

文章编号: 1001- 2486(2010) 05- 0166- 07

基于 CHARTER 机制的减灾卫星调度问题研究*

刘晓路, 陈盈果, 李菊芳, 陈英武

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对 CHARTER 机制下的减灾卫星(主要为成像卫星)调度问题进行了研究,介绍了 CHARTER 机制的工作流程,指出 CHARTER 机制下的减灾卫星调度实质上是一个针对区域目标的重调度问题。在此基础上提出一种改进的区域目标划分算法,并提出基于启发式规则的动态卫星重调度算法,最后通过应用实例证明了所提算法的正确性和有效性。

关键词: 空间和重大灾害国际宪章; 区域划分; 启发式规则; 动态重调度

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

The Problem of Disaster Monitoring Satellite Scheduling Based on CHARTER Mechanism

LIU Xiao-lu, CHEN Ying-guo, LI Ju-fang, CHEN Ying-wu

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

Abstract: The problem of disaster monitoring satellite (imaging satellite) scheduling based on CHARTER mechanism is researched. At the very beginning the mechanism on which CHARTER is working was introduced. The problem was taken as a rescheduling problem against area targets according to the mechanism. To observe effectively, a dynamic partitioning algorithm for area target was proposed, and a dynamic rescheduling algorithm was raised to support satellite re-scheduling. Finally an example was constructed to testify the correctness and validity of the algorithm proposed.

Key words: the international charter "space and major disasters"; partition of area target; heuristic rules; dynamic rescheduling

2007 年 5 月 25 日中国国家航天局局长签署“空间和重大灾害国际宪章”(CHARTER), 这标志着中国国家航天局成为这一国际减灾合作机制的正式成员。该机制认为,在当今条件下,需要加强空间机构和卫星单位之间的国际合作,以便有效利用空间技术对所发生的重大灾害进行监测和管理,其工作机制如下^[1]: (1) 用户向 ESA 空间研究所业务值班室提出进行灾害观测的请求; (2) 值班室的值班员在接到用户请求后,立即与用户联系进行确认,并在 1 小时内将此信息通知紧急灾害应急办公室; (3) 紧急灾害应急办公室值班工程师收到此信息后,立即对用户的请求进行分析和评估,并在 3 小时内确定最适合的卫星并制订行动计划; (4) 行动计划即时被送到卫星计划调度部门,他们利用各自的卫星展开工作,获取相关区域的图像。

CHARTER 机制自成立以来已经启动了上百次,为受灾国提供了大量的遥感数据和图像,很大程度上减少了灾害所带来的损失,但是随着机制成员和授权用户的增加,在运行中出现了一些新问题:一方面,灾害的波及范围比较广,单靠一颗卫星短时间内难以实现对受灾区域的全面覆盖;另一方面,当同时接到多个观测请求时会产生卫星任务的冲突。因此,需要一种比较好的卫星调用策略来解决上述问题。本文提出了区域目标的动态分解算法,以支持多星联合观测,提高任务完成效率,设计了基于启发式规则的动态调度算法,以动态消解应急观测请求与卫星资源(主要为成像卫星)之间的冲突。

* 收稿日期: 2010- 01- 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70801062; 70601035)

作者简介: 刘晓路(1985-), 女, 博士生。

1 问题描述

调度可以看作将有限的资源按时间分配给不同任务的过程^[2], 该过程既包含时间分配, 又包含资源分配。调度问题的优化目标是在满足时间和资源约束的条件下, 为每个任务分配资源并确定执行时间, 以使得问题的目标函数值最小(最大)。成像卫星调度问题是一类具有时间窗口约束的调度问题^[5], 即观测任务必须在特定的时间窗口内执行。

