

# 面向动作序列的敏捷卫星任务规划问题\*

孙凯,白国庆,陈英武,贺仁杰,邢立宁  
(国防科技大学 信息系统与管理学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对新一代敏捷卫星对地观测任务规划问题,考虑了直拍直传、立体成像、多条带拼接等复杂任务需求和观测、数据下传、对日定向等九种卫星动作,在任务规划的同时进行卫星动作规划。设计并实现了前瞻启发式构造算法,算法满足卫星存储、能量等复杂约束,在前瞻过程中每次决定当前任务是否安排。采用基于专家知识的多种启发式规则决定任务安排与安排卫星动作序列。仿真实例及实际工程应用表明,算法可以在很短的时间内给出较好的结果,证明了本文方法对于敏捷卫星任务规划问题的适用性。

**关键词:**敏捷卫星;对地观测;任务规划;动作规划;启发式

**中图分类号:**TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2012)06-0141-07

## Action planning for agile earth-observing satellite mission planning problem

SUN Kai, BAI Guoqing, CHEN Yingwu, HE Renjie, XING Lining

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The mission of Earth observing satellite (EOS) is to acquire photographs of specified areas on Earth surface at the requests of users. The goal is to select a feasible task sequence to maximize the sum of weights. This research presents the mission planning problem of the next-generation agile Earth-observing satellite (AEOS). The complex user requests (including multi-strip area, real time download request, and stereoscopic request) and complex satellite constraints were considered, covering eight satellite actions (including observe action, data download, SSR Erase action, attitude movement, heliocentric pointing, geocentric pointing, and instrument action). A chronological look ahead algorithm was designed to solve the problem, heuristic rules based on expert knowledge were used to make choices and arrange satellite actions, which satisfy all satellite physical constraints and operational constraints. For the current experiment instances and applications, the algorithm can give results in very short time. Experiment results suggest that our algorithm works well for the agile earth-observing satellite planning problem.

**Key words:** agile satellite; earth-observing; mission planning; action planning; heuristic

对地观测卫星的任务在于根据用户要求获取地面区域的图像。我国目前在轨运行的对地观测卫星,如资源系列卫星,以及法国的 SPOT 系列卫星,美国的 EO 系列卫星等,均只有最多一个方向的自由度,即绕翻滚轴(roll axis)做垂直星下线的横向侧摆,而且侧摆只能在遥感器开机成像的间隙进行,一次连续成像过程中侧摆角度必须保持不变。这类卫星被称作非敏捷卫星(non-agile satellite)。随着世界航天技术的不断发展,欧美等航天强国都相继展开了敏捷对地观测卫星(agile Earth-observing satellite)研制项目。美国于1999年发射升空的 IKONOS-2 卫星,2001年发射的 Quick Bird 卫星就已经具有正视、前视、后视、侧视等灵活观测能力<sup>[1]</sup>,2007年发射的 WorldView-1 卫星的敏捷机动能力大为提升<sup>[2]</sup>,俄

罗斯于2005年底发射的英国制造的小卫星 Topsat<sup>[3]</sup>,法国于2008年发射的 PLEIADES 星座<sup>[4]</sup>等,都属于敏捷卫星。由此可见新一代 EOS 将以敏捷卫星为主要发展方向。敏捷卫星具有不止一个方向的自由度,其视角通常可以绕翻滚、俯仰、偏航(yaw)三个轴变化,而且视角变化可以与成像过程并行,从而使卫星有可能在能力允许的范围沿任意走向进行观测。非敏捷卫星与敏捷卫星观测任务时的区别如图1所示。

相比非敏捷卫星,敏捷卫星对地观测的主要优势如下:

(1) 观测时间点和观测次序不固定,可以在观测窗口内任意选择观测时间和观测次序以避免任务冲突,拍摄更多的观测任务,大大增强了其完成任务的能力;

\* 收稿日期:2012-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70601035,70801062)

作者简介:孙凯(1983—),男,江苏徐州人,博士研究生,E-mail:s\_unkai@163.com;

