

控制与决策

Control and Decision

天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

杜永浩, 向尚, 邢立宁, 陈盈果

引用本文:

杜永浩, 向尚, 邢立宁, 等. 天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 523–533.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0732>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

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>

参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters

控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法

杜永浩^{1,2}, 向尚¹, 邢立宁^{1†}, 陈盈果¹

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073; 2. 莱顿大学 高级计算研究中心, 莱顿 2333CA)

摘要: 针对天基、临空基和空基协同的对地观测发展新趋势和“看得见、盯得住、跟得上”的对地观测应用新要求, 研究面向 3 种典型对地观测任务的天临空协同任务规划模型与算法. 首先, 构建统一化的观测路径决策模型, 为不同资源的观测路径提供统一的描述手段; 其次, 建立差异化的约束与收益模型, 指明区域目标覆盖、定点目标监视和移动目标跟踪等 3 种典型对地观测任务, 以及覆盖率、监视率和跟踪率等 3 种收益函数, 同时提出一种并行竞争的模因算法, 通过并行、竞争和进化操作逐代发挥算法、算子优势和计算机算力, 提供灵活、易用和自适应的模型求解手段; 然后, 开展 3 种典型对地观测任务仿真实验, 检验天临空协同对地观测任务规划模型和并行竞争模因算法, 呈现出天临空对地观测的时、空协同性; 最后, 讨论模型和算法在天临空协同对地观测实际应用中的可行性和改进方向.

关键词: 天临空; 对地观测; 协同任务规划; 模因算法; 并行计算

中图分类号: V19; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0732

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 杜永浩, 向尚, 邢立宁, 等. 天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 523-533.

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

DU Yong-hao^{1,2}, XIANG Shang¹, XING Li-ning^{1†}, CHEN Ying-guo¹

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Leiden Institute of Advanced Computer Science, Leiden University, Leiden 2333CA, Netherlands)

Abstract: To address the novel space-near space-air based cooperative earth observation (SNA-EO) with coverage, monitoring, and tracking requirements, this paper studies the planning models and the algorithm for three typical SNA-EO missions. Firstly, a general routing decision model is built to describe the observation routes of different SNA-EO resources. Then, a differentiated constraint and objective model is given to formulize the SNA-EO missions, including regional target coverage, fixed target monitoring, and moving target tracking. Also, the coverage rate, monitoring rate, and tracking rate are defined as objective functions of these three missions, respectively. To solve the models in a flexible, easy-to-use, and self-adaptive manner, a parallel competing memetic algorithm that makes full use of inner algorithms and operators via parallel, competing, and evolutionary strategies is proposed. The models and the algorithm are experimentally examined in cases of the three SNA-EO missions, where the SNA-EO cooperation in space and time domain is properly presented. Finally, the feasibility and suggestions of the models and the algorithm in real-world applications are discussed.

Keywords: space-near space-air; earth observation; cooperative mission planning; memetic algorithm; parallel computing

0 引言

近几十年来,对地观测已成为获取地表时空信息的重要手段,为经济建设、环境保护和国防安全提供

了重要支撑.特别是在地震、山火等重大灾情发生后,对地观测是指导控灾、救灾和重建工作的直接依据.传统的对地观测主要依托空基和天基观测资源,

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-09-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773120, 61873328); 国家杰出青年科学基金项目(61525304); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(2014-92); 国家建设高水平大学公派研究生项目(201903170181); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B022).

责任编辑: 刘士新.

†通讯作者. E-mail: xinglining@gmail.com.

其典型代表分别为无人机和卫星,观测高度通常位于20 km以下和100 km以上.近年来,随着20~100 km高度临近空间的开发利用和临空飞行器技术的快速发展,全空间协同的天基、临空基和空基(简称天临空)对地观测(见图1)将成为新常态^[1].

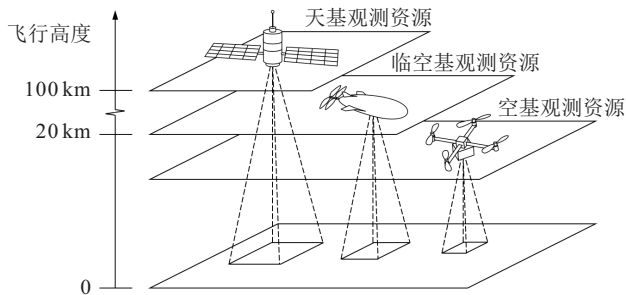


图1 天临空协同对地观测示意

天临空协同对地观测具有观测手段丰富、资源高度与能力互补等优点,但也存在以下问题:1)受动力方式影响,天基、临空基和空基资源的飞行速率与约束条件各异,时间层面协同难度高;2)受载荷与高度影响,3种资源的观测方式、形状和面积通常也有较大差异,空间层面协同难度也较高;3)同时,上述差异也增加了问题建模过程中观测路径、约束和收益的描述难度.由此,如何合理描述天临空协同对地观测任务规划问题,发挥资源能力协同优势,优化时间或经济成本,在差异化的约束条件下最大限度满足对地观测需要,成为亟需解决的难题.

另一方面,现阶段对地观测任务规划研究以天基、空基和空天协同为主,且观测任务通常以区域覆盖为目标,如遥感卫星成像任务规划^[2-3]、无人机覆盖路径规划^[4-5]、空天联合海上搜索^[6-7]等.除上述常见的对地观测任务以外,定点巡逻、持续监视、跟踪接力等特殊的对地观测任务也成为新常态,“看得见、盯得住、跟得上”成为对地观测应用的新要求,时、空协同难度激增.而现有研究中的模型或算法通常只适用于一种对地观测任务,模型和算法在复杂对地观测应用场景中的适用性、易用性和有效性有待提升.

对此,本文开展了天临空协同对地观测任务规划模型与算法研究.主要工作包括:1)给出一种天临空协同对地观测任务规划模型,在统一描述资源观测路径的基础上突出约束与任务特色;2)提出一种并行竞争的模因算法,通过竞争、进化和并行增强算法自适应性、全局性和效率;3)开展覆盖、监视和跟踪等3种典型对地观测任务仿真,以检验本文模型与算法的适用性和有效性.

1 相关工作

本节针对分布式协同和集中式协同两个主要的协同任务规划分支,回顾了空基、天基协同对地观测任务规划研究的相关工作,介绍两种协同方式的特色,阐明本文天临空协同任务规划研究中集中式、统一化建模的必要性和难点.