基于 CHARTER 机制的减灾卫星调度与传统的成像卫星调度有很大差别, 主要体现在两个方面: 首先, CHARTER 机制是一个契约性的组织, 在进行卫星调度时必须考虑卫星所属国的利益, 尽可能小地扰动原卫星调度方案; 其次, 由于技术条件的限制, 大部分自然灾害不能被预测, 其发生在时间上有突发性和不确定性, 空间上具有广泛性。为实现对原卫星调度方案的扰动最小化, 需要在原卫星调度方案基础上进行重调度; 针对 CHARTER 任务地域上的广泛性, 将任务目标抽象为区域目标。因此, 本文认为基于 CHARTER 机制的减灾卫星调度实质上是一种针对区域目标的卫星重调度问题。

设卫星集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_S}\}$, 则对卫星 s_i 而言, 其已调度方案为 $plan_i$, 包括: $t_{(a)}$ 任务编号: 唯一标识任务的字段, $P_{(a)}$ 任务优先级: 观测任务的重要程度, $TW_{(a)}$ 任务时间窗口: 卫星传感器和地面目标之间满足任务要求的可见时间区段, 具体定义为: $S_{(a)}$ 开始时间: 观测机会的开始时间, $E_{(a)}$ 结束时间: 观测机会的结束时间, $A_{(a)}$ 观测角度: 相机成像的观测角度, $D_{(a)}$ 成像数据量: 观测所生成的数据量。CHARTER 机制下减灾卫星调度问题的目标函数可以表述为

$$F = \max \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_T} P_j f(i, j) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \min \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_T} P_j d(i, j) \quad (2)$$

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{arrange Task}_j \text{ to Sat}_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$d(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{delete Task}_j \text{ from Sat}_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

其中, 式(1)表示被安排观测的目标优先级之和最大, 即进行对地观测的收益最大; 式(2)表示, 因为新任务插入而删除的原规划方案的任务优先级之和最小, 即最小化扰动原规划方案; 式(3)是一个判断函数, 如果新任务 j 被安排给卫星 i , 则值为 1, 否则为 0; 与式(3)类似, 只是如果式(4)值为 1 表示任务 j 被从卫星 i 的任务列表中删除。另外, 本文定义了一种区域目标的顶点描述方式, 以保证用户所提交申请的规范性: 对区域目标 $Area_i$, 定义二元组数组 $[< lat_i, lon_i >]_n$ 来对其进行描述, 其中, n 表示区域目标顶点的个数, $< lat_i, lon_i >$ 为第 i 个顶点的地理坐标, lat_i 为顶点的纬度, lon_i 为顶点的经度。

2 区域目标动态分解算法

在前面分析中已经指出, CHARTER 机制下的减灾卫星调度是一类针对区域目标的重调度问题, 而区域目标由于其覆盖面积很广, 单颗卫星的一次成像很难将整个区域覆盖, 因而必须对其进行划分, 区域目标划分的目的是将面积区域分割为可由单颗卫星一次性完成的子任务。

2.1 传统区域目标分解算法

目前, 对区域目标主要有以下四种分解方法: 一是将区域分解转化为集合覆盖问题, 依据单景分解, 经过分解后, 区域目标调度被转化为针对这些独立场景的点目标调度; 二是采用预定义的参考系统分解, 将全球划分为多个带有编号的场景。对区域进行分解时, 只需要检索与区域目标相关的场景, 并进行规划即可; 三是依据卫星的飞行径向和遥感器幅宽, 将区域分解为固定宽度的平行条带^[8]; 四是按照每颗卫星的遥感器幅宽以及飞行径向, 在多个时间窗口内对区域目标进行重复分解。

前三种方法的共同点是: 必须提前确定分解的参数(单景大小、条带宽度及划分方向), 并采用固定

参数进行分解。当使用多颗卫星观测区域目标时,由于不同卫星在轨道倾角及星载传感器幅宽等参数上均存在差异,若采用这些分解方法,将不能体现不同卫星的性能差异,不能充分发挥卫星的观测能力。第四种分解方法是基于大地坐标系进行,且采用了高斯投影将区域目标投影到平面坐标系,对于区域目标的经度差异存在限制,对区域目标采用固定宽度进行分解,存在一定误差。为克服以上缺点,本文提出改进的区域目标动态分解方法:采用立体几何计算卫星在某侧视角角度下对目标的覆盖范围;按照每颗卫星的传感器幅宽以及飞行径向,在多个时间窗口内对区域进行重复分解。此方法依据各卫星传感器性能参数分解区域,考虑卫星传感器性能的差异,能够充分发挥不同卫星的观测能力。