陈英武(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:ywchen@nudt.edu.cn

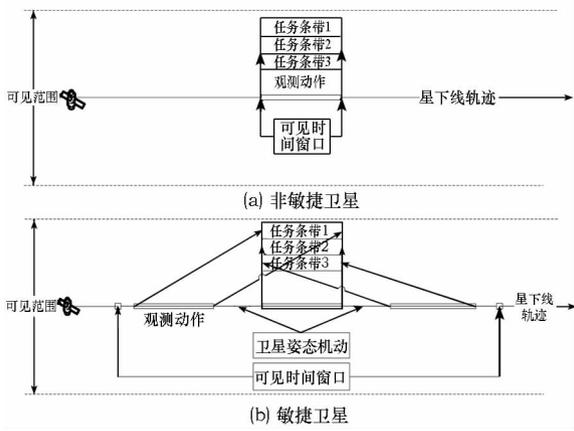


图 1 非敏捷卫星和敏捷卫星的观测区别

Fig. 1 Non-agile satellite and agile satellite for observing

(2) 利用其俯仰能力在一次过顶时对目标进行多个角度的观测,方便合成目标的立体图像;

(3) 在一次过顶时拍摄完成一个区域目标的所有观测条带,完成任务的时效性有了大幅提高,同时也方便了后期的图像管理及图像处理。

可以看出,敏捷卫星提供了更强大的观测能力和更多的观测自由,但同时也极大地扩展了卫星的任务规划的解空间,使得规划更加困难。NASA 的 Globus<sup>[6]</sup> 等认为对地观测卫星任务规划问题的主要特点是需要考虑多种复杂约束且搜索空间巨大。其优化目标是观测尽可能多的高优先级任务。Wolfe<sup>[5]</sup> 等总结了对地观测卫星任务规划问题,给出了三种方法来解决 EOS 规划调度问题,基于优先级的方法,前瞻算法,遗传算法。欧空局的 Lemaitre<sup>[7]</sup> 等全面地描述了敏捷卫星任务规划问题,分析了问题的难点,最后把问题简化为单星单轨道圈次的任务选择与调度问题。Djamal Habet<sup>[9-10]</sup> 等采用禁忌搜索算法来解决 AEOS 任务规划问题,邻域搜索时的一致性通过一种有效的约束传播策略来保证。此外,作者给出了一种动态规划的方法来获得松弛问题的上界。Bistra Dilkina<sup>[8]</sup> 提出了一种基于排列的搜索和约束传播相结合的方法来解决 AEOS 任务规划问题。对于大邻域的排列搜索行为被用来解决这种资源有限情况下的规划问题。研究表明,基于排列的搜索和约束传播相结合的方法对于求解 AEOS 任务规划问题具有非常好的效果。欧空局的 Romain Bourdel<sup>[11-12]</sup> 等研究了动作规划和目标规划结合的敏捷卫星对地观测任务规划问题,他们考虑了在同一轨道面且相位差为  $180^\circ$  的两颗卫星,给出了一种按照时间顺序的贪婪算法。其规划算法考虑了六种卫星动作,和存储、能量等复杂约束条件。

我们注意到,文献[5-6]考虑的是传统的非敏捷卫星的任务规划问题,文献[7-10]对问题做了简化,没有考虑星上存储及数据回传的复杂约束,也没有考虑卫星动作规划的问题,而文献[11-12]所做研究工作和本文有相似之处,但是他们没有考虑立体成像、直拍直传等复杂任务需求,在卫星具体的使用约束(如星上存储)及动作序列的考虑上也有所不同。

在本文中,我们考虑了多条带区域、直拍直传任务、立体成像任务等复杂任务需求,在算法规划过程就考虑卫星的存储、能量、姿态转换等约束,同时考虑卫星观测、回传、固存擦除、姿态机动、对日定向、对地定向、直拍直传、相机开/关机等卫星动作,设计了基于时序的前瞻启发式算法(Lookahead Algorithm, LA),采用基于专家知识的启发式规则安排任务及卫星动作,生成任务观测计划和数据回传计划的同时,生成卫星的动作序列。仿真结果证实了算法的有效性。本文研究的方法可以在很短的时间内给出较好的规划结果,同时生成可执行的卫星动作序列,在工程应用上有一定的价值。根据本文方法研制的仿真系统已经在我国某卫星研制部门得到了应用,并取得了较好的效果。