1.1 分布式协同

分布式协同的对地观测任务规划研究通常将观测资源视为智能体(agent),通过构建交互式、层次化或网络化的多智能体系统(multi-agent system, MAS),将对地观测任务分解、分配给观测资源,最后由观测资源实施末端任务规划或重新指导分配.

例如,针对以卫星为代表的天基对地观测系统,文献[8-10]构建了网络化的分布式协同规划框架,基于合同网协议完成了系统中的任务协商与规划.针对空基、天基协同对地观测系统,文献[11-14]设计了层次化的分布式协同规划框架,并分别采用黑板模型、市场模型、启发式策略、模拟退火算法和禁忌退火算法等问题进行了求解.文献[15]设计了一种两阶段迭代规划框架,通过计算对地观测机会和冲突度改进任务分配算法,提高分布式空天对地观测系统的协同效率.此外,为突出协同对地观测的智能性和自组织性,文献[16]构建了空天资源协同任务规划问题的马尔可夫决策模型,并采用贝叶斯逻辑回归处理问题中的不确定性因素;文献[17]基于Q学习、神经进化等强化学习手段训练了多星自主对地观测任务规划模型,模拟了训练、规划过程中的信息共享与传递.

分布式协同的层次化、自主化、去中心化等特征有助于简化对地观测任务规划问题,缩短规划时间,提升对地观测系统的自组织性和灵活性.但是,受任务分配框架和观测资源自主规划算法的影响,分布式协同通常只能维持一个较短周期内的局部优化,缺乏对全局信息的综合考虑^[18-19],很难站在全局视角解决巡逻、监视、跟踪等天临空协同对地观测任务长周期的时、空协同问题.同时,现阶段卫星、飞艇等对地观测应用中以地面管控为中心的集中式、统一化管理格局仍未改变,部分理想化的分布式协同架构短期内可能难以投产.此外,随着对地观测业务融合需要和硬件发展,观测资源的管理趋于扁平化,创造了更全局化、集中化的数据环境和技术条件,这将更有利于开展集中式协同的任务规划.

1.2 集中式协同

集中式协同的对地观测任务规划研究通常强调对观测资源全局化、统一化的管控,达到全局优化、时空协同的目标,是现阶段对地观测系统常用的规划形式。

例如,针对空基、天基协同对地观测任务规划问题,文献[6,20]构建了空天资源协同任务规划模型,通过进化算法进行了模型求解,但其中天基、空基对地观测任务是分开建模的,并没有纳入统一的集中式协同框架,协同水平仍需提升。文献[21]将天基对地观测任务规划问题抽象为图论模型,采用有向无环图的方法进行了求解。图论模型虽然便于资源、任务的统一建模,但其所能表达的约束或收益通常较为简单,难以满足天临空协同对地观测问题中复杂约束与收益的描述需求。此外,还有诸多基于集中式协同的多星任务规划^[2-3]、无人机群任务规划^[4-5]等单类资源协同任务规划研究,在集中式规划模型与算法方面进行了诸多的探索。

集中式协同的对地观测任务规划考虑了任务、资源、时间等全局信息,为长周期、复杂化对地观测任务的时、空协同优化提供了重要基础。但是,全局优化特点也将导致解空间规模和计算时间激增,高性能的任务规划算法不可或缺。近年来,计算机技术已经历深刻变革,高性能计算、并行计算的普及为任务规划算法的设计与运行创造了良好的硬件环境。由此,如何充分发挥计算机算力、设计高性能算法成为提升集中式协同任务规划效率的关键。此外,定点巡逻、持续监视、跟踪接力等包含复杂时、空约束和收益的对地观测任务也成为新常态,现有研究中以覆盖类任务为主的单一对地观测任务规划模型暴露出一定的局限性。为适应多样化、复杂化的天临空协同对地观测应用趋势,支撑未来对地观测系统的柔性拓展,任务规划模型与算法的适用性、易用性也需进一步提升。

鉴于此,面向覆盖、监视和跟踪等多种天临空协同对地观测任务,本文构建一种集中式、统一化的协同任务规划模型,提出一种融合并行、竞争和演化策略的高性能算法;在仿真实验中检验所提出的模型和算法,并讨论了二者在实际应用中的改进方向。

2 问题描述

2.1 定义与假设

针对“看得见、盯得住、跟得上”的对地观测应用需求,本文考虑区域目标覆盖、定点目标监视、移动

目标跟踪等3种典型的对地观测任务。为突出任务特色、区分任务目标,首先给出3种对地观测任务的定义。

定义1(区域目标覆盖任务) 针对一块具有较大面积的区域目标,在限定时间内对目标进行一次观测,以达到覆盖效果的一种对地观测任务。

定义2(定点目标监视任务) 针对多个具有一定面积的定点目标,在限定时间内对目标进行多次、连续观测,以达到监视效果的一种对地观测任务。

定义3(移动目标跟踪任务) 针对一个移动目标及其预定轨迹、时间等,在目标移动到不同预定位置时对其进行及时观测,以达到跟踪效果的一种对地观测任务。

区域目标覆盖任务是最常见的对地观测任务。相比之下,定点目标监视任务还需多次、尽可能不间断地观测目标,对观测资源的时、空协同性提出了更高的要求。类似地,移动目标跟踪任务不仅需要观测目标的预定轨迹,还要求观测时间与目标移动时间保持一致,协同规划的难度更高。这里,为直观描述天临空协同对地观测任务规划问题,在一定程度上简化问题、方便复现,作如下假设。

1) 视观测资源为质点且飞行速率、飞行高度不变,不考虑观测资源可能存在的碰撞、避让、故障问题以及其他不确定性因素。

2) 为方便计算观测路径、面积和时间等,对观测区进行网格化处理,以网格中心坐标作为计算依据,精度为1 km。若网格中心被观测资源视场覆盖,则视该网格被观测。同时,对时间进行离散化处理,精度为1 min,不满1 min按1 min计算。

3) 针对区域目标覆盖任务,假设不同对地观测资源所获取的地表图像可拼接,且不考虑拼图过程中可能产生的重复或无效观测问题。

4) 针对定点目标监视任务,假设情报部门已提供准确的目标位置,且不发生改变。

5) 针对移动目标跟踪任务,假设情报部门已提供目标轨迹的预定范围和时间信息,且不发生改变。

6) 视无人机起飞、飞艇升空、卫星过境至抵达观测区边界的时间为进场时间,假设各观测资源均能在给定的进场时间内抵达观测区边界。

基于上述假设,在集中式协同对地观测的应用背景下,本节将通过统一化的路径决策模型描述各资源的观测路径,确保模型在不同资源组合情况下的通用性;并通过差异化的约束与收益模型区分资源约束,突出任务目标,完成天临空协同对地观测任务规划模型的构建。

2.2 统一化路径决策模型

分别记天基、临空基和空基观测资源集为 R_S 、 R_N 和 R_A , 记对地观测资源合集为 $R (R = R_S \cup R_N \cup R_A)$, 并记观测区的网格集为 N . 同时, 记资源观测方向发生改变为一次“转移”^[7]. 针对任意观测资源 $r_i (r_i \in R)$, 其观测路径的决策变量可表示为:

- 1) $x_i (x_i \geq 0)$, 观测资源 r_i 的转移次数;
- 2) $y_{ij} (y_{ij} \in N, 1 \leq j \leq x_i)$, 观测资源 r_i 第 j 次转移时所在的网格, 简称 r_i 的第 j 个转移点.