2.2 改进的区域目标动态分解算法

为便于表述,首先对符号进行定义:卫星 s_j 的最大侧视角角度为 Max_j , 最小侧视角角度为 Min_j , 传感器视场角为 Δg_j , 分解时的角度偏移量为 $\Delta \lambda$ 。卫星 s_j 对区域目标任务 t_i 的时间窗口数量为 N_{ij} , 卫星 s_j 在第 k 个时间窗口内对任务 t_i 进行分解,得到的子任务数量为 N_{ijk} , O_{ijk} 表示卫星 s_j 在第 k 个时间窗口内对任务 t_i 进行分解,得到的第 v 个子任务。

假设任务 t_i 分解的元任务集合为 $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{iN_S}\}$, 则 t_i 依据卫星 s_j 分解的元任务集合为 $O_{ij} = \{O_{ij1}, O_{ij2}, \dots, O_{ijN_{ij}}\}$, 则 t_i 依据卫星 s_j 的第 k 个时间窗口分解的元任务集合为 $O_{ijk} = \{O_{ijk1}, O_{ijk2}, \dots, O_{ijkN_{ijk}}\}$, 其中 $k \in [1, N_{ij}]$ 。综上,任务 t_i 分解后的子任务集合可表示为 $O_i = \bigcup_{j=1}^{N_S} \bigcup_{k=1}^{N_{ij}} O_{ijk}$, $i \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ 。下面对多颗卫星观测多个区域目标时,区域目标的动态分解方法进行描述,图 1 是对单个区域目标动态分解的简要流程。

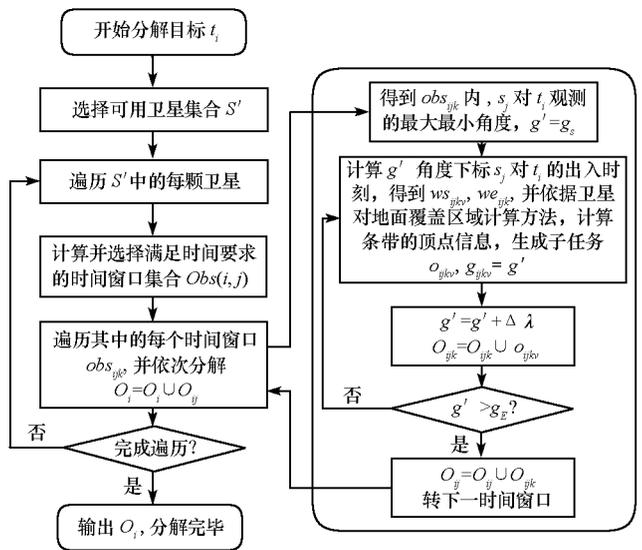


图 1 区域目标动态分解流程
Fig. 1 Flow of area target partition

Step 1 遍历 T 中的每个区域目标,针对区域目标 t_i 的传感器类型要求及最低分辨率要求,选择可用卫星集合 S' 。

Step 2 遍历 S' 中的每个卫星,根据每颗卫星 s_j 对 t_i 进行分解。

Step 3 计算 s_j 与 t_i 的时间窗口集合 $Obs(i, j)$, 并删除其中不满足 t_i 时间要求的时间窗口。

Step 4 遍历 $Obs(i, j)$ 中的每个时间窗口 obs_{ijk} , 根据每个时间窗口进行分解。

Step 4.1 得到时间窗口 obs_{ijk} 内卫星 s_j 指向区域目标 t_i 顶点的最小、最大观测角度 $g_{\min}(i, j)$, $g_{\max}(i, j)$ 。