## 1 问题描述

敏捷卫星任务规划与动作规划输入是根据用户提出的观测需求得到的观测任务及其观测条带集合、地面站回传时间窗口集合,问题关键在于如何从候选任务中选择任务及回传时间窗口,最大化观测收益,同时满足卫星的所有约束条件,生成卫星可执行的动作序列。

为了清晰地描述问题,首先明确下列概念:

- 需求:用户要求的观测区域,包含了用户的分辨率要求、图像要求、观测时间要求等;
- 任务:包括观测任务(目标)和回传任务(回传时间窗口),在不引起歧义的情况下,我们统称为任务;
- 目标:用户要求观测的且有可见时间窗口的区域;
- 条带:由观测目标划分出来的长方形区域,卫星一次拍摄就可以观测完毕。

### 1.1 用户需求

卫星成像的目标一般有两种,点目标和区域目标。点目标可以看成是单个条带的区域目标。我们采用文献[13]中的区域目标划分方法对区域目标进行划分。观测目标通常具有可见

时间窗口、有效观测时间、观测持续时间、观测收益等属性。有效观测时间一般为几个小时或者几天,超出了观测时间的图像对用户来说没有意义。基于敏捷卫星的观测能力,用户可以提出更加复杂的使用需求,比如多条带拼接,立体成像,直拍直传等需求。敏捷卫星成像时间窗口很长,在不同观测时间点观测带来的卫星成像质量有很大区别。

## 1.2 卫星约束

敏捷卫星任务规划问题需要考虑其复杂的操作约束及物理约束,在本文中考虑的约束条件主要有以下几个方面:

- 时间窗口约束:敏捷卫星观测目标具有较长的时间窗口,观测目标必须在其观测时间窗口之内观测。

- 回传时间窗口约束:卫星和地面站的回传时间窗口长度是固定的,卫星和地面站的数据传输天线在开始数据传输之前一般需要几分钟的准备时间。

- 存储约束:卫星上的存储容量有限,已经回传的数据如果没有被擦除,仍将占用存储容量,但是过于频繁地擦除存储,将会对存储器的寿命产生影响。

- 姿态转换时间约束:卫星姿态的转换时间取决于上次观测结束时卫星的姿态和本次观测开始时的卫星姿态。

- 星上载荷约束:一些星上载荷,如数据传输天线、相机,需要预热才能够使用,同时还有最长开机时间及最大开关机次数等限制。

- 能量约束:卫星依靠太阳能帆板的对日来进行星上的能量补充。为了保证卫星的运行安全,星上能量的使用不能超出一定比例。

需要说明的是,不同约束之间是相互制约的,比如直拍直传任务需要观测时间和回传时间窗口重合,卫星做姿态转换和观测时都需要考虑能量是否充足等,这些制约关系都会在后续动作序列及算法设计中充分考虑。

## 1.3 卫星动作

为了生成卫星的动作序列,我们考虑了9种卫星动作,下面就每个动作给出说明:

- (1) 观测动作:卫星观测目标条带的动作,以观测的开始和结束时间,观测条带以及卫星姿态进行描述;

- (2) 数据回传动作:卫星向地面站回传图像数据的动作,以数据回传的开始和结束时间,回传

图像列表,回传地面站,卫星姿态以及回传时天线角度进行描述;

- (3) 直拍直传动作:卫星对目标和地面站同时可见,观测任务的同时将数据回传到地面站,以观测的开始和结束时间,观测条带,卫星姿态,回传地面站,回传天线角度进行描述;

- (4) 固存擦除动作:擦除固存中已经回传的图像数据,以擦除开始和结束时间,擦除图像列表进行描述;

- (5) 姿态机动动作:卫星从一种姿态转换到另外一种姿态的动作,以姿态机动的开始和结束时间,开始和结束的卫星姿态角进行描述;

- (6) 对日定向动作:当卫星处在阳照区,卫星的太阳能帆板保持正对太阳以达到最大的充电速度,以开始和结束时间描述;

