

HXMT 卫星长期任务规划算法^{*}

黄跃¹ 屈进禄¹ 贾淑梅¹ 马想¹
宋黎明¹ 陈黎² 张文昭²

1(中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室 北京 100049)

2(北京师范大学天文学系 北京 100875)

摘要 硬 X 射线调制望远镜 (HXMT) 卫星是中国首颗空间 X 射线天文卫星. 为充分利用卫星资源, 使科学产出最大化, 需要进行长期任务规划. 长期任务规划是一个复杂的多目标优化问题. 通过分析 HXMT 观测特点和约束条件, 建立了 HXMT 长期任务规划问题模型, 并采用贪婪算法加遗传算法对模型进行求解. 实例分析结果表明该方法能够有效解决 HXMT 长期任务规划问题.

关键词 硬 X 射线调制望远镜, 长期任务规划, 贪婪算法, 遗传算法

中图分类号 P 171.3

Long-term Planning Algorithm for the HXMT Mission

HUANG Yue¹ QU Jinlu¹ JIA Shumei¹ MA Xiang¹
SONG Liming¹ CHEN Li² ZHANG Wenzhao²

1(*Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

2(*Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Abstract Hard X-ray Modulation Telescope (HXMT) satellite is China's first space X-ray astronomy satellite. The planning and scheduling of HXMT observations is a complex multi-objective optimization problem, and the optimization object is to maximize simultaneously the scientific return and the observation efficiency. By analyzing the characteristics of HXMT observations and all the important factors in the efficient scheduling of a celestial source, such as celestial constraints and the additional scientific constraints, the HXMT long-term planning model is established. The greedy algorithm and genetic algorithm are combined to solve the model. Simulation results show that the approach is effective in solving the HXMT long-term planning problem, based on the analysis of the

* 国家自然科学基金项目 (11403026) 和中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目 (XDA04010300) 共同资助

2016-12-06 收到原稿, 2017-07-02 收到修定稿

E-mail: huangyue@ihep.ac.cn

first year observations of Suzaku Mission.

Key words HXMT, Long-term planning, Greedy algorithm, Genetic algorithm

0 引言

硬 X 射线调制望远镜 (Hard X-ray Modulation Telescope HXMT) 卫星是中国首颗 X 射线天文卫星, 其主要科学目标是实现宽波段 X 射线 (1~250 keV) 高灵敏度和高空间分辨率成像巡天, 研究致密天体中子星和黑洞强引力场中的动力学和高能辐射过程^[1]. HXMT 在轨科学观测将受卫星轨道、空间环境、科学目标、探测器安全等多种约束条件^[2]的限制, 为保障卫星安全, 最大化科学产出, 需要对 HXMT 的观测任务进行合理规划.

HXMT 任务规划是一个复杂的多目标最优化问题, 包含几百个观测任务, 跨越时间范围宽, 按照规划的时间长度可划分为长期任务规划和短期任务规划. 长期任务规划考虑总的优化策略, 综合卫星观测约束和科学观测需求, 将观测任务分配到周, 排除不同任务之间的资源使用冲突. 短期任务规划根据长期规划结果, 并考虑观测任务之间的姿态机动时间、卫星姿态和存储器容量等约束, 产生一个精确到秒的观测时间序列.

国际上空间天文发展较早, 对于观测任务规划问题的研究取得了很大的成果. Miller 等^[3]针对哈勃望远镜 (HST) 长期任务规划问题开发了 SPIKE 系统, 建立了约束满足问题 (CSP) 模型, 并采用神经网络算法求解. ESA 在 APSI 框架基础上采用局域搜索策略解决了欧洲天文卫星 INTEGRAL^[4] 和 XMM^[5] 长期任务规划问题. 中国卫星任务规划研究多集中于对地观测卫星, 对空间天文卫星任务规划研究较少. Wu 等^[6]在研究空间天文观测卫星任务规划问题时, 以任务重要性、巡天扫描任务完成度和资源消耗为评价准则, 建立了多目标观测任务规划算法 MOMPA. Liu 等^[7]建立了以完成质量和实现质量为目标函数, 以能源和数传为约束条件的任务规划模型, 设计了基于观测窗口序列的多目标遗传算法进行求解. 文献 [8] 针对分阶段的 HXMT 巡天扫描方案, 建立了基于天球星象点轨迹的智能规划模型.