Step 4.2 得到 obs_{ijk} 内卫星对 t_i 有效观测的最小角度 g_s , 最大角度 g_E , 其中:

$$g_s = \max\{g_{\min}(i, j) + \frac{1}{2} \Delta g_j, Min_j\} \tag{5}$$

$$g_E = \min\{g_{\max}(i, j) - \frac{1}{2} \Delta g_j, Max_j\} \tag{6}$$

Step 4.3 按照不同的观测角度 g' 对区域进行分解。 g' 从最小角度 g_s 开始,以 $\Delta \lambda$ 为角度偏移量进行偏移,至最大角度 g_E 结束。

Step 4.4 在每种观测角度 g' 下,均生成一个子任务 O_{ijk} , O_{ijkv} 的观测角度 g_{ijk} 为 g' , 其开始时间 ws_{ijk} 、结束时间 we_{ijk} 分别为卫星采用 g' 角度观测时,出入区域目标的时刻。根据 ws_{ijk} , we_{ijk} 及对应时刻的星下点坐标,采用卫星对地面覆盖区域的计算公式^[10], 得到卫星在此角度下覆盖的条带的顶点坐标,

从而得到条带的坐标信息。

Step 4.5 将卫星 s_j 与 t_i 在时间窗口 obs_{jk} 内分解的子任务加入集合 O_{jk} 。

Step 5 将卫星 s_j 与 t_i 在各个时间窗口内分解得到的子任务加入集合 O_{ij} 。

Step 6 将所有卫星与 t_i 分解的子任务加入集合 O_i , 依次分解其他任务, 完毕后返回并输出结果。

由于区域目标分解的每个子任务都是卫星的一个可选的观测活动, 为便于统计子任务对区域目标的覆盖关系, 必须记录其坐标信息。子任务的坐标信息采用顺时针顺序的四个顶点的经纬度坐标表示。分解得到的子任务采用六元组表示: $o_{jklv} = \{Atold, TaskId, SatId, Win, Angle, Coordinate\}$, 分别为子任务标识、任务标识、卫星标识、时间窗口、观测角度及子任务的坐标信息。

3 基于启发式规则的动态重调度算法

启发式的思想比较简单, 其关键在于对启发式规则的提取和定义^[11-12]。CHARTER 机制下的减灾卫星调度问题实际上是一个解决任务对资源(卫星, 地面站)争用的冲突消解过程。

3.1 启发式规则的建立

在进行规则设计之前首先明确两个概念: 可见时间窗口和可用时间窗口。可见时间窗口是指卫星传感器与地面目标之间满足任务要求的时间区段, 但是对基于 CHARTER 机制的减灾卫星调度问题而言, 可见窗口不一定可用, 这些窗口可能与卫星的原卫星调度方案冲突。所谓可用时间窗口是指那些不与原卫星调度方案冲突而可以直接插入的可见时间窗口, 冲突的窗口是与原调度方案中的窗口有重叠交叉的那些可见时间窗口, 在进行卫星调度时前者可以直接应用而后者需要先进行冲突消解。

明确可用窗口的概念后, 建立算法的启发式规则: (1) 可用时间窗口优先: 如果卫星对当前任务有多个观测窗口, 优先选择可用时间窗口, 如果卫星对当前任务只有一个时间窗口, 而且是冲突的, 则按照下述规则进行操作。(2) 高优先级任务优先: 如果当前任务可见时间窗口与原调度方案的已调度窗口相冲突, 那么优先选择优先级高的任务。(3) 剩余观测窗口少的任务优先: 如果两个任务的观测窗口相冲突且优先级相同, 则选择剩余观测窗口数目小的任务, 如此可以保证两个任务都能被安排或者以较大的概率被安排。(4) 回传时间早的任务优先: 第一, 实传任务优先。如果某个遥感器与任务存在时间窗口, 同时, 与某个地面站也存在时间窗口, 即该遥感器针对该任务可以采用实传模式, 这种任务优先安排; 第二, 对于不能实传的任务, 判断其回传窗口的时间, 可以较早回传的任务优先安排。这个规则可以尽可能减少卫星存储器的使用压力。(5) 人工干预: CHARTER 是一个契约性的组织, 因此在执行任务的同时也必须考虑卫星所属国的利益。对于已调度的窗口, 可以允许用户通过人工干预的方式进行任务安排, 这种情况下上述的规则将失效, 以人工干预为准。

