

# 天区机遇目标空间探测任务规划算法\*

曾而康<sup>1,2</sup> 吴海燕<sup>1</sup> 冯 准<sup>1</sup>

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要** 针对中法合作 SVOM 卫星的天区范围内机遇目标规划问题 (ToO-MM), 对其中的约束条件和优化目标进行抽象, 建立了规划问题数学模型, 设计实现了基于启发式规则的机遇目标规划算法 TMHPA。以最大化卫星科学观测收益和最大化应急任务响应度为优化目标, 考虑卫星姿态调整时间的影响, 对观测任务和数传任务进行规划。通过仿真实验验证算法的有效性, 结果表明该方法能够在保证算法收敛性和时效性同时, 给出卫星在天区范围内的网格单元 (tile) 目标观测序列以及执行数传任务的时段安排, 实现对 ToO 目标观测的快速响应, 并及时上传机遇目标科学观测数据, 满足规划算法的设计需求。

**关键词** 任务规划, 天区机遇目标, 启发式规则, 多目标优化

**中图分类号** V4

## Sky Area Target of Opportunity Mission Planning Method

ZENG Erkang<sup>1,2</sup> WU Haiyan<sup>1</sup> FENG Zhun<sup>1</sup>

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** In regard to the planning problem of ToO-MM (a type of sky area Target of Opportunity) for SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor) mission, the constraints and optimization goals are abstracted, the mathematical description model is established, and the algorithm TMHPA (ToO-MM Heuristic Planning Algorithm) based on heuristic strategy is designed. The algorithm aims at maximizing satellite scientific observation benefits and maximizing emergency task response, and considering the influence of satellite attitude adjustment time, the observation tasks and data transmission tasks can be planned. An example is given to verify the effectiveness of this algorithm. The results show that the method executed in this paper is not only able to solve the problem of ToO-

\* 中国科学院战略性先导科技专项项目资助 (XDA15040100, XDA15040400)

2022-02-24 收到原稿, 2022-12-12 收到修定稿

E-mail: why@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

MM, but also to ensure the convergence and timeliness. TMHPA can give the target observation sequence of the satellite within the sky area and the time period arrangement for performing data transmission tasks. Compared with GA (Genetic Algorithm) and DEA (Differential Evolution Algorithm), it has a shorter computational time overhead and a smaller attitude adjustment time. The TMHPA algorithm could achieve the rapid response to the target observation, and meet the design requirements as well.

**Key words** Mission planning, Sky area target of opportunity, Heuristic strategy, Multi-objective optimization

## 0 引言

开展空间科学卫星天文探测活动是研究空间科学最直接、最重要的方式。对于发生在空间中随机性高、及时效性强的机遇目标 ToO (Target of Opportunity) 的观测是空间科学卫星开展天文观测的重要组成部分。相对于常规天文观测目标, 机遇目标具有显著的随机性和时效性特征。伽马暴、X 射线暴等 ToO 目标的典型特征是难以预测, 通常产生于双致密星的并合过程, 持续时间较短, 具有很强的时效性。伽马暴余辉、X 射线余辉则发生在暴发结束之后, 这一类后随机机遇目标可从多个波段展开观测, 余辉对比暴发事件虽然持续时间更长, 但相比常规目标仍具有较强的时效性, 当其可观测强度下降到一定阈值时, 将失去观测窗口。中法合作太空望远镜卫星 SVOM 中包含多类机遇观测目标, ToO-MM 是其中处理过程最为复杂且约束条件最多的机遇目标观测任务。其通常发生于引力波等爆发性事件之后, 以余辉的形式存在于目标天区中, 范围达到几百平方度, 因此相比其他观测目标的任务规划, ToO-MM 具有规划目标多、时间短、调姿频繁等难点, 对规划算法的时效性有很高的要求。任务规划需综合天文观测需求与星地资源约束, 制定高效的机遇目标观测序列方案, 对 ToO 目标开展及时有效的观测。

卫星任务规划是一个在复杂多约束条件下的约束满足问题, 对此已开展广泛研究。XMM-Newton, Fermi, HXMT, GECAM 等空间探测项目通过对伽马暴、X 射线暴进行监视和观测, 能够在监视到伽马暴发生时触发警报, 具备针对机遇目标的规划响应能力。SOLAR-A/SOLAR-B, SDO, Parker Solar Probe, ASO-S 等针对太阳事件开展研究, 能够在日冕物质抛射和太阳风暴等机遇事件发生时调整观测模式并开