不同卫星的任务特点和约束限制不同, 因此任务规划方法有很大区别. 本文根据 HXMT 任务特点,

通过分析 HXMT 长期任务规划问题的优化目标和约束条件, 建立了该问题的数学模型, 在此基础上提出一种贪婪算法加遗传算法的复合求解方法, 并通过仿真对该方法的有效性进行了验证.

1 问题分析

1.1 观测任务

HXMT 卫星利用星载科学载荷对用户感兴趣的天体目标进行定点或扫描观测. 其中, 定点观测可以研究黑洞、中子星等高能天体的多波段 X 射线快速光变, 此时卫星采用三轴稳定惯性定向的姿态控制方式, 载荷光轴指向惯性空间某一指定观测目标. 观测时间由用户给定的有效观测时间和观测效率决定. 扫描观测可以进行宽波段大天区 X 射线巡天成像. 卫星采用某一本体轴单轴旋转的姿态控制方式, 通过逐行往复扫描的方式实现. 小天区待扫描区域的中心位置和扫描半径以及扫描速度、扫描行间距等扫描参数由用户根据需求确定. 扫描观测时间通过扫描参数计算得到, 从几小时至几天不等.

1.2 观测约束

卫星在执行观测时受空间环境、卫星安全、科学需求等多种约束条件的限制. 由于 HXMT 卫星具有较低的轨道高度 (550 km), 在观测时几乎每圈都会受到地球遮挡的影响, 遮挡比例取决于卫星轨道面和观测目标的相对位置. 有些科学观测目标需要长时间、连续不间断的观测, 为避免地球遮挡, 需要观测目标处于卫星轨道面两极处. 为保护卫星有效载荷不受空间带电粒子的影响, 卫星经过南大西洋异常区时需进入保护模式, 不能进行正常科学观测. 此外, 为保证卫星安全, HXMT 观测时需要避免太阳对探测器的直接照射. 在实现目标有效观测时间的最大化的同时, 也应避免月球对观测目标的影响. 在综合考虑上述观测限制的条件下, 应对不同目标源的观测效率实现最大化.

HXMT 卫星是以科学目标为主导的卫星, 根据其科学需求, 一次典型观测时间为 1~3 天. 为尽可能发挥 HXMT 的科学能力, 实现其科学目标的最大

化,除保证 HXMT 核心科学观测外,将向国际天文学界征集客座观测提案.所有观测任务将分为 A, B, C 三个等级,首先保证观测 A, B 级任务,如果有空余时间再观测 C 级任务.除了上面提到的卫星约束外,用户会针对不同观测任务提出特殊的观测需求.这类需求主要包括三类:(1) 固定时间观测,任务必须在一个或几个固定时间段内进行;(2) 相位依赖观测,对于某些周期性的现象,需要在特定周期相位进行观测;(3) 监测观测,要求以一定的时间间隔对目标源进行观测.对于用户有特殊要求的观测任务,根据特殊要求和观测次数要求进行观测,这类任务通常约占总观测时间的 10%.而对于其他观测任务,每个任务只进行一次观测.

HXMT 长期任务规划优先考虑高优先级(A, B 级)的观测任务,形成每周的观测规划. C 级观测任务作为备选观测在短期计划中规划.考虑到机遇目标观测(Target of Opportunity, ToO)等临时观测任务,进行长期任务规划时,需预留一定的空余时间.两次观测之间的姿态机动问题、星载存储器容量等约束在短期任务规划时进行考虑.

2 数学模型

2.1 模型变量定义

为建立 HXMT 长期任务规划的数学模型,首先给出相关参数定义如下.

(1) 规划时段 $[T_s, T_e]$, 这里 T_s 和 T_e 分别为长期任务规划起始时间和结束时间.

(2) 任务规划窗口集合 W . 将长期任务规划时间段划分为一周长度的时段,称为一个任务规划窗口. $\forall w \in W$ 可以表示为 $\langle S_w, E_w, F_w \rangle$. 其中 S_w 为任务规划窗口开始时间, E_w 为任务规划窗口结束时间, F_w 为覆盖比例,也就是每周观测时间占该周总时间的比例.

(3) 观测模式 $M = \{Point, SSDS\}$, 这里 *Point* 代表定点观测模式, *SSDS* 代表小天区扫描观测模式.