以 $x_i = 4$ 为例, 天基、临空基和空基观测资源的转移路径和相应的观测区如图2所示.

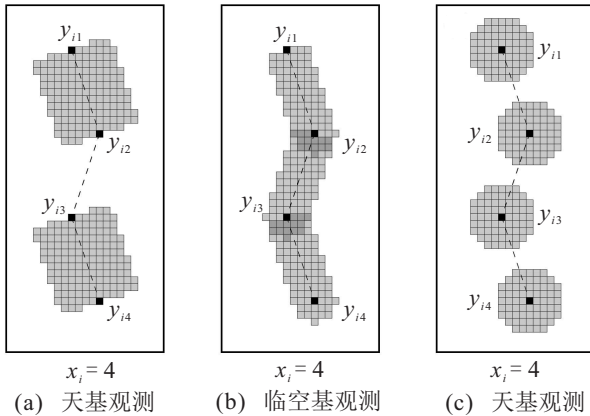


图2 观测资源 r_i 决策变量及其网格化的路径和观测区

由图2可见, 通过对上述决策变量赋值, 可得任意观测资源 r_i 的转移路径, 即观测路径 $Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}\}$. 另一方面, 虽然图中天基、临空基和空基观测资源具有相同的观测路径, 但观测区并不相同. 在图2(a)中, 由于天基资源连续两次观测之间需一定的姿态机动时间 (y_{i2} 至 y_{i3}), 观测区为以转移点连线为轴的间隔矩形区. 在图2(b)中, 临空基资源可在航行过程中持续观测, 故观测区为以转移点连线为轴的连续矩形区. 为突出资源观测特色和模型适用性, 本文考虑空基资源均为某类旋翼式飞行器, 在观测过程中需保持悬停, 不可移动观测, 故图2(c)中天基资源的观测区为以转移点为圆心的圆形区域.

由此, 该路径决策模型为不同类型资源的观测路径提供统一的描述手段, 是本文集中式协同任务规划的首要前提. 在此基础上, 还将构建差异化的约束与收益模型, 进一步区分天临空资源约束、突出不同任务的特色与目标.

2.3 差异化约束与收益模型

2.3.1 约束

为模拟天基、临空基和空基对地观测资源真实工作情况, 并在强约束条件下检验模型合理性与算法

性能, 本文考虑以下5种典型约束.

1) 任务限时. 任意观测资源 $r_i (r_i \in R)$ 所用时间 t_i 不得超过任务限时 t_{\max} , 即

$$\max(t_i) \leq t_{\max}, \forall r_i \in R. \quad (1)$$

其中: t_i 由 r_i 的转移距离 $d(y_{ij}, y_{i(j+1)}) (1 \leq j \leq x_i - 1)$ 、转移速率 v_i 、进场时间 t_i^0 、转移准备时间 t_i^1 来计算, 即

$$t_i = \frac{1}{v_i} \sum_{j=1}^{x_i-1} d(y_{ij}, y_{i(j+1)}) + t_i^0 + t_i^1(x_i - 1), \forall r_i \in R. \quad (2)$$

2) 进场边界约束. 任意观测资源 r_i 的第1个转移点 y_{i1} (即进场点) 仅能在边界网格集 N_B 中取值, 即

$$y_{i1} \in N_B, \forall r_i \in R. \quad (3)$$

3) 最短航程约束. 考虑到对地观测的实际应用情况, 任意观测资源 r_i 经过连续两个转移点之间的航行距离 $d(y_{ij}, y_{i(j+1)})$ 不得小于其最短航程 d_{\min}^i , 即

$$d(y_{ij}, y_{i(j+1)}) \geq d_{\min}^i, \forall r_i \in R, 1 \leq j \leq x_i - 1. \quad (4)$$

4) 最大航程约束. 任意观测资源 r_i 的总航程不得超过其航程极限 d_{\max}^i , 即

$$\sum_{j=1}^{x_i-1} d(y_{ij}, y_{i(j+1)}) \leq d_{\max}^i, \forall r_i \in R. \quad (5)$$

5) 天基资源轨道与机动约束. 首先, 受侧摆能力限制, 任意天基观测资源 $r_i (r_i \in R_S)$ 的转移点 y_{ij} 仅能在其可视网格集 N_S^i 中取值, 即

$$y_{ij} \in N_S^i, \forall r_i \in R_S, 1 \leq j \leq x_i. \quad (6)$$

其次, 受偏航能力限制, 给定天基观测资源 r_i 的轨迹斜率 k_i , 计算其观测区轴线斜率 $k(y_{i(2j-1)}, y_{i(2j)})$, 二者角度差不得超过其偏航角极限 ψ_i , 即

$$|\text{atan}(k(y_{i(2j-1)}, y_{i(2j)})) - \text{atan}(k_i)| \leq \psi_i,$$

$$\forall r_i \in R_S, 1 \leq j \leq \frac{x_i}{2}. \quad (7)$$

此外, 受姿态转换时间限制, 天基观测资源 r_i 两次对地观测的间隔不得小于其姿态转换时间 Δt_{\min}^i , 即

$$\frac{1}{v_i} d(y_{i(2j-1)}, y_{i(2j)}) \geq \Delta t_{\min}^i, \quad \forall r_i \in R_S, 1 \leq j \leq \frac{x_i}{2}. \quad (8)$$

2.3.2 收益

针对区域目标覆盖、定点目标监视和移动目标跟踪等3种典型对地观测任务, 在保持路径决策和约束模型不变的基础上, 本文分别记覆盖率、监视率和跟踪率为这3种任务的收益函数.