展观测<sup>[1-4]</sup>。NASA 在其天文卫星观测项目中研发了 SPIKE 任务规划系统, 该系统最开始用于处理天文望远镜长期规划问题, 采取约束满足问题模型进行描述和求解, 内置了许多求解算法, 并具有良好的拓展性。ESA 在空间探测项目上开发了先进任务调度方案 APSI (Advanced Planning and Schedule Initiative), 同时在任务 INTEGRAL (INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) 中采取目标空间搜索的方式实现观测任务的长期规划<sup>[5-6]</sup>。Wu 等<sup>[7]</sup> 针对空间科学卫星天文观测任务建立数学模型, 设计实现了基于 NSGA-II 的多目标空间科学任务规划方法。Liu 等<sup>[8]</sup> 在解决天文卫星巡天扫描任务规划问题时, 通过改进多目标算法调整飞行任务实现智能规划。针对硬 X 射线调制望远镜卫星 (HXMT) 的长期任务规划问题, Huang 等<sup>[9]</sup> 采取启发式算法进行求解。Liu 等<sup>[10]</sup> 对天文观测卫星任务规划的问题要素进行抽象化, 通过改良编码的遗传算法, 提高了规划结果的灵活性。Han 等<sup>[11]</sup> 研究了小卫星星群任务规划问题, 通过改进遗传算法的方式进行求解。针对天文观测卫星任务规划问题, Liu 等<sup>[12]</sup> 实现了基于启发式因子的初始规划算法以及机遇目标动态重规划算法, 针对天文观测卫星在巡天模式下的问题, 提出了基于多目标遗传算法的飞行任务智能规划模型, 很好地解决了能源约束问题。同时也有研究通过改进遗传算法编码并结合其他算法方式求解卫星任务规划问题<sup>[13-18]</sup>。

通过上述已有的空间科学任务规划研究成果可以发现, 智能优化算法对于解决天文卫星任务规划问题具有优化性, 而启发式算法在求解规划问题时具有快速收敛性和稳定性。已有的天文卫星任务规划研究对象通常是以点目标观测任务为主, 而本文研究的 ToO-MM 规划问题为天区范围内机遇目标规划问

题,其规划场景以及算法的应用背景具有特殊性。以空间科学事件 GW170817 为例,其是由中子星合并引发的引力波事件,最早由 LIGO 和 VIRGO 观测到,其后随机遇事件随后由不同波段的探测器在不同时段进行探测,实现多信使联合观测。类似的空间科学事件发生时其天区达到几百平方度,一般根据天文望远镜的设计规格将天区划分为多个可被望远镜视场观测的网格单元(tile),每个 tile 依据其大小、位置、收益等信息被赋予不同的观测优先级。由于被观测的 tile 分布在一片目标天区范围内,而天文卫星每次只能观测其中一小部分,因此如何设定这些 tile 的观测顺序以及调姿过程,实现对整个天区机遇目标尽可能大的覆盖观测,将影响最终的观测收益和观测效果。Xu 等<sup>[19]</sup>针对机遇目标覆盖问题,提出改进遗传算法的求解方式,有效解决了机遇目标观测任务的规划问题,但未考虑地面数传任务。本文考虑了数传任务的规划,增加了每轨观测任务数量上限,采取分段姿态调整时长计算方法,在此基础上对 ToO-MM 问题进行建模,设计实现了基于启发式规则的求解算法。综合考虑卫星姿态调整、地面数传等约束,以 GW170814 在 2022 年 9 月 26 日的规划为验证对象,全天共 15 轨对 230 个 tile 进行观测序列规划,最后给出具体可行的规划结果。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 问题描述

天区机遇目标通常存在于一个目标天区范围中,持续时长几分钟至几天不等,天文卫星望远镜进行观测时同一时间只能观测其中一小片区域,针对天区机遇目标开展观测是天文卫星任务规划的重要研究课题。SVOM 卫星天区机遇目标 ToO-MM 规划问题的输入为机遇目标所处天区范围,在预处理阶段会对天区按照科学用户的需求进行网格划分,将天区分割为一组具有不同优先级、不同观测时长、不同坐标的 tile。ToO-MM 规划问题的核心是确立这些 tile 的观测序列,在最大化观测收益和最小化卫星姿态调整时间的基础上,实现对天区机遇目标的快速响应。

### 1.2 问题假设

面向天区机遇目标的观测任务规划问题关系到机遇目标的可见窗口、优先级、观测时长以及卫星资

源等约束条件,是一个资源约束与观测需求相矛盾的复杂优化问题。为了研究天区机遇目标的规划问题,简化影响因素,进行如下假设。

(1) 实际规划中需考虑卫星平台的存储、电量等约束,这里假设卫星资源能够满足观测需求。

(2) 卫星的姿态调整时间与 tile 之间的旋转夹角有关,假设姿态调整时间与夹角成正比。

(3) 卫星多个有效载荷抽象为一个有效载荷。

(4) 卫星在执行一个观测任务时,不能被抢占和打断。

(5) 卫星同一时刻只能观测一个目标。

面向天区机遇目标的规划过程通常包括预处理阶段、问题建模和方法求解。在预处理阶段,完成卫星轨道计算、天区 tile 划分、可见窗口计算、约束条件预处理等工作,这里假设预处理过程为已经完成的工作。