3.2 动态重调度算法

动态重调度是相对于原始调度方案而言, 体现为三个方面: 新任务窗口的动态插入, 任务的前向约束检查和后向约束冲突回溯, 算法的整体流程如图 2 所示。

(1) 新任务窗口的动态插入

时间窗口插入按照上一节中所定义的启发式规则进行: 首先检查当前的已调度窗口是否有人工干预, 如果有则放弃任务窗口的插入, 执行下一窗

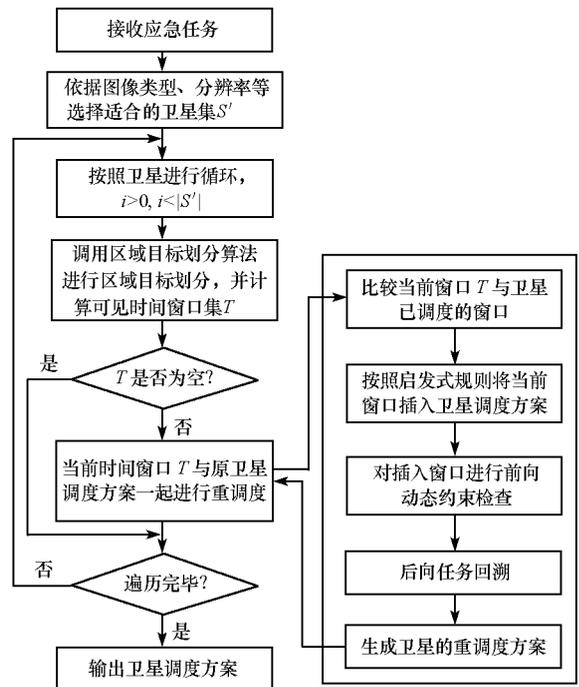


图 2 动态重调度算法的流程

Fig. 2 Flow of dynamic re-scheduling algorithm

口;如果没有人工干预,则检查任务窗口与已调度窗口是否冲突,如果冲突则检查两个任务能否实传,能够实传的任务优先;如果两个任务的下传性质一样,比较两个任务的优先级,按照优先级高的任务优先的原则对窗口进行替换;如果两个任务的优先级相同,对比这两个任务的剩余观测机会,剩余观测机会少的任务优先;如果仍然不能进行任务选择,则以方案扰动最小为原则,放弃当前观测机会,保持原调度方案不变。

(2) 前向约束检查

约束检查是对插入窗口后的卫星调度方案进行合理性检查,保证所生成的方案不违背卫星的实际使用约束。本文所考虑的约束主要是任务间的成像转换时间,电量以及存储容量 C 的限制。转换时间是卫星上一次任务结束至下一次任务开始所必需的调整时间,一般是一个固定值加一个具体的卫星姿态转换时间,固定时间由卫星的设计决定,姿态转换时间由卫星的起止姿态决定,而检查的目的就是比较连续两个观测窗口之间的间隔与转换时间,如果间隔大于转换时间则认为任务可以安排,否则将有一个任务被取消,这将在任务回溯中实现。电量限制主要体现为单圈最大侧摆次数和最长成像时间的限制,卫星的姿态调整以及成像是卫星主要的电量消耗。由于成像所需观测角不同,为了按照既定角度观测卫星,相机必须侧摆成像,因此必须限制侧摆次数以保证卫星电量,出于相同考虑也必须限制卫星在单圈中的最大成像时间。如果所拍摄的任务不能及时下传,将先存储在卫星存储器中,待有下传机会时再传回地面站,但是存储器容量是有限制的,当存储器已经写满而未能及时下传,即认为卫星不能工作,必须通过下传将存储器清空之后才能重新工作。