1) 覆盖率. 记 C_i 为观测资源 $r_i (r_i \in R)$ 依次通过转移点集 Y_j 过程中覆盖的网格集. 覆盖率即各资源所观测的网格合集与总网格集 N 的大小之比

$$\text{Maximize } \frac{1}{|N|} \left| \bigcup_{i=1}^{|R|} C_i \right|. \quad (9)$$

2) 监视率. 记 N_M 为待监视网格集, T_j 为其中第 j 个网格被观测的离散化时间集 (精确到 1 min). 监视率即网格被观测时间集的平均大小与任务限时 t_{\max} 之比

$$\text{Maximize } \frac{1}{t_{\max}} \frac{1}{|N_M|} \sum_{j=1}^{|N_M|} |T_j|. \quad (10)$$

3) 跟踪率. 记 N_T 为情报部门提供的移动目标预定位置集, T_j 为其中第 j 个网格被观测的离散化时间集 (精确到 1 min), τ_j 为目标到达该网格的预定时间. 跟踪率即网格集 N_T 中被观测时间集包含目标预定时间的网格比例

$$\text{Maximize } \frac{1}{|N_T|} \sum_{j=1}^{|N_T|} b_j, \quad b_j = \begin{cases} 1, & \tau_j \in T_j; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

本文给出了天临空对地观测资源统一化的路径决策模型, 以及差异化的约束、收益模型. 不同于传统单一任务类型 (以区域目标覆盖为主) 的对地观测任务规划模型, 该模型同时涵盖了区域目标覆盖、定点目标监视和移动目标跟踪等 3 种典型的对地观测任务. 在本文集中式协同的对地观测应用背景下, 该模型既突出了 3 种任务的特色和目标, 又保证了其在不同资源组合情况下的通用性, 为下一步对地观测任务规划的算法设计和求解提供了模型依据.

3 并行竞争的模因算法

为求解天临空协同对地观测任务规划模型, 充分发挥计算机算力, 增强求解效率、自适应性和易用性, 本文提出一种融合并行、竞争和进化策略的模因算法. 在算法每一次内循环中, 并行操作使用多线程的局部搜索算法获取当前种群, 竞争操作评估算法、算子贡献并更新下次使用概率, 进化操作则对当前种群进行一次全局寻优. 本节首先介绍该算法框架和编码方式, 随后分别介绍算法并行、竞争和进化的具体操作.

3.1 算法框架

如图 3 所示, 该算法框架和流程如下.

1) 输入: 基于算法参数与编码方式, 启用主线程随机生成初始种群, 并将种群中的最优个体作为后续并行操作的初始解;

2) 内循环 1 (并行): 启用多个线程, 并概率性地启用不同的局部搜索算法及算子, 基于初始解在规定时间内进行搜索优化, 记录历史最优解, 组建当前最优种群;

3) 内循环 2 (竞争): 返回主线程, 评估并行操作中各算法、算子对当前种群的贡献程度, 更新下一次并行操作中算法、算子的使用概率;

4) 内循环 3 (进化): 对当前种群进行选择、交叉和修复操作, 并将新种群的个体概率性地分配回不同线程, 作为下一次并行操作的初始解, 返回步骤 2);

5) 输出: 若达到算法终止条件, 则输出当前种群的最优个体.

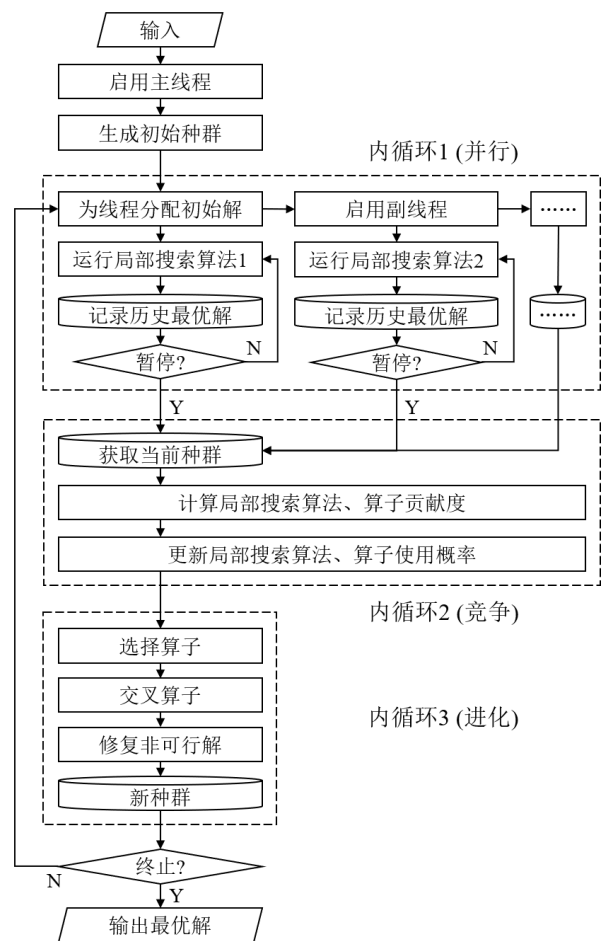


图 3 并行竞争模因算法流程

进化操作赋予算法良好的全局寻优能力. 鉴于该算法中局部搜索和进化算法的混合机制, 该算法属于一类模因算法. 但与 Moscato 等^[22] 最早提出的, 以及大多数以进化算法为主循环、以局部搜索为改进算子的模因算法^[23-26] 相反, 本文算法以局部搜索为主循环、以进化操作为改进算子. 由此, 本文算法不仅能继承传统模因算法综合的局部与全局寻优能力, 同时能够充分发挥局部搜索算法在约束解空间中的快速寻优能力, 避免传统模因算法中使用进化算法作

为主循环时约束优化效率低,个体逐一、逐代局部搜索耗时长的问題.这里,该算法中的进化操作也可视为迭代局部搜索、大邻域搜索等算法中的一次扰动、破坏与修复操作,起到相似的扩大搜索空间的全局寻优效果.

竞争操作赋予算法良好的自适应性.竞争过程中算法及算子使用概率的更新有助于保留并更频繁地使用适合的算法及算子,淘汰不适合者,为算法的适应能力提供重要保障.

并行操作则帮助算法加速,赋予算法良好的多样性和可拓展性.一方面,参与竞争的局部搜索算法以并行的方式运行,可以大幅提升搜索效率;在此期间,不同的搜索轨迹也将产生多样化的搜索结果,满足进化操作对多样性的要求.另一方面,一个新的算法、算子可通过增加新线程的简单方式加入竞争、拓展算法,满足算法在长期应用过程中灵活、个性化的使用与管理需要.换言之,并行是一种通过硬件手段充分发挥计算机算力、增强算法优势的策略.