- (7) 对地定向动作:当卫星处在地影区,三轴稳定对地定向,以开始和结束时间描述;

- (8) 相机开关机动作:卫星观测任务之前需要先开相机预热,完成观测任务之后需要将相机关闭,以时间点进行描述;

- (9) 天线开关机动作:卫星回传图像数据之前需要打开天线进行预热,完成任务之后需要将天线关闭,以时间点进行描述。

一般而言,这些动作必须依次执行,不能并行执行,两种情况例外:

- 在做姿态机动动作、对日定向动作、对地定向动作的同时可以进行固存擦除动作;

- 数据回传动作可以和对地定向动作并行执行。

## 1.4 问题模型及数学描述

### 1.4.1 问题简化及假设

在考虑了众多约束及卫星动作之后,敏捷卫星任务规划变得非常复杂,为了简化问题,做了以下假设,需要指出的是,我们所做的假设并不影响问题的本质。

- (1) 立体成像任务只能是单一条带任务;

- (2) 直拍直传任务的优先级比其他任务高;

- (3) 多条带任务在其一次观测机会中多个条带必须一次观测完毕,否则就不安排观测;

- (4) 在卫星的可见时间窗口内成像都是满足用户对成像质量要求的,不符合成像质量要求的观测窗口已经从输入集合中删除;

- (5) 不符合观测时效性要求的观测窗口已经从输入集合中删除;

- (6) 如果选择观测某任务的某个条带,那么这个任务的本次观测机会下的所有条带都必须连

续完成,中间不能插入其他任务的条带;

(7)不考虑姿态机动的过程中的成像动作,即所有观测条带都是平行于星下线成像;

(8)同一个任务的所有观测条带都必须在一个回传窗口内回传,方便图像的使用及处理。

#### 1.4.2 数学描述

$[sceStart, sceEnd]$ :场景开始时间和场景结束时间;

$R$ :观测目标集合; $S$ :观测条带集合; $r_i$ 代表观测目标  $r$  的第  $i$  个条带,  $r_i \in S$ 。每个条带  $r_i$  关联了一个时间窗口  $[a_i, b_i]$ , 一个观测持续时间  $d_i$ , 一个观测收益  $w_i$ , 卫星观测  $r_i$  的侧视角  $roll_i$ , 卫星观测  $r_i$  的俯仰角  $pitch_i, u_i \in (0, 1)$ ,  $u_i = 1$  代表条带  $r_i$  可以直拍直传,  $[ds_i, de_i]$  表示条带  $r_i$  的回传时间窗口;  $r_i$  可以用以下七元组表示  $\{[a_i, b_i], d_i, w_i, roll_i, pitch_i, u_i, [ds_i, de_i]\}$ ;  $TS_{ij}, i, j \in S$  表示卫星观测条带  $i$  和条带  $j$  之间的姿态转换时间;  $f_{ij} \in (0, 1)$ ,  $f_{ij} = 1$  表示观测条带  $i$  和条带  $j$  连续观测;  $O$  代表目标  $r$  的所有观测机会集合,  $P_i, i \in O$ , 表示观测目标  $r$  在第  $i$  个观测机会下的所有条带集合;  $M$  表示卫星的存储的最大容量;  $E$  表示可以消耗的卫星能量阈值;  $M_t, t \in [sceStart, sceEnd]$  表示时间  $t$  时刻卫星上的存储容量使用数值;  $E_t$  表示时间  $t$  时刻卫星上的电量数值;  $t_i$  表示观测条带  $i$  的开始时间。

需要说明的是观测目标  $r$  的所有条带观测收益相同; 当  $r_i$  为立体成像任务条带时,  $pitch_i$  为固定值, 并且此时  $a_i = b_i$ , 即立体成像任务的观测开始时间是固定的。