### 1.3 符号定义

为描述天区机遇目标 ToO-MM 的任务规划问题,表 1 给出了问题模型的有关符号定义。

符号定义详细描述如下。

**定义 1** 第  $i$  个 tile 观测单元  $T_i = \{I, r_i, d_i, u_i, p_i, n_i\}$ ,  $I$  为 tile 的唯一标识符,其中  $r_i$  为赤经,  $d_i$  为赤纬;  $u_i$  为第  $i$  个 tile 所需观测时长;  $p_i$  为第  $i$  个 tile 的观测优先级,  $p_{\max}$  为观测优先级最大值;  $n_i$  为总的可视窗口数量。

**定义 2**  $W_i$  为第  $i$  个 tile 的可视窗口集合,  $W_{\text{sum}}$  为窗口数量,其中第  $k$  个窗口为  $W_{i,k} = \{W_{i,k,s},$

表 1 ToO-MM 规划模型基本符号定义  
Table 1 Parameter definition of ToO-MM model

| 符号  | 描述           |
|-----|--------------|
| $T$ | 机遇目标tile集合   |
| $W$ | 目标可视时间窗口     |
| $G$ | 地面数传站可视窗口    |
| $R$ | 观测任务规划结果     |
| $K$ | 数传任务规划结果     |
| $N$ | tile的总数量     |
| $S$ | 姿态调整时长       |
| $E$ | 姿态调整时段       |
| $C$ | 一个圈次观测tile数量 |
| $O$ | 存储量          |

$W_{i,k,e}, d_{i,k}\}$ ,  $W_{i,k,s}$  为可见窗口开始时刻,  $W_{i,k,e}$  为可见窗口结束时刻,  $d_{i,k}$  为可见窗口的持续时长。

**定义 3** 第  $i$  个 tile 与第  $j$  个 tile 之间的卫星姿态调整时长为  $S_{i,j}$ , 姿态调整后稳定时长为  $S_{t_0}$ 。

**定义 4** 姿态调整时段  $E_j = \{E_{j,s}, E_{j,e}\}$ 。对于规划结果中第  $j$  个姿态调整区间,  $E_{j,s}$  为姿态调整开始时刻,  $E_{j,e}$  为姿态调整结束时刻。

**定义 5** 地面数传站可视窗口集合  $G$ 。  $G_i$  表示第  $i$  个数传可视时间窗口,  $G_{i,s}$  为可视窗口开始时刻,  $G_{i,e}$  为可视窗口结束时刻,  $G_{i,d}$  为可视窗口持续时长。

**定义 6** 第  $k$  圈的总观测 tile 数量  $C_k$ , 满足  $C_k$  小于单圈最大上限  $C_{\max}$ 。

**定义 7**  $R_i$  表示第  $i$  个 tile 的规划结果,  $R_i = \{j_i, c_i, d_i, s_i\}$ 。其中  $j_i$  表示第  $i$  个 tile 是否被安排观测,  $j_i = 1$  表示被规划,  $j_i = 0$  表示未被规划;  $c_i$  为观测所在的圈次;  $d_i$  为安排观测窗口集合,  $\forall d_{i,k} \in d_i, d_{i,k} = \{t_{i,k,s}, t_{i,k,e}, l_{i,k}\}$  为其中第  $k$  个观测窗口,  $t_{i,k,s}$  为第  $k$  个观测窗口开始时刻,  $t_{i,k,e}$  为第  $k$  个观测窗口结束时刻,  $l_{i,k}$  为该窗口的持续时长;  $s_i$  表示第  $i$  个 tile 在最终规划结果中被观测的排序。

#### 1.4 约束条件与优化准则

天文卫星在进行机遇目标观测时, 存在一定的条件约束, 根据以上给出的符号定义, 对规划问题的条件约束和优化准则进行分析。

**约束 1** 任何两个 tile 的观测窗口不能有重叠, 即  $T_i$  的观测窗口集  $W_i$  和  $T_j$  的观测窗口集合  $W_j$  满足

$$W_i \cap W_j = \emptyset. \quad (1)$$

**约束 2** 规划结果中每个 tile 的观测窗口必须在其与天文卫星的可见窗口中, 即

$$[t_{i,k,s}, t_{i,k,e}] \in [W_{i,k',s}, W_{i,k',e}] \text{ if } i \in R. \quad (2)$$