(4) 用户要求的约束类型 $T_c = \{Coord, Phase, Monitor\}$, 其中 *Coord* 的形式为 $[t_s, t_e]$, 表示固定时间观测, t_s 为最早开始时间, t_e 为最晚结束时间; *Phase* 的形式为 $\langle T_0, P_e, P_{min}, P_{max} \rangle$, 表示相位依赖观测, T_0 为初始历元, P_e 表示周期, P_{min} 和 P_{max} 分别为最小和最大相位; *Monitor* 的形式

为 $\langle I_{min}, I_{max} \rangle$, 表示监测观测, I_{min} 是两次观测的最小间隔, I_{max} 是两次观测的最大间隔.

(5) 观测任务集合 $T, \forall i \in T$. 该集合可由 $\langle N_i, M_i, E_i^w, T_{1i}, T_{2i}, T_{ci}, P_i \rangle$ 描述. 其中 N_i 表示观测次数,通常为 1 次; M_i 为观测模式; E_i^w 为任务 i 在规划窗口 w 的观测效率; T_{1i} 为定点观测的有效观测时间; T_{2i} 为小天区扫描观测的扫描时间; T_{ci} 为用户要求的约束类型; P_i 为任务优先级.

(6) 任务优先级 $P = \{A, B, C\}$, 优先级从 A 到 C 依次降低.

(7) 决策变量

$$C_{ij}^w = \begin{cases} 1, & \text{任务 } i \text{ 的第 } j \text{ 次观测在第 } w \text{ 周执行,} \\ 0, & \text{任务 } i \text{ 的第 } j \text{ 次观测在第 } w \text{ 周不执行.} \end{cases}$$

2.2 目标函数

HXMT 长期任务规划目标是在某一确定的规划时段内,在满足卫星约束的前提下安排尽可能多的观测任务,以获得最大的科学产出.对于定点观测,有效观测时间相同时,观测效率越高,需要的观测时间越少;对于小天区扫描观测,观测效率虽然不影响扫描时间,但会影响曝光深度.因此目标函数可以描述如下.

观测效率准则

$$\max f_1 = \sum_{i \in T} \sum_{j=1,2,\dots,N_i} \sum_{w \in W} C_{ij}^w E_i^w.$$

任务等级准则

$$\max f_2 = \sum_{i \in T} \sum_{j=1,2,\dots,N_i} \sum_{w \in W} C_{ij}^w P_i.$$

2.3 约束条件

HXMT 长期任务规划约束条件如下.

(1) 任务 i 的每次观测最多执行一次,即

$$\sum_{w \in W} C_{ij}^w \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, N_i, \quad i \in T.$$

(2) 观测可见性约束. 任务 i 的观测只能在卫星对其可见的时间窗口内,定义为任务在该窗口的观测效率必须大于 0.3. 对于 $C_{ij}^w = 1$, 有 $E_i^w > 0.3, i \in T$.

(3) 每个规划窗口的总观测时间不能超过可用时间的 120%, 即

$$\left(\sum_{M_i=Point, i \in T} \sum_{j=1,2,\dots,N_i} C_{ij}^w \frac{T_{1i}}{E_i^w} + \right.$$

$$\sum_{M_i=SSDS, i \in T} \sum_{j=1,2,\dots,N_i} C_{ij}^w T_{2i} \leq F_w(E_w - S_w) \times 120\%, \quad w \in W.$$

(4) 用户要求的约束, 包括固定时间观测、相位依赖观测、监测观测三类.

① 固定时间观测

对 $i \in T$, $T_{c_i} = Coord$, $C_{ij}^w = 1$, 有 $[S_w, E_w] \cap [t_s^i, t_e^i] \neq \emptyset$.

② 相位依赖观测

对 $i \in T$, $T_{c_i} = Phase$, $C_{ij}^w = 1$, 有 $\exists n$, $[S_w, E_w] \cap [T_0^i + (n + P_{\min}^i)P_e^i, T_0^i + (n + P_{\max}^i)P_e^i] \neq \emptyset$.

③ 监测观测

对 $i \in T$, $T_{c_i} = Monitor$, $C_{ij}^w = 1$, 有 $\exists w_1$, $C_{ij-1}^{w_1} = 1$; $(S_{w_1} - E_w) > I_{\min}^i$, $(E_{w_1} - S_w) < I_{\max}^i$.