决策变量

$x_i = 1, i \in S$ , 表示条带  $i$  被选择观测, 0, 表示条带  $i$  没有被选择观测。

目标函数

$$f = \sum_{i \in R} w_i x_i$$

约束条件

$$\forall i \in S: (x_i = 1) \Rightarrow (a_i \leq t_i \leq b_i) \quad (1)$$

$$\forall i, j \in S: (f_{ij} = 1) \Rightarrow t_i + d_i + TS_{ij} \leq t_j \quad (2)$$

$$\forall i, j \in P: x_i = x_j \quad (3)$$

$$\forall u, v \in O, u \neq v, i \in P_u, j \in P_v: x_i + x_j \leq 1 \quad (4)$$

$$\forall i \in S: (u_i = 1) \Rightarrow (ds_i < t_i < t_i + d_i < = de_i) \quad (5)$$

$$\forall t \in [sceStart, sceEnd]: M_t \leq M \quad (6)$$

$$\forall t \in [sceStart, sceEnd]: E_t \geq E \quad (7)$$

约束 1 代表时间窗口约束; 约束 2 代表卫星姿态机动时间约束; 约束 3 表示一个目标的所有

条带在其一次观测机会中必须全部观测或者全部不观测; 约束 4 代表目标  $r$  只能被观测一次; 约束 5 代表直拍直传任务约束; 约束 6 代表存储约束; 约束 7 代表能量约束。

## 2 求解方法

敏捷卫星的观测任务具有不固定的时间窗口, 任务规划问题本身就是一个高度复杂的组合优化问题, 而在考虑了复杂任务需求(立体成像、直拍直传、条带拼接)、复杂约束条件(存储及数据回传、与任务时间相关的卫星姿态转换时间、能量的补充与释放), 特别是在任务规划的同时还要考虑动作规划的问题(比如, 如果之前不安排对日定向动作, 那么后续的观测及回传活动就可能会由于电量不足无法观测或者回传。如果之前不安排擦除动作, 那么后续的观测活动可能会由于存储容量不足而无法观测), 使得问题变得异常复杂。考虑到生成方案的时效性, 以及卫星动作的连续性, 避免在方案中插入任务产生复杂的约束传播过程, 我们采用了基于时序的前瞻启发式算法(Look Ahead algorithm, LA), 按照场景的开始时间到结束时间的顺序推演来安排任务, 算法中采用基于专家知识的启发式规则来决定当前任务的选择及卫星动作序列的安排。

### 2.1 算法主要流程

首先将候选观测目标的时间窗口和回传时间窗口按照其最早开始时间排序, 形成候选任务队列, 然后依次从候选任务队列中选择观测目标或者回传时间窗口作为当前任务进行安排。在考虑安排当前观测目标时, 每次前瞻若干数量的目标, 在前瞻步长之内决定当前目标是否安排, 确定当前观测目标安排之后再安排卫星的相关动作序列; 当前任务为回传时间窗口时, 无须前瞻。在不同的步骤中采用不同的基于专家知识的启发式规则, 任务规划和卫星动作规划同时进行, 最终生成卫星任务规划方案和实际可执行的卫星动作序列。算法的主要流程如图 2 所示。算法的关键在于如何决定当前任务是否加入观测方案, 以及卫星动作序列的生成方式。