3.2 编码方式

为保障模因算法中局部搜索、进化操作有序衔接,二者的编码方式需统一.鉴于该问题中路径、序列优化的特点,在2.2节决策变量的基础上,采用图4所示的链式编码方式.针对任意观测资源 $r_i (r_i \in R)$,其决策变量 x_i 表示链表长度,决策变量 y_{ij} 表示链表中第 j 个元素的取值.该编码方式形式简洁,直观反应了资源的观测路径,可以通过决策变量的赋值轻松实现局部搜索、交叉等操作,具有良好的适用、易用性.

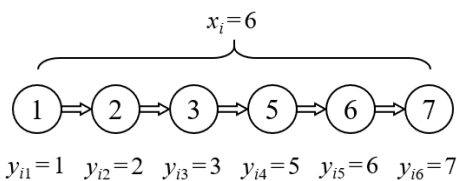


图4 并行竞争模因算法的编码方式

3.3 并行操作

在该操作中,每个线程将通过轮盘赌的方式概率性地选用一种局部搜索算法,并在每一次构造邻域时概率性地选用一种邻域算子,开展迭代搜索,构造当前种群.

禁忌搜索、模拟退火和逾期接受等局部搜索算法既保留了爬山算法的渐近收敛性,又具有跳出局部最优解的智能性,在组合优化问题中得到了广泛应

用.鉴于禁忌搜索的局部最优记录机制,以及模拟退火和逾期接受算法的概率性劣解接受策略,本节选取禁忌搜索、模拟退火、逾期接受、禁忌模拟退火和禁忌逾期接受等5种局部搜索算法实现并行操作.其中,禁忌模拟退火算法和禁忌逾期接受算法是基于模拟退火、逾期接受和禁忌策略的混合算法^[7].

在上述算法中,邻域解由邻域算子获得,不同的邻域算子及其使用概率也将影响局部搜索算法的性能.本节设计了图5所示的5种邻域算子,算法、算子使用概率将由竞争操作迭代更新.

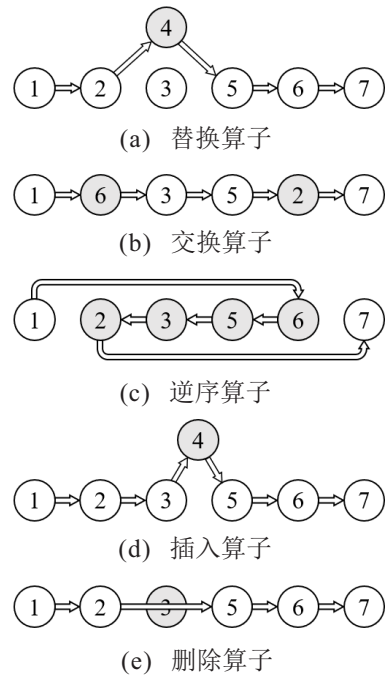


图5 并行竞争模因算法的邻域算子

3.4 竞争操作

在并行操作所得的当前种群中,各局部搜索算法及算子可能贡献不同数量的个体,而个体贡献数量很大程度上反应了算法及算子的适用性、有效性.由此,为量化算法及算子性能,保留并更频繁地使用高性能者,设计如下的竞争机制.

记 S 为当前种群的解集, M_i 和 $O_i (M_i \subset S, O_i \subset S)$ 分别为第 i 个局部搜索算法和算子所获得的解集.那么,第 i 个局部搜索算法和算子在此次内循环中的贡献度 g_i^M 和 g_i^O 可以表示为

$$g_i^M = \frac{|M_i|}{|S|}, g_i^O = \frac{|O_i|}{|S|}. \quad (12)$$

记第 i 个局部搜索算法和算子当前使用概率分别为 p_i^M 和 p_i^O (初始值均相等),则二者在下一代的使用概率将由下式更新,并通过轮盘赌的方式完成概率的标准化与选择:

$$p_i^M = \frac{1}{2}(p_i^M + g_i^M), p_i^O = \frac{1}{2}(p_i^O + g_i^O). \quad (13)$$

在此基础上,为避免迭代过程中一些低贡献度的算法或算子长期占用计算资源,淘汰机制也不可或缺.若第*i*个局部搜索算法或算子的贡献度 p_i^M 或 p_i^O 在连续 n_{\min} 次迭代中均低于阈值 p_{\min} ,则该算法或算子将被淘汰.因此,竞争操作实现了算法和算子层面的“优胜劣汰”,促使各线程所运行的算法长期保持高效寻优.

3.5 进化操作

“优胜劣汰”同时体现在解的层面.基于并行操作所得的当前种群,进化操作通过交叉和修复算子开辟更大的邻域空间,完成一次全局寻优.本节采用图6所示的同位点交叉和同值点交叉算子.其中,同位点交叉是普遍采用的一种交叉算子,不会增加编码链表长度(即资源转移次数),有助于防止交叉后违反任务限时、航程等约束.同值点交叉则选择编码链表中具有相同编码值(即网格点)的位置进行交叉,在该同值点前后均为可行路径的前提下,也有助于降低交叉后违反约束的可能性.若交叉后仍违反约束,则将通过启发式规则由后至前缩短编码链表,以达到快速修复、提高效率的目的.最后,算法将基于个体收益,通过轮盘赌的方式将新种群中的个体概率性地分配回不同线程,作为下一轮并行操作的初始解.

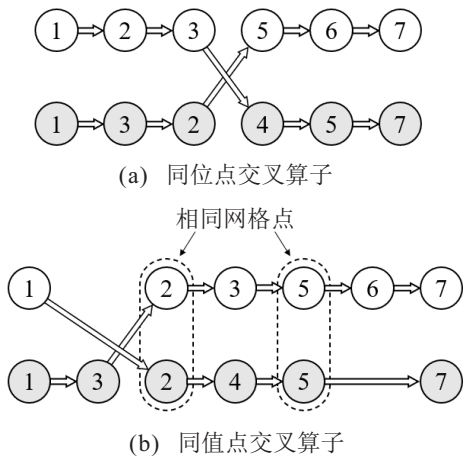


图6 并行竞争模因算法的交叉算子

综上,本节提出了一种融合并行、竞争和进化策略的模因算法,介绍了每一次内循环中3种策略的具体操作.该算法具有灵活、易用和自适应等优点,在并行计算的新常态下将呈现独特优势,为天临空协同对地观测任务规划模型求解提供了有力手段.