(3) 后向回溯冲突消解

该过程主要对约束检查中发现的冲突进行消解,与卫星调度的目标一样,重调度的目标也是收益最大化,即安排的任务的优先级之和最大: $\max(\sum_i P_i)$, 其中 P_i 为已调度的第 i 个任务的优先级。另外,由于 CHARTER 的特殊工作机制,必须考虑卫星方的利益,因此,重调度的另一个目标就是使对原调度方案的扰动最小化,这也是采用后向回溯冲突消解的主要原因。

在回溯过程中,根据约束的影响范围可以将冲突分为两种:全局性约束冲突和局部约束冲突。全局约束冲突主要指卫星的单圈侧摆次数和最长工作时间违反约束,而局部约束冲突是指相邻任务间的转换时间不满足要求。

① 全局约束冲突消解:

设当前冲突点的两个任务分别为 i 和 $i+1$,以 $i+1$ 任务为起点自后向前进行回溯,选取优先级最低的任务进行删除,对于侧摆次数违反约束的情况而言,如果两个任务的优先级相同,则选择侧摆角度大的那个任务进行删除。

② 局部约束冲突消解:

局部约束冲突消解主要是针对转换时间不满足的任务,为了解决当前冲突需要在两个任务中选择一个进行删除,具体任务选择的原则与上节的启发式规则相类似。如果通过启发式规则仍不能决定当前操作,则将以卫星方利益为重,删除新插入的任务,以满足调度方案的可行性。

4 实例

上文阐述了在 CHARTER 机制下针对区域目标的减灾卫星调度问题的特征和具体求解办法,针对区域目标提出了动态区域目标划分算法,针对减灾卫星提出了基于启发式规则的动态调度算法。接下来通过一个具体算例对算法进行证明。以汶川地震为例,分析算法的可行性和算法性能。

根据用户请求,建立观测区域的目标模型,用目标顶点的坐标对(纬度,经度)来表示(逆时针方向): (31.74, 104.95), (30.64, 103.62), (29.85, 104.57), (29.28, 105.70), (29.39, 107.49), (30.83, 107.15), (31.75, 104.97)。

当前可用卫星有两颗, Sat_1、Sat_2,地震发生时分别在执行对地观测任务,现接到请求:5月12日12时至5月13日12时内对震区进行应急观测,目标的优先级为10。

经区域目标分解, 在规定时段内卫星对目标的可见时间窗口如表 1 所示, 其中黑体标出的窗口是可用窗口, 可以直接插入。接到用户请求时, 卫星 Sat₁、Sat₂ 正在执行的调度方案如表 2、表 3 所示, 表中斜体标示的窗口与新窗口相冲突, 其中 Pr 为任务优先级, 值越大, 则任务优先级越高。

经过重调度之后得到新的卫星调度方案, 分别如表 4、表 5 所示。

表 1 卫星对区域目标的观测时间窗口

Tab. 1 All satellite time windows for target

卫星	窗口开始时间	窗口结束时间
Sat₁	2008- 5- 13 07: 20: 04	2008- 5- 13 07: 23: 36
Sat ₁	2008- 5- 13 10: 58: 30	2008- 5- 13 11: 03: 01
Sat₂	2008- 5- 12 19: 36: 43	2008- 5- 12 19: 39: 22
Sat ₂	2008- 5- 13 02: 19: 36	2008- 5- 13 02: 21: 54

表 2 Sat₁ 调度方案表

Tab. 2 Scheduling plan for Sat₁

任务开始时间	任务结束时间	Pr
2008- 5- 12 16: 02: 06	2008- 5- 12 16: 02: 13	10
2008- 5- 12 20: 44: 37	2008- 5- 12 20: 44: 44	6
2008- 5- 12 23: 56: 19	2008- 5- 12 23: 56: 26	7
2008- 5- 13 1: 26: 07	2008- 5- 13 1: 26: 14	7
2008- 5- 13 3: 46: 47	2008- 5- 13 3: 46: 54	7
2008- 5- 13 4: 48: 30	2008- 5- 13 4: 48: 37	9
2008- 5- 13 9: 32: 57	2008- 5- 13 9: 33: 04	6
2008- 5- 13 10: 59: 47	2008- 5- 13 10: 59: 54	8