### 2.2 基于专家知识的启发式规则

在算法中主要采用下面六种基于专家知识的启发式规则安排任务和卫星动作。

(1) 前瞻步长

前瞻步长就是在候选任务队列中前瞻任务的

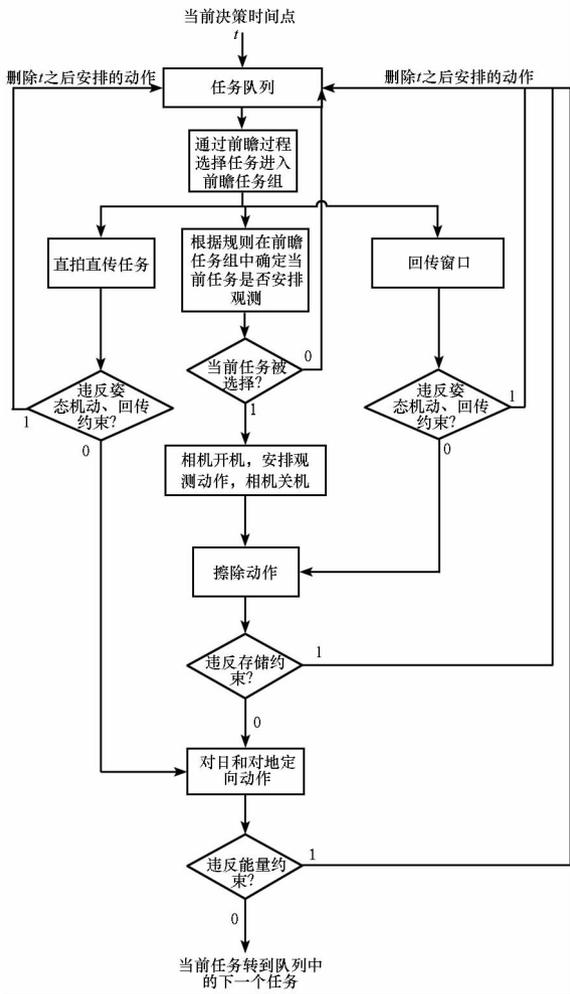


图2 前瞻启发式算法主要流程

Fig. 2 The process of look ahead algorithm

数量。最大前瞻步长设定为一个大于0的整数,但是前瞻步长并不是固定不变的。当前瞻任务队列中遇到直拍直传目标、回传时间窗口时则停止前瞻。

(2) 观测优先原则

一般而言,对地观测卫星回传时间窗口有10min左右,而敏捷卫星的观测时间窗口只有3min左右。观测优先规则是说当观测任务与回传窗口冲突时,优先安排观测任务。

(3) 存储的使用及擦除规则

每安排观测一个任务时,记录该任务所需占用的存储容量及此时固存已经使用的存储容量。由于直拍直传任务不占用存储,因此直拍直传任务不用记录在任务范围之内。当存储器容量达到设定的上限(比如80%)时,安排一次擦除动作,将存储器中所有已回传的任务擦除。

(4) 回传任务安排规则

记录存储器中的任务队列,并按照优先级和任务要求的最晚回传时间排序,当遇到回传窗口

时,依次回传任务并计算每个任务的回传时间,直到该回传时间窗口时间被用尽或没有任务需要回传。

(5) 能量消耗与补充规则

在卫星能量的消耗方面,本文主要考虑其观测任务、回传数据、姿态控制等动作的消耗的电量。为了快速补充能量,当卫星在阳照区且空闲时间超过一定时限,安排卫星做对日定向动作。

(6) 前瞻任务组中确定当前任务的规则

一般情况下,当前任务根据以下两个条件确定是否安排观测:

(a) 当前任务与已安排的任务或者卫星动作不冲突,当前任务的所有条带都可以被安排观测。

(b) 当前任务和前瞻任务组之内任务两两比较,如果发生冲突则按照先优先级、后剩余观测机会的顺序决定当前任务的取舍。如果优先级和剩余观测机会都相同,则安排当前任务,因为当前任务时间窗口在前,对后续任务造成影响的可能性比较小。

但是,当任务连续冲突优先级依次上升的时候,就会发生“割草现象”,即只有连续冲突任务的最后一个被安排,前面的任务全部被舍弃,如图3所示。采用的修正手段就是当前瞻任务数量大于等于3时,由二元检测变为三元检测。如图3所示,任务1和2冲突且任务1的优先级小于等于任务2,任务2和任务3冲突且任务2的优先级小于等于任务3优先级,同时任务1和任务3不冲突,那么本来应该被舍弃的任务1“复活”。修正之后的效果如图4所示:当任务1、2、3连续冲突时且1、3不冲突时,安排任务1和3;当任务1、2、3、4、5连续冲突且间隔不冲突时,安排任务1、3、5。