4 仿真实验

4.1 实验准备

基于天临空协同对地观测任务规划模型与并行竞争模因算法,本节将分别开展区域目标覆盖、定点

目标监视和移动目标跟踪等3种典型对地观测任务规划仿真.针对区域目标覆盖任务,设计了25 km × 25 km、50 km × 50 km和100 km × 100 km共3种规模的矩形区域目标,观测资源的相关参数列于表1.针对定点目标监视和移动目标跟踪任务,分别设计了图7和图8所示的多种仿真场景,其中移动目标速率为60 km/h,其他相关参数与50 km × 50 km区域目标覆盖任务保持一致.

表1 对地观测资源的主要参数

参数	天基资源	临空基资源	空基资源
观测速率/(km/h)	5000	30	200
观测半径/km	6	3	4.5
进场时间/min	30	20	5
转移准备时间/min	0	0	15
限时/min	120	120	120
资源数(25 km × 25 km)	0	1	1
资源数(50 km × 50 km)	1	2	3
资源数(100 km × 100 km)	4	8	12

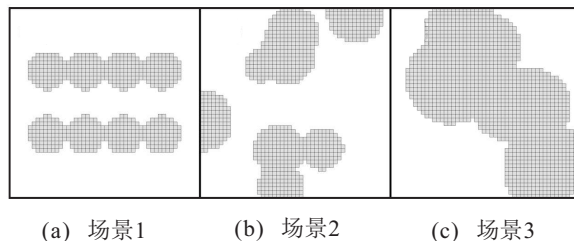


图7 待监视的定点目标位置区

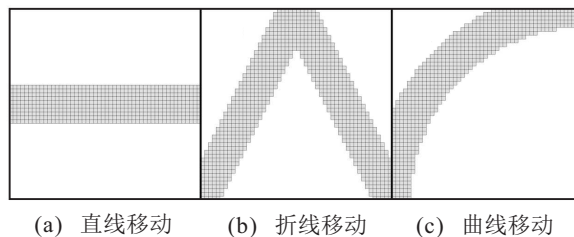


图8 移动目标预定位置区(由左侧进场)

在并行竞争模因算法的并行操作中,禁忌表和逾期表长度分别为10和150,初始退火温度为10%,每代并行搜索时间为10s;在竞争操作中,算法和算子淘汰的贡献度阈值为10%,代数阈值为10;在进化操作中,种群规模为100,交叉概率为0.6;算法缩写为PC-MA.对比算法包括普通模因算法、禁忌模拟退火算法和禁忌逾期接受算法,分别缩写为MA、TSA和TLA,相关参数保持不变.算法运行总时间为5 min,即空基观测资源的进场时间.运行环境为Java 1.8.0, Intel (R) Xeon (R) Platinum 8269CY CPU和8 GB RAM.实验结果均为10次独立运行结果的平均值.

4.2 区域目标覆盖

经计算,区域目标覆盖任务规划结果列于表2.可见,本文并行竞争模因算法在25 km×25 km、50 km×50 km和100 km×100 km等3种规模的场景中均获得最高的覆盖率和最小的方差(表中加粗),表明该算法在同等运行时间下的性能优势.在同等运行时间下,该算法中并行、竞争等操作能够提供丰富的候选解和自适应的算法、算子,较普通模因算法和局部搜索算法优势显著.

表2 区域目标覆盖任务规划结果 %

算法	25 km × 25 km		50 km × 50 km		100 km × 100 km	
	覆盖率	标准差	覆盖率	标准差	覆盖率	标准差
PC-MA	98.9	0.7	95.4	0.9	92.9	2.0
MA	96.0	1.0	92.1	1.5	86.4	3.8
TSA	96.7	1.3	91.2	2.6	79.6	4.3
TLA	97.1	1.3	90.6	2.2	82.5	3.7

为直观展示天临空对地观测协同效果,随机选取一组本文规划结果,绘制图9所示的区域目标覆盖图.其中,天基、临空基和空基覆盖区分别为这3种观测资源在目标区域内的覆盖网格(含转移点),网格颜色越深表明覆盖次数越多.例如,在25 km×25 km场景中,临空基和空基观测资源分别覆盖了目标两侧区域,达到了良好的协同覆盖效果;在50 km×50 km和100 km×100 km场景中,天基观测资源覆盖了对角线区域,在轨道约束的情况下通过一次沿轨观测最大化了覆盖效果.在3种任务场景中,规划结果均表现出

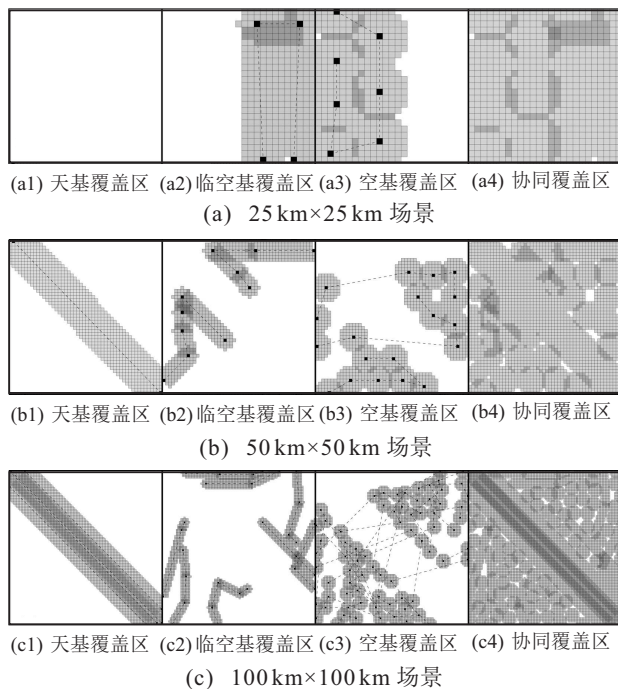


图9 区域目标覆盖任务规划结果

较高的覆盖率;同时,受资源观测特点影响,也不可避免地出现了一些二次、三次覆盖的情况.值得一提的是,随着场景规模扩大,网格和观测资源数量增加,天临空协同任务规划复杂度激增,本文通过建模和算法手段给出了合理结果,表明本文模型与算法的适用性和有效性.

4.3 定点目标监视

经计算,定点目标监视任务规划结果列于表3.可见,针对3种定点目标监视场景,本文并行竞争模因算法在监视率和方差上也均表现出显著优势.同时,基于一组本文规划结果,绘制图10所示的定点目标监视图.其中,天基、临空基和空基监视区分别为这3种资源在总区域内的观测网格,而有效监视区为三者如图7待监视区内的观测网格,因此网格颜色深度一定程度上反映了监视时长.由图10可见,在天临空协同的观测下,大量待监视网格得到了多次、重复观测,同时观测路径也呈现了一定规律性,达到了对定点目标监视、巡逻的基本目的.

