina J L. Challenges in coordinating remote sensing systems[C]. *AAAI Spring Symposium - Technical Report*. California: AAAI, 2006: 65-72.
- [7] Morris R A, Dungan J L, Bresina J L. An information infrastructure for coordinating earth science observations[C]. *Proceedings SMC-IT 2006: The 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology*. Palo Alta: IEEE, 2006: 101-108.
- [8] Herold T M. Asynchronous, distributed optimization for the coordinated planning of air and space assets[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [9] 白国庆, 邢立宁, 贺仁杰, 等. 基于协同进化的多平台联合对地观测优化调度[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(4): 182-188.
(Bai G Q, Xing L N, He R J, et al. Scheduling multi-platforms collaborative observation based on cooperative evolution[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(4): 182-188.)
- [10] 余婧. 空天对地观测资源协同任务规划关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
(Yu J. Research on key technologies of cooperative Task scheduling for airborne and spaceborne earth observing assets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.)
- [11] 李军. 空天资源对地观测协同任务规划方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
(Li J. Coordinated task planning research of space-aeronautics earth-observing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.)
- [12] Wu G H, Pedrycz W, Li H F, et al. Coordinated planning of heterogeneous earth observation resources[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, 46(1): 109-125.
- [13] 梁星星, 修保新, 范长俊, 等. 面向海上移动目标的空天协同连续观测模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(1): 229-240.
(Liang X X, Xiu B X, Fan C J, et al. The aerospace cooperative planning model for maritime moving target continuation observation[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(1): 229-240.)
- [14] 慈元卓, 贺仁杰, 徐一帆, 等. 卫星搜索移动目标问题中的目标运动预测方法研究[J]. *控制与决策*, 2009, 24(7): 1007-1012.
(Ci Y Z, He R J, Xu Y F, et al. Method of target motion prediction for moving target search by satellite[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(7): 1007-1012.)
- [15] 吕进锋, 赵怀慈. 析因-粒子群算法及其在海上运动目标搜寻中的应用[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 1983-1989.
(Lyu J F, Zhao H C. Factorial-based particle swarm optimization and its application to maritime moving target search[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 1983-1989.)
- [16] 马纯超, 尹栋, 朱华勇. 网络化战场环境下多无人机调度问题[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(10): 31-36.
(Ma C C, Yin D, Zhu H Y. A study on multi-UAVs scheduling in networked battlefield[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(10): 31-36.)
- [17] 贺川, 朱晓敏, 邱涤珊. 面向应急成像观测任务的多星协同调度方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(4): 726-731.
(He C, Zhu X M, Qiu D S. Cooperative scheduling method of multi-satellites for imaging reconnaissance in emergency condition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(4): 726-731.)
- [18] 刘建银, 贾学卿, 王忠伟. 面向多星观测调度的分层迭代算法[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(5): 183-190.
(Liu J Y, Jia X Q, Wang Z W. Hierarchical iteration algorithm for multi-satellite observation scheduling[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(5): 183-190.)

作者简介

李夏苗(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事综合交通规划理论、系统工程理论等研究, E-mail: xml@csu.edu.cn;

廖文昆(1997—), 男, 硕士生, 从事调度优化、人工智能等研究, E-mail: liao_wk@csu.edu.cn;

伍国华(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化与决策、机器学习、调度理论及应用、智能交通等研究, E-mail: guohuawu@csu.edu.cn;

陈黄科(1992—), 男, 博士生, 从事智能优化方法、人工智能等研究, E-mail: hkchen@nudt.edu.cn;

路辉(1989—), 男, 博士生, 从事智能优化方法、人工智能等研究, E-mail: HuiLu@nudt.edu.cn;

陈新江(1995—), 男, 硕士生, 从事调度优化的研究, E-mail: chenxinjiang@csu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)