**约束 3** 对于被规划的  $T_i$ , 其各个观测窗口时长总和满足观测所需最短时长, 即

$$\sum_{k=0}^{|W_{\text{sum}}|} l_{i,k} \geq u_i. \quad (3)$$

**约束 4** 每一圈次观测的目标数量不超过规定上限, 即第  $k$  圈次内目标数总和小于卫星设定的上限

$$C_k \leq C_{\max}. \quad (4)$$

**约束 5** 任意两个前后 tile 的观测窗口之间必须

留有足够长的姿态调整和稳定时长, 假设  $T_i$  和  $T_j$  是前后两个观测的 tile, 则

$$W_{j,k,s} - W_{i,k,e} \geq S_{i,j} + S_t. \quad (5)$$

针对天区机遇目标 ToO-MM 规划任务的需求, 规划的优化准则如下。

(1) 最大化科学观测收益。由每个被安排的 tile 各个窗口观测时间以及优先级进行描述, 该值越大, 表明卫星的观测收益越高, 有

$$f_{\text{pro}} = \max \frac{\sum_{i \in R} \sum_{k \in d_i} l_{i,k} p_i}{\sum_{i=0}^N \sum_{k=0}^{n_i} d_{i,k} P_{\max}}. \quad (6)$$

(2) 最小化卫星姿态调整时间。由每两个 tile 之间的姿态调整时间总和衡量, 总和越小表明姿态调整所占用的时间越少, 有

$$f_{\text{slew}} = \min \frac{\sum_{m,n \in T} S_{m,n}}{\sum_{i,j \in T} S_{i,j}}. \quad (7)$$

(3) 最大化应急任务响应度。通过不同优先级的 tile 在结果中的安排顺序, 反映对应急任务的响应程度, 优化准则是使得高优先级的 tile 尽可能早安排观测, 即

$$f_{\text{pri}} = \min \frac{\sum_{i \in R} j_i s_i p_i}{N p_{\max}}. \quad (8)$$

最终模型的优化目标值  $F$  由以上优化准则加权求得, 其中三个权重值依据专家经验给出, 即

$$F = \max(\theta_1 f_{\text{pro}} - \theta_2 f_{\text{slew}} - \theta_3 f_{\text{pri}}). \quad (9)$$

## 2 算法设计

卫星任务规划是一个复杂的多约束、多优化的寻优问题, 其通常的求解方法包含以进化算法为代表的智能优化算法以及启发式算法。前者通过多方向搜索寻找最优解, 后者一般基于专家规则和经验快速获得一个可行解。面向天区范围的空间科学机遇目标 ToO-MM 的任务规划问题不同于常规天文卫星任务规划场景, 具有天区范围广、观测目标多、观测时效性强等特点。考虑到任务场景的特殊性及时效性要求, 采取启发式原则设计多目标任务规划算法 TMH-PA (ToO-MM Heuristic Planning Algorithm)。

## 2.1 姿态调整计算

卫星在观测前后两个 tile 时需要进行姿态调整, 姿态调整的时间与两个 tile 的天球坐标有关, 输入给定赤经赤纬, 首先将其映射为如下三维坐标:

$$P_i = [X_i, Y_i, Z_i], P_j = [X_j, Y_j, Z_j]. \quad (10)$$

其夹角  $S_{i,j}$  的计算公式为

$$S_{i,j} = \arccos \frac{p_i \cdot p_j}{|p_i| \times |p_j|}. \quad (11)$$

姿态调整时间与夹角  $S_{i,j}$  呈分段线性关系, 即

$$S_{i,j} = \begin{cases} 2S_{i,j} + 10, & S_{i,j} < 60^\circ; \\ 1.5S_{i,j} + 30, & 60^\circ \leq S_{i,j} < 100^\circ; \\ 2.25S_{i,j} - 45, & 100^\circ \leq S_{i,j}. \end{cases} \quad (12)$$

## 2.2 观测任务规划

观测任务规划的输入为: 天区 tile 划分集合  $T$ , 可视时间窗口  $W$ , 规划时段  $[T_{\text{start}}, T_{\text{end}}]$ 。算法的输出为最终的观测任务规划结果  $R$ 。

**步骤 1** 首先插入一个辅助规划结果  $T_{\text{zero}}$  到  $R$ , 其观测时长为 0, 天球坐标为  $[0, 0]$ , 初始化当前调度时刻  $T_{\text{now}} = T_{\text{start}}$ , 设定  $k = 0$ 。

**步骤 2** 计算从当前  $T_{\text{cur}}$  到所有未规划 tile 的姿态调整时间, 依据 tile 优先级  $P_i$ , 机遇目标观测时长  $u_i$ , 调姿时间  $S_{\text{cur},i}$ , 加权计算目标函数, 得到  $F$ 。