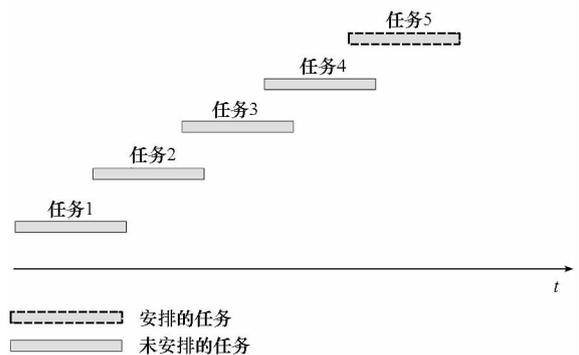


图3 连续冲突任务的选择—修正前

Fig. 3 Select conflict tasks-without improve

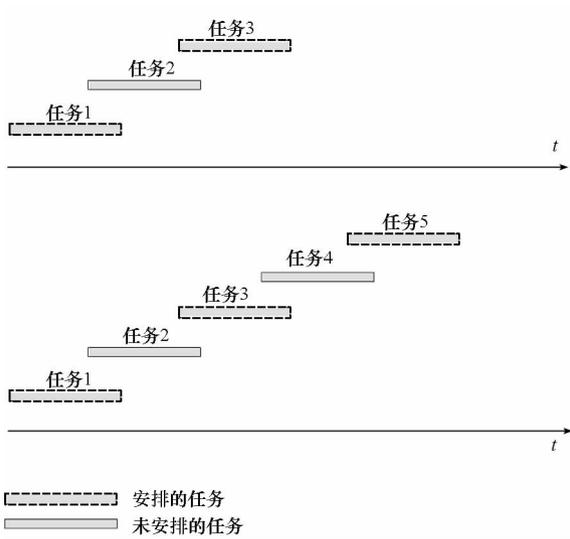


图 4 任务连续冲突时的选择—修正后  
Fig. 4 Select conflict tasks-with improve

### 3 仿真验证及实例分析

目前,由于敏捷卫星任务规划问题约束众多,各个国家卫星的使用约束与物理约束不尽相同,在卫星任务规划领域尚没有公认的 benchmark 测试问题集,很难与现有的解决方法进行比较,为了验证本文规划模式、规划方法的适用性和可行性,我们借助 STK (Satellite Tool Kit) 生成了任务场景,采用 Net 2005 平台和 C# 语言编程实现 LA 算法和敏捷卫星任务规划系统。实验电脑配置为 P4 CPU 3.0 GHz, 2G 内存。表 1 给出了 6 个实例的实验参数信息。其中 R 代表任务数量, S 代表任务条带数量, M 代表立体成像任务数量, N 代表直拍直传任务数量。完成任务的收益值设为 1 ~ 10, 10 为最高收益, 随机分配给任务。每个例子设置了 5 个中国境内的回传地面站。实例 1 的任务分布在卫星的前四个轨道圈次, 实例 2 和 3 的任务集中分布在卫星的前两个轨道圈次, 后面的三个实例的任务随机分布在卫星的各个轨道圈次。

表 1 实例参数

Tab. 1 Parameters of instances

Instances	R	S	M	N
1	47	122	3	3
2	46	122	1	6
3	42	112	4	8
4	46	101	5	0
5	200	480	14	1
6	300	734	14	6

为了更有效地进行对比,我们将规划周期分

别设为 24h 和 48h。规划周期为 24h 的规划结果如表 2 所示,规划周期为 48h 的规划结果如表 3 所示。其中 Profit 代表完成任务的收益值之和, Time 代表完成任务的时间, P 代表完成观测的任务总数, UD 代表观测但是没有回传的任务总数, UP 代表没有观测的任务总数, Actions 代表总的动作数目。在 24h 的规划结果中,实例 2 和 3 分别有 17 和 15 个任务没有完成观测,是因为任务太密集,卫星的机动能力还不足以完成所有任务。实例 5 和 6 中有许多任务没有回传是因为地面站设在中国境内,后面几轨观测的任务没有回传窗口进行回传。

表 2 规划周期为 24h 的规划结果

Tab. 2 Planning result of 24 hours

Instances	Profit	Time(s)	P	UD	UP	Actions
1	261	24	46	0	1	384
2	169	19	29	0	17	249
3	179	19	27	0	15	249
4	297	18	46	5	0	372
5	1009	81	180	58	20	1263
6	1396	126	239	64	61	1633