表 4 Sat₁ 重调度方案表

Tab. 4 Rescheduling plan for Sat₁

任务开始时间	任务结束时间	Pr
2008- 5- 12 16: 02: 06	2008- 5- 12 16: 02: 13	10
2008- 5- 12 20: 44: 37	2008- 5- 12 20: 44: 44	6
2008- 5- 12 23: 56: 19	2008- 5- 12 23: 56: 26	7
2008- 5- 13 1: 26: 07	2008- 5- 13 1: 26: 14	7
2008- 5- 13 3: 46: 47	2008- 5- 13 3: 46: 54	7
2008- 5- 13 4: 48: 30	2008- 5- 13 4: 48: 37	9
2008- 5- 13 07: 20: 04	2008- 5- 13 07: 23: 36	10
2008- 5- 13 9: 32: 57	2008- 5- 13 9: 33: 04	6
2008- 5- 13 10: 58: 30	2008- 5- 13 11: 03: 01	10

表 3 Sat₂ 调度方案表

Tab. 3 Scheduling plan for Sat₂

任务开始时间	任务结束时间	Pr
2008- 5- 12 12: 35: 50	2008- 5- 12 12: 35: 55	8
2008- 5- 12 14: 08: 28	2008- 5- 12 14: 09: 39	6
2008- 5- 12 15: 39: 56	2008- 5- 12 15: 40: 02	6
2008- 5- 12 17: 04: 11	2008- 5- 12 17: 04: 16	8
2008- 5- 12 17: 18: 43	2008- 5- 12 17: 18: 49	7
2008- 5- 12 19: 38: 53	2008- 5- 12 19: 38: 58	10
2008- 5- 12 20: 22: 40	2008- 5- 12 20: 22: 45	9
2008- 5- 13 7: 08: 08	2008- 5- 13 7: 08: 13	7
2008- 5- 13 10: 16: 25	2008- 5- 13 10: 16: 30	9

表 5 Sat₂ 重调度方案表

Tab. 5 Rescheduling plan for Sat₂

任务开始时间	任务结束时间	Pr
2008- 5- 12 12: 35: 50	2008- 5- 12 12: 35: 55	8
2008- 5- 12 14: 08: 28	2008- 5- 12 14: 09: 39	6
2008- 5- 12 15: 39: 56	2008- 5- 12 15: 40: 02	6
2008- 5- 12 17: 04: 11	2008- 5- 12 17: 04: 16	8
2008- 5- 12 17: 18: 43	2008- 5- 12 17: 18: 49	7
2008- 5- 12 19: 38: 53	2008- 5- 12 19: 38: 58	10
2008- 5- 12 20: 22: 40	2008- 5- 12 20: 22: 45	9
2008- 5- 13 02: 19: 36	2008- 5- 13 02: 21: 54	10
2008- 5- 13 7: 08: 08	2008- 5- 13 7: 08: 13	7
2008- 5- 13 10: 16: 25	2008- 5- 13 10: 16: 30	9

通过调度方案的结果可以发现, 所有 4 个应急窗口中有 3 个被安排: 其中, Sat₁ 的两个应急窗口均被插入(表 4 中以黑体表示), 窗口 1 与原方案的已调度窗口冲突, 但是应急窗口的优先级(10) 更高(已调度窗口为 8), 所以应急窗口被插入, 另一窗口没有任何冲突直接插入。Sat₂ 只有一个应急窗口被插入(表 5 中以黑体表示), 因为窗口 1 与原调度方案中的已调度窗口冲突, 且两任务优先级均为 10, 考虑到卫星方的利益, 没有插入应急窗口, 仍执行原方案(表 5 中以斜体表示), 另一窗口直接插入。

5 结论

本文就 CHARTER 机制下的减灾卫星调度问题进行了研究, 首先分析了问题的特性, 指出其是一种

针对区域目标的应急重调度问题。为提高区域目标的观测效率,有效发挥卫星的性能,提出区域目标的动态分解算法,该算法较传统的静态划分,性能有很大的提高,并且充分考虑卫星的差异。在区域目标划分基础上,文章又提出了基于启发式的动态调度算法,构建任务动态插入的启发式规则,提出了前向的约束检查机制和后向的约束冲突消解机制,以保证所生成的重调度方案合理、可行。