**步骤 3** 按照  $F$  降序排序, 依据排序结果确定下一个观测的机遇目标  $T_{\text{next}}$ , 判断当前圈次  $k$  结束时刻前能否观测完  $T_{\text{next}}$ , 若是进入步骤 4, 否则进入步骤 5。

**步骤 4** 判断当前圈次  $k$  的总观测 tile 总数是否超过上限  $C_{\text{max}}$ , 若不超过, 则安排  $T_{\text{next}}$  加入到规划结果  $R$  中, 进入步骤 6; 若超过, 进入步骤 5。

**步骤 5** 当前圈次无法安排  $T_{\text{next}}$ , 将其重新添加回未规划 tile 集合中, 新的一轨姿态调整可安排在不可见时段内, 同时调整  $k = k + 1$ 。进入步骤 2。

**步骤 6** 判断当前任务安排时刻是否大于规划终止时刻, 若是进入步骤 7, 否则进入步骤 2。

**步骤 7** 返回最终的 tile 观测任务规划结果  $R$ 。

## 2.3 数传任务规划

在执行 ToO 观测任务时将产生观测数据, 观测数据是快速把控空间科学机遇事件的第一手资料, 因此应在满足已有约束条件情况下进行快速下传。

数传任务规划的输入为: 地面数传站可视时间窗口  $G$ , 观测任务规划结果  $R$ , 卫星当前存储为  $O_{\text{now}}$ 。算法的输出为最终的数传任务规划结果  $K$ 。

**步骤 1** 设定数传次数  $n = 0$ , 数传窗口编号  $j = 0$ 。当前星上存储占用  $O_{\text{now}} = 0$ , 执行数传任务时单位时间内下传数据量为  $V_{\text{trans}}$ , 执行观测任务时单位时间内产生的观测数据量为  $V_{\text{obs}}$ 。

**步骤 2** 将地面数传站可视时间窗口按照开始时刻  $G_{k,s}$  进行升序排序。

**步骤 3** 判断第  $j$  个数传可视窗口是否处于  $R$  观测时段内, 若是, 进入步骤 6; 否则进入步骤 4。

**步骤 4** 判断从第  $n - 1$  次数传结束到第  $n$  次数传开始时刻星上累积的观测数据量  $O_{n-1,n}$ , 通过该时段  $R$  中的观测任务时长乘以  $V_{\text{trans}}$  进行计算,  $O_{\text{now}} = O_{\text{now}} + O_{n-1,n}$ 。

**步骤 5** 计算数传窗口最大可下传数据量  $O_{j,\text{max}}$ 。采取数传窗口持续时长乘以  $V_{\text{trans}}$  进行计算, 最终  $O_{\text{now}} = O_{\text{now}} - O_{j,\text{max}}$ , 若  $O_{\text{now}} < 0$ , 令  $O_{\text{now}} = 0$ ,  $n = n + 1$  并将该数传任务规划结果加入  $K$ 。

**步骤 6**  $j$  增大一步, 判断  $j$  是否大于数传窗口总数, 若是进入步骤 7, 否则进入步骤 3。

**步骤 7** 返回最终的数传任务规划序列  $K$ 。

## 2.4 算法流程

综合考虑 tile 观测任务规划以及数传任务规划后, 给出 TMHPA 算法流程, 如图 1 所示。

## 3 实验与分析

为验证天区场景下机遇目标启发式任务规划求解算法 TMHPA 的有效性, 根据 SVOM 卫星工程提供的算法验证数据, 以空间引力波事件 GW170814 为观测的机遇目标, 该爆发事件为两个距离地球约 18 亿光年的恒星黑洞合并产生, 是全球多探测器网络联合观测到的首个空间科学事件, 其发生的天区范围是赤经  $34.41^\circ - 53.43^\circ$ , 赤纬:  $-54.34^\circ - -7.78^\circ$ 。

输入数据包含 230 个天区划分而成的 tile, 包括对应的天球坐标、观测优先级、所需观测时长等, 部分数据列于表 2。

仿真测试时段为 2022 年 9 月 26 日 00:13:09 UT 至 2022 年 9 月 27 日 00:29:07 UT, 通过目标可见性计算, 依据 SVOM 卫星的载荷视角以及 SAA 区信息, 计算天区范围内划分的各个机遇目标可视时间窗口数据, 地面数传资源考虑密云、三亚和喀什三个地面站。