3 模型求解

HXMT 长期任务规划是一个多目标、多约束的复杂最优化问题, 为了保证在规定的时间内输出有效结果, 这里采用贪婪算法 (greedy algorithm)^[9] 加遗传算法 (genetic algorithm)^[10] 的求解方法. 贪婪算法是一种解决最优化问题的近似方法, 其采用逐步构造最优解的方法, 即在每个阶段, 都做出一个看上去最优的决策. 该算法已被应用到各类组合优化问题^[11,12]. 对于用户有特殊要求的观测任务, 采用贪婪算法思想, 根据任务优先级顺序和最大化观测效率的原则进行规划. 因为此类观测任务通常优先级比较高且所占比例不大, 采用贪婪算法对整体最优结果不会产生太大影响, 但对问题复杂性和优化性能有很大改善. 在上述规划结果的基础上, 采用遗传算法对其他任务进行规划. 遗传算法是模拟自然界生物繁衍、进化过程的启发式算法, 具有较好的全局搜索性能和潜在的并行性. 已经广泛运用于复杂的函数极值问题、组合优化问题、规划调度问题等的求解^[10]. 以下对算法的设计进行介绍.

3.1 贪婪算法设计

在贪婪算法求解过程中, 需要考虑两方面的问题: 一是如何在多个任务中选择下一个要规划的任务; 二是选择哪个规划窗口执行该任务. 下一个任务 T_i 的选择准则是其优先级为所有未安排任务中优先级最高的. 确定下一个任务后, 要确定任务的执行窗口, 对于不同的用户要求, 确定规则如下.

(1) 固定时间观测. 根据该任务的固定时间段 $[t_s, t_e]$, 确定任务可规划窗口 w . 准则为 $[t_s, t_e]$ 与 $[S_w, E_w]$ 有重合, 且重合时间大于任务观测时间. 再取 $\max(E_i^w)$, 即为任务执行窗口.

(2) 相位依赖观测. 根据历元 T_0 和周期 P_e , 确定规划时段 $[T_s, T_e]$ 内的周期整数 n , 即 $T_0 + nP_e \in [T_s, T_e]$. 得到该任务的可观测时段 $[T_0 + (n + P_{\min})P_e, T_0 + (n + P_{\max})P_e]$. 最后可按固定时间观测确定任务执行窗口.

(3) 监测观测. 第一步, 规划第 1 次观测, 根据 $\max(E_i^w)$ 确定第 1 次观测的执行窗口 w_i^1 . 第二步, 规划第 2 次观测, 根据观测最小和最大间隔 $\langle I_{\min}, I_{\max} \rangle$, 确定观测可规划窗口 w :

$$S_w - E_{w_i^1} < I_{\max}, E_w - S_{w_i^1} > I_{\min}.$$

取 $\max(E_i^w)$ 确定第 2 次观测的执行窗口 w_i^2 . 以此类推, 依次确定第 3 至 N_i 次观测的执行窗口.

在上述过程中, 判断观测可规划窗口时需要考虑该窗口是否有足够的时间执行此观测. 此外判断观测的执行窗口时观测效率需大于 0.3.

3.2 遗传算法设计

在上述规划结果的基础上, 针对没有特殊要求的观测任务, 采用最佳个体保留策略的实数编码的遗传算法求解. 算法具体步骤如下.

(1) 初始化种群. 采用随机策略, 产生初始化种群 P_0 .

(2) 适应度值计算. 计算当前种群 P_t 中每个个体的适应值.

(3) 选择、交叉、变异. 采用轮赌盘方法, 从种群 P_t 中选择父代个体进行交叉操作, 对生成的子代个体进行变异操作得到种群 P_{t+1} .

(4) 最佳个体保留. 选择种群 P_t 中适应度值最大的个体替换种群 P_{t+1} 中适应度值最小的个体.

终止条件: 如果达到最大迭代次数, 则停止搜索; 否则 $t = t + 1$, 跳到步骤 (2).