表3 定点目标监视任务规划结果 %

算法	场景1		场景2		场景3	
	监视率	标准差	监视率	标准差	监视率	标准差
PC-MA	48.2	2.3	40.3	1.8	25.5	1.7
MA	41.7	3.0	35.2	3.7	21.5	2.8
TSA	42.9	3.8	30.7	5.7	18.6	4.4
TLA	43.6	2.5	37.9	2.9	20.2	3.1

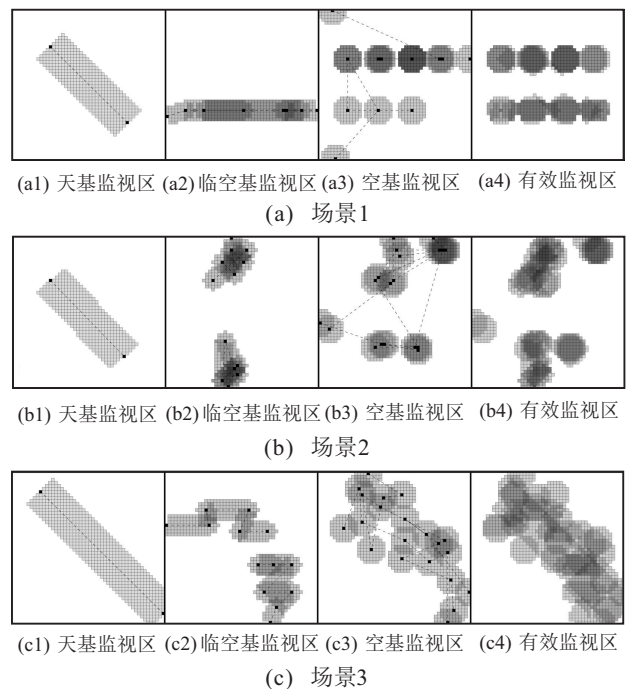


图10 定点目标监视任务规划结果

4.4 移动目标跟踪

经计算,移动目标跟踪任务规划结果列于表4.可见,针对直线、折线和曲线等3种移动目标跟踪场景,本文并行竞争模因算法在跟踪率和方差上也均表现出显著优势.同时,基于一组本文规划结果,绘制图11所示的移动目标跟踪图.其中,天基、临空基和空基跟踪区分别为其在总区域内的观测网格,而有效跟踪区为其在图8目标位置区内的观测网格.

表4 移动目标跟踪任务规划结果 %

算 法	直线移动		折线移动		曲线移动	
	跟踪率	标准差	跟踪率	标准差	跟踪率	标准差
PC-MA	68.9	2.7	83.0	2.4	90.3	1.3
MA	68.1	2.7	80.2	2.5	83.9	2.6
TSA	66.5	3.1	76.9	5.1	79.8	3.2
TLA	67.4	3.4	78.4	3.0	84.2	2.2

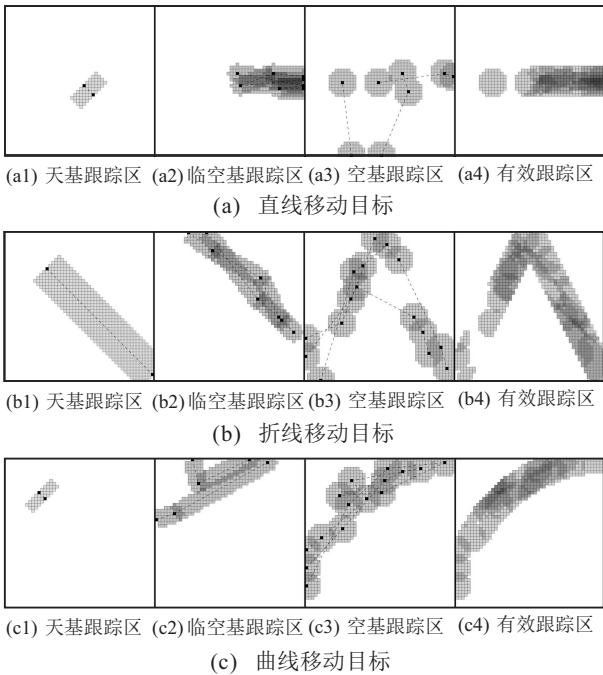


图11 移动目标跟踪任务规划结果

值得注意的是,目标移动速率为60 km/h,高于临空基资源速率30 km/h,且临空基资源还需20 min的进场时间.故在移动目标由左侧进场,的情况下,图11(a)、(b)和(c)中临空基资源分别选择从右侧、上侧和左上侧入场“拦截”移动目标,达到跟踪效果,可见资源规划的时、空协同性和合理性.此外,鉴于较高的移动速率,空基资源在图11中途经了大部分的移动目标位置区,承担了主要的跟踪工作;天基资源由于轨道、速率和进场时间的限制,在该任务中仅能承担少量跟踪工作,符合空基、天基对地观测应用的实际情况.

4.5 分析讨论

经仿真测试,本文模型和算法具有以下优势:

1) 在决策模型方面,通过统一化的路径决策模型描述天基、临空基和空基资源的观测路径,将不同资源的路径决策纳入集中式、统一化的框架,能够支撑不同观测资源的组合应用场景.

2) 在约束与收益描述方面,建立了差异化的约束与收益模型,准确描述了覆盖率、监视率和跟踪率等3种不同的任务收益,在统一建模的基础上又突出了约束与任务特色.

3) 在算法方面,并行竞争的模因算法充分利用了并行、竞争和演化策略,在多线程计算的新常态下表现出灵活、易用和自适应等独特优势,能够支撑较大规模的天临空协同任务规划问题求解,以及其他算法或算子增减、改进等柔性拓展.

为直观描述问题,方便统一化建模,文中也存在一些理想化假设.为进一步提升本文模型与算法向实际应用转化的可行性和可操作性,给出以下几点改进建议:

1) 更加精细的差异化约束与收益建模.本文为突出天临空对地观测的特色,选择了观测方式各异的天基、临空基和空基观测资源,但并没有对同类资源进行进一步的区分.实际上,现阶段同类资源的观测方式也十分多样,例如,固定翼、旋翼式空基资源的观测方式、约束和收益等均可能不同.故在模型实际应用中,应开展更加精细的差异化约束与收益建模,精准突出不同对地观测资源的特色,支撑复杂化、多样化的天临空协同对地观测应用新需求.