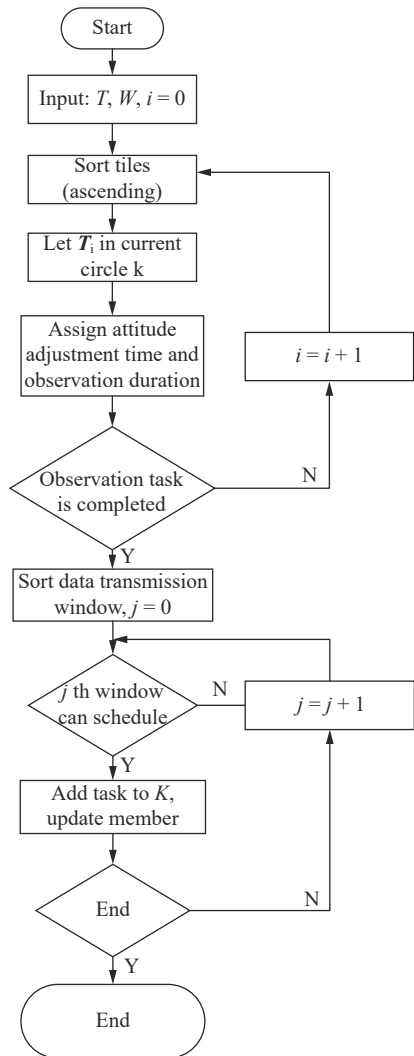


图 1 TMHPA 算法流程  
Fig. 1 Flow chart of TMHPA

3.1 算法结果

TMHPA 算法在仿真测试数据上的部分规划结果列于表 3, 其中每一条规划结果都给出观测的开始时刻, 观测的机遇目标编号, 观测所在的圈次, 实际有效观测时长以及姿态调整时间。图 2 为 TMHPA 算法的规划结果示意, 其中共规划满足 74 个网格机遇目标 tile 的观测需求。在整个规划时段内, 有效观测时长占比为 52.08%, 总的调姿用时占比为 9.49%。图 2 中按照所有被规划的机遇目标编号进行排列, 其中灰色部分为不可见时段, 蓝色部分为有效观测时段, 橙色部分为姿态调整时段, 绿色部分为数传时段。从最终规划结果可以看到, 任务的安排顺序大致符合编号顺序, 即高优先级任务优先安排。在每一圈

表 2 GW170814 天区机遇目标 tile 数据  
Table 2 Tile data of GW170814

| 编号  | 赤经/(°)    | 赤纬/(°)     | 观测时长/min | 观测优先级    |
|-----|-----------|------------|----------|----------|
| 1   | 47.857142 | -42.609806 | 10       | 1.589328 |
| 2   | 45.775862 | -46.571847 | 10       | 1.553358 |
| 3   | 46.428571 | -42.609806 | 10       | 1.425764 |
| 4   | 47.950812 | -44.201529 | 10       | 1.415292 |
| ... | ...       | ...        | ...      | ...      |
| 228 | 35.816326 | -53.572233 | 10       | 0.068670 |
| 229 | 39.919354 | -43.406858 | 10       | 0.066731 |
| 230 | 50.901639 | -44.201529 | 10       | 0.066025 |

表 3 TMPHA 规划结果  
Table 3 Planning result of TMPHA

| 年-月-日      | 时刻 (UT)  | 积秒       | 编号  | 圈次   | 持续时长/s | 调姿时间/s |
|------------|----------|----------|-----|------|--------|--------|
| 2022-09-26 | 01:24:56 | 23160296 | 4   | 3975 | 733    | 108    |
| 2022-09-26 | 02:15:25 | 23163325 | 5   | 3976 | 600    | 104    |
| 2022-09-26 | 02:27:09 | 23164029 | 7   | 3976 | 600    | 105    |
| 2022-09-26 | 02:38:54 | 23164734 | 6   | 3976 | 600    | 108    |
| ...        | ...      | ...      | ... | ...  | ...    | ...    |
| 2022-09-26 | 23:39:30 | 23240370 | 56  | 3989 | 600    | 113    |
| 2022-09-26 | 23:51:23 | 23241083 | 57  | 3989 | 600    | 105    |
| 2022-09-27 | 00:03:08 | 23241788 | 60  | 3989 | 958    | 105    |

次内部, 机遇目标的观测顺序需要考虑姿态调整的影响, 不再按照编号排序。数传时段安排在 tile 不可见时段内, 在确保地面能够及时获取观测数据的同时不占用宝贵的 tile 可见观测时段。

图 3 为 tile 之间的姿态调整过程, 纵坐标为第  $i-1$  个观测的 tile 到第  $i$  个 tile 之间的调姿时间。模型设定的优化目标值列于表 4, 其中最大化任务观测收益  $f_{pro} = 0.0124$ , 最小化姿态调整目标函数  $f_{slew} = 0.028$ , 最大化优先级任务满足目标函数  $f_{pri} = 0.043$ , 最终各个目标函数加权  $F = 0.0641$ 。