3.2.1 问题编码

根据 HXMT 长期任务规划问题的特点选择实数编码方式, 即染色体由每个观测的执行窗口组成. 每个基因位对应一个观测任务或观测 (根据上面分析可知每个任务只有 1 次观测). 假设有 N 个任务, 则一条染色体可以表示为

$$C = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_N), \quad w_i = 0, 1, 2, \dots$$

其中 w_i 表示观测任务 i 的执行窗口, $w_i = 0$ 表示观测任务不安排执行.

3.2.2 适应度函数

HXMT 长期任务规划问题的适应度函数采用乘性聚合方法^[13] 将观测效率和任务等级两个目标转化为单目标优化问题. 长期任务规划序列需要满足约束 (1)~(4), 通过编码方法已经满足了约束 (1), 贪婪算法处理了约束 (4), 对约束 (2) 和 (3) 采用罚函数法进行处理. 因此适应度函数定义为

$$f(C) = \sum_{1 \leq i \leq N} \bar{P}_i E_i^w + \sum_{1 \leq i \leq N} G_i(C) + \sum_{w \in W} H_w(C).$$

其中 \bar{P}_i 由任务优先级 P_i 决定. $G_i(C)$ 为观测任务不满足可见性约束的惩罚项, $H_w(C)$ 为规划窗口总观测时间超出的惩罚项. 函数的构造如下:

$$G_i(C) = \begin{cases} \alpha(E_i^{w_i} - 1), & E_i^{w_i} \leq 0.3; \\ 0, & E_i^{w_i} > 0.3. \end{cases}$$

$$H_w(C) = \begin{cases} \beta(A_w - h_w)/A_w, & h_w > A_w; \\ 0, & h_w \leq A_w. \end{cases}$$

式中, h_w 为规划窗口 w 的总观测时间,

$$h_w = \sum_{w_i=W, M_i=Point} \frac{T_{1i}}{E_i^w} + \sum_{w_i=W, M_i=SSDS} T_{2i};$$

A_w 为规划窗口 w 的可用时间, $A_w = F_w(E_w - S_w) \times 1.2$; α 和 β 为相应的惩罚系数.

需要指出的是, 按照以上公式计算的结果在某些情况下为负值, 在这种情况下 $f(C)$ 取为 0.

3.2.3 遗传算子

(1) 选择. 为防止最优个体的丢失, 采用轮赌盘加最佳个体保留的选择策略. 首先将当前种群中适应值最大的个体直接复制到下一代群体中. 然后再采用轮赌盘的方法从当前种群中选择个体进行交叉和变异操作.

(2) 交叉. 采用多点交叉策略, 根据观测任务数设 2~4 个交叉点. 交叉方法如图 1 所示. 假设有 5 个规划窗口, 10 个观测任务. 参与交叉的个体为 P_1 和 P_2 , 随机选择 2 个交叉基因位.

(3) 变异. 变异算子选用随机变异法, 对要进行变异操作的个体的每一位基因, 在变异概率作用下进行变异.

4 仿真校验

为更切合实际情况, 选择 Suzaku 卫星^[14] 第一年的观测目标^[15] 作为仿真观测任务. Suzaku 卫星是日本和美国共同研制的一颗 X 射线天文卫星, 于 2006 年发射升空, 轨道高度 550 km, 轨道倾角 31° . Suzaku 搭载两个主要科学载荷 XIS 和 XRT, 探测能区为 0.2~600 keV. 可以看出 Suzaku 与 HXMT 的轨道特点和探测能段均有相似之处.

Suzaku 卫星第一年的观测目标 (除去 ToO 观测) 如下: A 级观测任务 102 个, 有效观测时间 5804 ks; B 级 82 个, 有效观测时间 4682 ks; 总有效观测时间为 10.49 Ms. 为保证有效观测时间的一致性, 规划时段设为 2017 年 1 月 5 日至 2017 年 12 月 27 日, 规划窗口总计 51 周. 根据 Suzaku 卫星的运行经验, 估计 HXMT 每天的有效观测时间为 37 ks. 考虑到要为 ToO 等临时观测预留 15% 的时间, 该规划时段内总有效观测时间为 11.23 Ms, 与挑选的观测任务所需