2) 更加高效的算法搜索与约束检查机制设计.出于通用、易用的目的,本文算法采用的是最普遍的随机搜索机制,搜索效率还可进一步提高.同时,算法运行中由约束检查带来的时间成本也常被忽视.随着观测面积或网格精度的提升,解空间规模将激增,高效的算法搜索与约束检查机制尤为重要.近年来,“组合优化+机器学习”成为新的研究热点,通过机器学习技术缩减天临空协同任务规划解空间,提升搜索或约束检查效率也是一条新思路.

3) 不确定环境下的快速重规划策略研究.为直观检验模型、算法,本文未考虑不确定性因素.但在天临空协同对地观测的实际应用中,观测误差、目标位置误差以及目标主动躲避观测行为等不确定性因素必然存在.因此,模型与算法不仅需要支撑长周期、全资源的全局规划,还要支持短周期、局部资源的快

速规划,为天临空协同对地观测的时变系统提供可靠的技术支撑。

4) 基于云平台的远程任务规划软件开发. 美国 Orbit Logic 公司开放了其卫星任务规划软件 STK/Scheduler 的远程访问功能,提供了一种在线式的任务规划服务新模式. 该模式使用户访问更加便捷,有助于功能迭代和故障快速修复. 同时,云计算也可进一步发挥算法优势. 由此,结合云平台的技术优势,提供远程的天临空协同对地观测任务规划服务也是一种新的应用途径。

5 结论

本文针对天临空协同对地观测任务规划问题以及覆盖、监视和跟踪等3种典型对地观测任务,开展了模型、算法研究和仿真实验,主要结论如下:

1) 本文模型能够在集中式协同的架构下统一规划天临空协同对地观测任务,同时突出资源约束与任务特色,满足不同资源组合和任务场景的建模需要。

2) 在模型基础上,本文并行竞争模因算法能够灵活、高效求解3种天临空协同对地观测任务规划问题,提升覆盖率、监视率和跟踪率等任务指标,给出时、空协同的对地观测方案。

参考文献(References)

- [1] 孙文,王刚,郭相科,等. 临空高超声速飞行器多传感器协同探测体系[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2016, 17(6): 52-57.
(Sun W, Wang G, Guo X K, et al. An analysis of the cooperative detection mechanism on NSHV[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 52-57.)
- [2] He L, Liu X L, Laporte G, et al. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling[J]. Computers & Operations Research, 2018, 100: 12-25.
- [3] 姚靖宇, 靳鹏, 朱外明, 等. 面向收益不均等区域目标的多星调度问题[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(3): 638-645.
(Yao J Y, Jin P, Zhu W M, et al. Multi-satellite scheduling problem for regional targets with uneven income[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(3): 638-645.)
- [4] 陈海, 何开锋, 钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 928-935.
(Chen H, He K F, Qian W Q. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 928-935.)
- [5] Choi Y, Choi Y, Briceno S, et al. Energy-constrained multi-UAV coverage path planning for an aerial imagery mission using column generation[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2020, 97(1): 125-139.
- [6] 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.)
- [7] 杜永浩, 邢立宁, 陈盈果. 多平台海上协同搜索与路径优化策略研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(1): 147-154.
(Du Y H, Xing L N, Chen Y G. Research on strategies of maritime cooperative searching and path optimizing using multiple platforms[J]. Control and Decision, 2020, 35(1): 147-154.)
- [8] 高黎, 沙基昌. 基于合同网的分布式卫星系统任务优化分配研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 815-820.
(Gao L, Sha J C. Research on task optimal allocation for distributed satellites system based on contract net protocol[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 815-820.)
- [9] 郝会成, 姜维, 李一军, 等. 基于 Multi-Agent 敏捷卫星动态任务规划问题[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(1): 53-58.
(Hao H C, Jiang W, Li Y J, et al. Research on agile satellite dynamic mission planning based on multi-agent[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(1): 53-58.)
- [10] Du B, Li S. A new multi-satellite autonomous mission allocation and planning method[J]. Acta Astronautica, 2019, 163: 287-298.
- [11] Zheng Z X, Guo J, Gill E. Distributed onboard mission planning for multi-satellite systems[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 89: 111-122.
- [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, 2015, 46(1): 109-125.
- [13] 李军, 钟志农, 景宁, 等. 异构 MAS 结构下的空天资源多阶段协同任务规划方法[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1682-1697.
(Li J, Zhong Z N, Jing N, et al. Space-air resources multi-phase cooperation task planning approach based on heterogeneous MAS model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1682-1697.)
- [14] 王慧林, 伍国华, 马满好. 多类异构对地观测平台协同

- 任务规划方法[J]. 航空学报, 2016, 37(3): 997-1014.
(Wang H L, Wu G H, Ma M H. Coordinated task planning method of multiple heterogeneous earth-observation platforms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 997-1014.)
- [15] 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, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1193.
(Li X M, Liao W K, Wu G H, et al. A two-stage iterative optimization method for the coordinated task planning of space and air observation resources[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1193.)
- [16] 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.
- [17] Wang C, Li J, Jing N, et al. A distributed cooperative dynamic task planning algorithm for multiple satellites based on multi-agent hybrid learning[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 493-505.
- [18] 谢平, 杜永浩, 姚锋, 等. 敏捷成像卫星自主调度技术综述[J]. 宇航学报, 2019, 40(2): 127-138.
(Xie P, Du Y H, Yao F, et al. Literature review for autonomous scheduling technology of agile earth observation satellites[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(2): 127-138.)
- [19] 向尚, 陈盈果, 李国梁, 等. 卫星自主与协同任务调度规划综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(2): 252-264.
(Xiang S, Chen Y G, Li G L, et al. Review on satellite autonomous and collaborative task scheduling planning[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(2): 252-264.)
- [20] 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.)
- [21] Wang Y, Sheng M, Zhuang W H, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(2): 268-279.
- [22] Moscato P. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms[R]. Pasadena: California Institute of Technology, 1989: 1-67.
- [23] Deng J, Wang L. A competitive memetic algorithm for multi-objective distributed permutation flow shop scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2017, 32: 121-131.
- [24] Du Y H, Xing L N, Zhang J W, et al. MOEA based memetic algorithms for multi-objective satellite range scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 50: 100576.
- [25] Wang L, Lu J W. A memetic algorithm with competition for the capacitated green vehicle routing problem[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 6(2): 516-526.
- [26] Huang T, Gong Y J, Kwong S, et al. A niching memetic algorithm for multi-solution traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(3): 508-522.

作者简介

杜永浩(1993—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: duyonghao15@163.com;

向尚(1990—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: xiangshang165@163.com;

邢立宁(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: xinglining@gmail.com;

陈盈果(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: argguo@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)