3.2 与其他算法的对比

为进一步验证基于启发式算法 TMHPA 在解决天区机遇目标任务规划问题时的有效性, 采用经典遗传算法 GA (Genetic Algorithm,) 以及差分进化算法 DEA (Differential Evolution Algorithm) 进行求解与比较。其中 GA 算法参数设定为交叉概率 0.7, 变异概率 0.1; DEA 算法参数设定缩放因子  $F = 0.7$ , 交叉

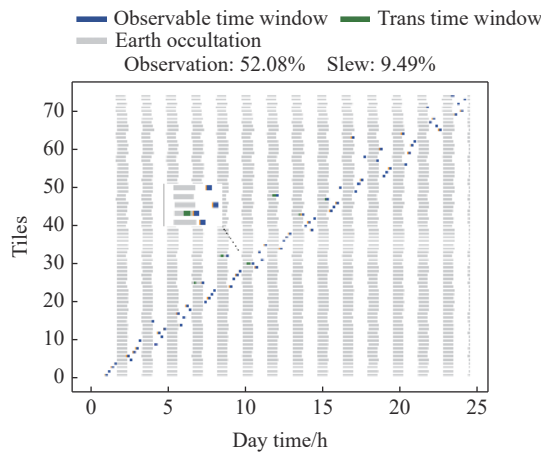


图 2 TMHPA 算法在 GW170814 上的规划结果  
Fig. 2 TMHPA planning result on GW170814

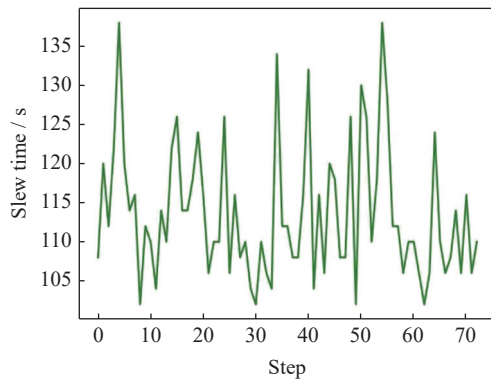


图 3 姿态调整过程  
Fig. 3 Process of slew

表 4 各个优化目标函数值

Table 4 Value of each optimization objective function

| 优化目标 | $f_{pro}$ | $f_{slew}$ | $f_{pri}$ | $F$    |
|------|-----------|------------|-----------|--------|
| 数值   | 0.0124    | 0.028      | 0.043     | 0.0641 |

概率为 0.7。各个算法最大迭代次数均设为 100, 种群规模设为 200。实验的环境为操作系统 Windows 7, 处理器为 CoreI3, 内存大小为 10 GByte。

对三个算法分别进行 10 组实验, 实验结果的平均值列于表 5。TMHPA 算法在总观测收益上与其他两个算法接近, 达到 50.90, 满足最大化天区机遇目标的观测收益需求。同时, 姿态调整时间为 8199.36 s, 小于另外两种方法, 可以降低卫星因为调整姿态带来的能量损耗以及时间占用。在算法总耗时上, TMHPA 算法耗时 3.78 s, 远小于另外两个进化算法, 这是

表 5 算法对比结果

Table 5 Comparison results of algorithm

| 算法      | GA      | DEA     | TMHPA   |
|---------|---------|---------|---------|
| 总观测收益   | 54.17   | 52.32   | 50.90   |
| 卫星调用时/s | 8502.11 | 8471.83 | 8199.36 |
| 算法总耗时/s | 144.31  | 135.45  | 3.78    |

因为启发式算法的求解过程稳定明确。综上所述, 本文提出的启发式求解算法在求解天区机遇目标的规划问题中具有较强的求解效率和优势。

## 4 结论

通过对天文卫星空间科学机遇目标 ToO-MM 规划问题进行数学描述和建模, 建立了以高优先级任务响应度、任务观测收益、姿态调整为优化准则的求解模型, 设计实现了基于多启发式规则的规划算法 TMHPA。规划算法被应用于中法合作 SVOM 卫星工程的前期验证工作中, 采用 GW170814 引力波事件机遇目标数据进行了仿真实验, 规划结果显示本文建立的模型和方法能够有效解决天区范围内机遇目标规划问题, 在获取观测收益的同时实现对机遇目标的快速响应, 满足规划算法的设计需求。