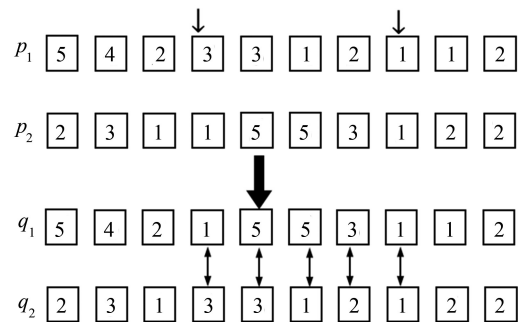


图 1 交叉操作方法
Fig. 1 Illustration of cross operation

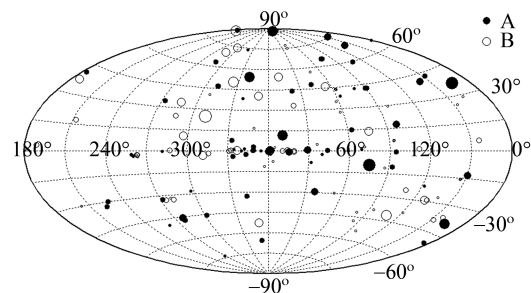


图 2 Suzaku 卫星 AO-01 观测目标在天球上的分布. 其中圆圈大小代表有效观测时间的长短
Fig. 2 Distribution of the Suzaku AO-01 observing targets in the Galaxy. The circle size represents the length of the effective observation time

有效观测时间匹配。

仿真中的参数设置: 对于任务优先级 $P_i = A$, $\bar{P}_i = 2$; $P_i = B$, $\bar{P}_i = 1.7$; 惩罚系数 $\alpha = 1.7$, $\beta = 5.3$. 遗传算法的相关参数设置为: 种群大小 400, 交叉概率 0.85, 变异概率 0.08, 最大迭代次数 4000. 为验证算法有效性, 采用 MATLAB 语言编程实现算法, 在内存为 32 G, Intel-E5 八核心 CPU 的环境下, 进行 15 次仿真, 平均运行时间为 1506.7 s.

从图 3 所示的算法收敛过程可以看出, 算法具有较好的收敛性。

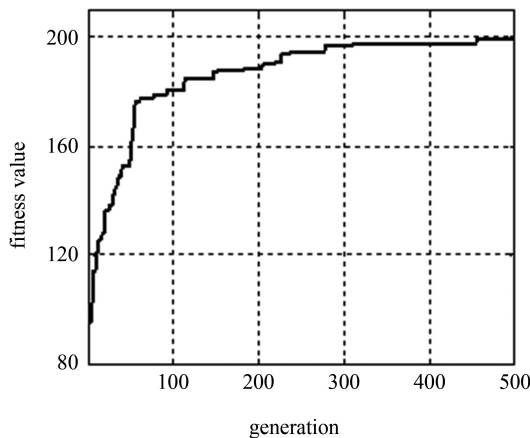


图 3 进化收敛曲线

Fig. 3 Evolution curve

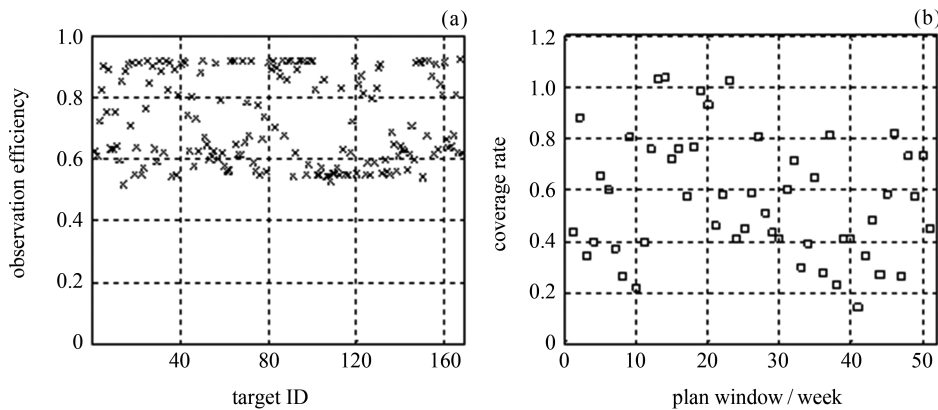


图 4 规划结果的约束分析

Fig. 4 Constraints analysis of experimental result

图 4 给出的是仿真规划结果的约束分析. 图 4(a) 为每个观测任务在其执行窗口的观测效率, 可以看出规划结果中观测任务的观测效率均大于 0.3, 满足约束条件 (2), 即观测可见性约束. 从图 4(b) 可以看出每个规划窗口的总观测时间与窗口可用时间的比例均小于 1.2, 满足约束条件 (3), 即窗口总时间约束. 说明以最大化观测效率和任务等级为目标函数的规划算法, 输出的任务规划结果为每个观测任务对应一个观测执行窗口, 且满足观测约束条件, 符合 HXMT 卫星长期任务规划的需求。