表 3 规划周期为 48h 的规划结果

Tab. 3 Planning result of 48 hours

Instances	S	Profit	Time(s)	P	UD	UP	Actions
1	158	261	28	46	0	1	444
2	185	230	25	44	0	2	406
3	175	235	24	36	0	6	370
4	144	297	23	46	0	0	434
5	644	1018	86	181	0	19	1339
6	986	1467	133	255	7	45	1809

从结果中可以看出,首先,我们设计的前瞻算法可以很好地处理复杂的任务需求(多条带区域、直拍直传任务和立体成像任务);其次,我们的算法可以处理卫星的所有约束条件并且生成卫星动作序列;算法的时间效率很高,所有的实例都可以在几分钟之内给出结果;此外,我们设计的算法和系统可以实现不同时长规划周期的规划。

### 4 总结及展望

本文针对新一代敏捷卫星对地观测任务规划问题,考虑将卫星任务调度和动作规划相结合的规划模式。针对多条带区域、直拍直传、立体成像等复杂任务需求,我们考虑了卫星观测、数据回传、姿态机动、星上存储、星上能量、载荷约束等复杂约束,定义了九种卫星动作来生成卫星实际可执行的动作序列,在提取专家知识的基础上,设计

了一种前瞻启发式算法(LA)。本算法的规划结果可能不是最优的,但是算法的效率很高,可以在很短的时间内给出结果。根据本文规划模式及方法设计的规划系统,在某卫星研制部门的工程应用中取得了较好的效果。下一步的研究工作在于多颗敏捷卫星联合任务规划问题。

## 参考文献 (References)

- [1] 杨秉新. 美国 Ikonos 和 QuickBird2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23 (4): 14 - 16.  
YANG Bingxin. Characteristics and main specification of Ikonos and QuickBird2 satellite camera-some points for developing such like satellite camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2002, 23 (4): 14 - 16. (in Chinese)
- [2] 赵利平, 刘凤德, 王薇, 等. WorldView\_1 影像 RFM 多项式平差模型及其精度分析[J]. 遥感信息, 2010, 3 (17): 82 - 87.  
ZHAO Liping, LIU Fengde, WANG Wei, et al. Accuracy analysis of polynomial RFM adjustment models for WorldView-1 imagery [J]. Remote Sensing Information, 2010, 3(17): 82 - 87. (in Chinese)
- [3] Cawley S. TopSat; low cost high-resolution imagery from space [J]. Acta astronautica, 2005, 56.
- [4] Bianchessi N. Planning and scheduling problems for earth observing satellites; models and algorithms [D]. Milano: Universita degli Studi di Milano, 2006.
- [5] Sorensen S E, Wolfe W J. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain [J]. Management Science, 2000.
- [6] Globus A, Crawford J, Lohn J, et al. A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites [C]// AAAI, San Jose, 2004, 836 - 843.
- [7] Lemaitre M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites [J]. Aerospace Science and Technology, 2002, 6: 367 - 381.
- [8] Dilkina B, Havens B. Agile satellite scheduling via permutation search with constraint propagation [R]. Actenum Corporation, Vancouver, British Columbia. 2005.
- [9] Habet D, Vasquez M, Vimont Y. Bounding the optimum for the problem of scheduling the photographs of an agile earth observing satellite [J]. Comput Optim Appl, 2010, 47: 307 - 333.
- [10] Habet D. Tabu search to solve real-life combinatorial optimization problems; a case of study [J]. Foundations of Comput Intel, 2009, 3: 129 - 151.
- [11] Grasset-Bourdel R. Interaction between action and motion planning for an agile Earth-observing satellite [R]. ONERA, 2009.
- [12] Grasset-Bourdel R, Verfaillie G. Planning and replanning for a constellation of agile Earth observation satellites [C]// Proceedings of 21th International Conference on Automated Planning and Scheduling, Freiburg, Germany, 2011.
- [13] 白保存. 考虑任务合成的成像卫星调度模型与优化算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.  
BAI Baocun. Modeling and optimization algorithms for imaging satellites scheduling problem with task merging [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2008. (in Chinese)