## 参考文献

- [1] PAUL J, WEI J Y, BASA S, *et al.* The Chinese-French SVOM mission for gamma-ray burst studies[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2011, **12**(3): 298-308
- [2] CASTELLINI F, LAVAGNA M. Advanced planning and scheduling initiative's XMAS tool: AI for automatic scheduling of XMM-Newton long term plan[C]//6 th International Workshop on Planning and Scheduling for Space. Pasadena: European Space Agency Publications Division, 2009
- [3] LU F J, ZHANG S N. Status of the hard X-ray modulation telescope (insight-HXMT) project[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(5): 623-626
- [4] LI Xinqiao, WEN Xiangyang, AN Zhenghua, *et al.* The GECAM and its payload[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, **50**(12): 129508 (李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM 卫星有效载荷介绍[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, **50**(12): 129508)
- [5] FRATINI S, CESTA A. The APSI framework: a platform for timeline synthesis[C]//Proceedings of the 1 st Workshops on Planning and Scheduling with Timelines. Atibaia: PSTL, 2012: 8-15

- [6] KITCHING M, POLICELLA N. A local search solution for the INTEGRAL long term planning[C]//7 th International Workshop on Planning and Scheduling for Space. Darmstadt: IWPSS, 2011
- [7] WU Haiyan, MENG Xin, ZHANG Yuzhu, *et al.* Research on the planning method for astronomy observation mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(5): 561-568 (吴海燕, 孟新, 张玉珠, 等. 面向天文观测的空间科学卫星任务规划方法研究[J]. *空间科学学报*, 2013, **33**(5): 561-568)
- [8] LIU Wei, LIN Baojun. Intelligent model of astronomical satellite using GA for scanning the celestial sphere[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(3): 654-656 (刘薇, 林宝军. 天文卫星巡天扫描智能规划模型及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, **19**(3): 654-656)
- [9] HUANG Yue, QU Jinlu, JIA Shumei, *et al.* Long-term planning algorithm for the HXMT mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(6): 766-772 (黄跃, 屈进禄, 贾淑梅, 等. HXMT卫星长期任务规划算法[J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(6): 766-772)
- [10] LIU Wen, LI Ligang. Mission planning of space astronomical satellite based on improved genetic algorithm[J]. *Computer Simulation*, 2014, **31**(12): 54-58 (刘雯, 李立钢. 基于改进遗传算法的天文卫星任务规划研究[J]. *计算机仿真*, 2014, **31**(12): 54-58)
- [11] HAN Chuanqi, LIU Yurong, LI Hu. Mission planning for small satellite constellations based on improved genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(1): 129-134 (韩传奇, 刘玉荣, 李虎. 基于改进遗传算法对小卫星星群任务规划研究[J]. *空间科学学报*, 2019, **39**(1): 129-134)
- [12] LIU Yong. Research on Astronomical Satellite Target of Opportunity Task Re-planning Algorithm[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019 (刘勇. 天文卫星机遇目标任务重规划方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019)
- [13] HAN Peng, GUO Yanning, LI Chuanjiang, *et al.* A relative imaging time coding-based genetic algorithm for agile imaging satellite task planning[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, **42**(11): 1427-1438 (韩鹏, 郭延宁, 李传江, 等. 基于相对成像时刻编码遗传算法的敏捷成像卫星任务规划[J]. *宇航学报*, 2021, **42**(11): 1427-1438)
- [14] GAN Lan, GONG Shengping. Observation mission planning for maneuverable satellite constellations towards multiple targets[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, **61**(3): 240-247 (甘岚, 龚胜平. 机动卫星星座对多目标成像任务规划[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2021, **61**(3): 240-247)
- [15] KIM H, CHANG Y K. Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, **40**: 17-32
- [16] ZHAO Lin, WANG Shuo, HAO Yong, *et al.* Mission planning for agile satellite based on the mapping relationship between ground missions and spatial attitudes[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, **39**(10): 322066 (赵琳, 王硕, 郝勇, 等. 基于地面任务-空间姿态映射的敏捷卫星任务规划[J]. *航空学报*, 2018, **39**(10): 322066)
- [17] MAO Liheng, DENG Qing, LIU Rouni, *et al.* CPM-GA for multi-satellite and multi-task simulation scheduling[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, **33**(1): 205-214 (毛李恒, 邓清, 刘柔妮, 等. 针对多星多任务仿真调度的关键路径遗传算法[J]. *系统仿真学报*, 2021, **33**(1): 205-214)
- [18] YU Jing, YANG Wenyuan, LIU Xiaolu, *et al.* Intensive task merging method and scheduling algorithm for imaging satellites[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, **49**(10): 73-78 (于静, 杨文沅, 刘晓路, 等. 成像卫星密集任务合成方法及其调度算法[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, **49**(10): 73-78)
- [19] XU Ziling. Research on Astronomical Satellite ToO Planning under Tiling Coverage Strategy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center), 2021 (徐子羚. Tiling覆盖策略的天文卫星机遇目标任务规划方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2021)