5 结论

HXMT 卫星长期任务规划问题是一个多目标、多约束的复杂最优化问题. 通过分析 HXMT 卫星长期任务规划的特点, 给出了一种以最大化观测效率和任务等级为目标函数的规划模型, 在此基础上设计了基于贪婪算法加遗传算法的 HXMT 卫星长期任务规划算法. 最后利用 Suzaku 卫星数据生成的观测任务对算法进行了检验, 结果表明算法能够有效解决 HXMT 卫星长期任务规划问题, 在满足约束的条件下达到充分利用卫星资源、最大化科学产出的目的。

参考文献

[1] LI Tipei, WU Mei. The hard X-ray modulation telescope mission [J]. *Physics*, 2008, **37**(9): 648-651 (李惕碛, 吴枚. 空

间硬 X 射线调制望远镜 [J]. *物理*, 2008, **37**(9): 648-651)

[2] LU Yu, ZHANG Wenzhao, QU Jinlu, et al. Observation constraints of the hard X-ray modulation telescope HXMT [J]. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 2010,

- 53(S1): 31-35
- [3] JOHNSTON M D, MILLER G E. SPIKE: intelligent scheduling of Hubble space telescope observations [C]// Intelligent Scheduling. San Francisco: Morgan-Kaufmann, 1994: 391-422
- [4] PRALET C, VERFAILLIE G. AIMS: a tool for long-term planning of the ESA INTEGRAL mission [C]//The 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IW PSS-09). Pasadena, USA: IW PSS, 2009
- [5] LAVAGNA M, CASTELLINI F. Advanced Planning and Scheduling Initiative's XMAS tool: AI for automatic scheduling of XMM-Newton long term plan [C]//The 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IW PSS-09). Pasadena, USA: IW PSS, 2009
- [6] WU Haiyan, MENG Xin, ZHANG Yuzhu, *et al.* Research on the planning method for astronomy observation mission [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 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)
- [7] LIU Wen, LI Ligang. Mission planning of space astronomical satellite based on improved genetic algorithm [J]. *Comput. Simul.*, 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)
- [8] LIU Wei. Intelligent Controlling Model of HXMT Astronomy Satellite Using MOGA for Scanning the Celestial Sphere [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006 (刘薇. 基于 MOGA 的 HXMT 天文卫星巡天扫描智能规划模型 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006)
- [9] CORMEN T T, LEISERSON C E, RIVEST R L. Introduction to algorithms [M]. McGraw-Hill, 2001
- [10] XUAN Guangnan, CHENG Runwei. Genetic Algorithms and Engineering Design [M]. Beijing: Science Press, 2000 (玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2000)
- [11] WU Hao, LI Ziyang, HU Jian, *et al.* Formulation of the satellite observation scheme of an area based on greedy algorithm [J]. *Remote Sens. Inf.*, 2010(1): 3-6, 31 (吴昊, 李子扬, 胡坚, 等. 基于贪婪算法的卫星区域观测方案制定 [J]. 遥感信息, 2010(1): 3-6, 31)
- [12] LU Pan, XU Peide. Scheduling of imaging reconnaissance satellites (IRS) based on greedy algorithm [J]. *Comput. Simul.*, 2008, **25**(2): 37-40 (卢盼, 徐培德. 基于贪婪算法成像侦察卫星调度方法研究 [J]. 计算机仿真, 2008, **25**(2): 37-40)
- [13] XU Lei. The research and application of multi-objective optimization problem based on the genetic algorithm [D]. Changsha: Central South University, 2007 (徐磊. 基于遗传算法的多目标优化问题的研究与应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2007)
- [14] YAMAOKA K. The suzaku mission [C]//Science with the New Generation of High Energy Gamma-Ray Experiments. Science with the New Generation of High Energy Gamma-Ray Experiments, 2007
- [15] Suzaku AO-1 target list [EB/OL]. 2006. <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/accept/ao1/>