最后,文章通过具体算例证明了算法求解的有效性,尤其区域目标的动态划分算法显示了极大的优越性,但是也应看到,双向的解修复机制在保证解性能的同时,也降低了算法的求解效率,实际中 CHARTER 机制下的卫星多达几十颗,问题规模将远大于文中算例,因此求解速度将成为制约算法的瓶颈,下一步的研究中就是寻找一种更好的机制,在保证解效能的同时,提高求解速度。

参考文献:

- [1] 空间和重大灾害宪章[EB]. 国家空间技术减灾网. <http://www.ndrcc.gov.cn>.
- [2] Babulescu L, Howe A E, Whitley L D, et al. Trading Places: How to Schedule More in a Multi-resource Oversubscribed Scheduling Problem [C]// International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS-04). Whistler, British Columbia, CA: 2004.
- [3] Potts C H, Kovalyov M Y. Scheduling with Batching: A Review [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120 (2): 228-249.
- [4] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [5] Bianchessi N, Righini G. Planning and Scheduling Algorithms for the COSMO-SkyMed Constellation [J]. Aerospace Science and Technology, 2008, 12(7): 535-544.
- [6] Bianchessi N. Planning and Scheduling Problems for Earth Observation Satellites: Models and Algorithms [D]. Italy: Universit degli Studi di Milano, 2006.
- [7] Bensana E, Verfaillie G, Agnese J C, et al. Exact and Approximate Methods for the Daily Management of an Earth Observing Satellite [C]// Symposium on Space Mission Operations and Ground Data Systems. Munich, Germany: 1996.
- [8] 阮启明, 谭跃进, 李永太, 等. 基于约束满足的多星对区域目标观测活动协同 [J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 238-242.
- [9] 白保存, 贺仁杰, 李菊芳, 等. 面向点及区域目标的遥感卫星任务调度 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 59-64.
- [10] 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.
- [11] Tan Y J, Wang P. Joint Scheduling of Heterogeneous Earth Observing Satellite for Different Stakeholders [C]// SpaceOps 2008 Conference. Heidelberg, Germany: 2008.
- [12] 王沛. 面向点目标的多星联合侦察调度问题及启发式算法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

(上接第146页)

参考文献:

- [1] Garstka J, Alberts D. Network Centric Operations Conceptual Framework Version 1.0[M]. Evidence Based Research Inc., 2003.
- [2] Alberts D S, Garstka J J, Stein F P. Network Centric Warfare-developing and Leveraging Information Superiority [M]. 2nd Edition (Revised), Washington: CCRP Publication Series, 2001.
- [3] Barabási A L. Linked: The New Science of Networks [M]. Massachusetts: Perseus Publishing, 2002.
- [4] Nagurney A, Dong J. Supernetworks: Decision-making for the Information Age[M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.
- [5] Ameral L A N, et al. Virtual Round Table on Ten Leading Questions for Network Research[J]. Eur. Phys. 38, 143-145, 2004.
- [6] Kalloniatis A. A New Paradigm for Dynamical Modelling of Networked C2 Processes[C]// 13th ICCRTS, 2008.
- [7] Weisbuch G, Nadal J P. Interacting Agents and Continuous Opinions Dynamics [R]. SFI WP 2001-11-072: 1-21.
- [8] 刘洪, 张龙. 群体沟通意见模式涌现的因素影响分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 45-52.
- [9] Lanchester F W. Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm[J]. Engineering, 1914, 98, also in Newman J R eds. the World of Mathematics [C]// Redmond: Microsoft Press, 1988: 2113-2131.
- [10] 谭东风. 一种基于随机映射的战斗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(6): 102-107.
- [11] 谭东风. 基于演化网络的体系对抗效能模型[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(6): 93-97.
- [12] 鲍鲜鲲. 基于复杂网络的作战同步建模与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [13] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Attack and Error Tolerance of Complex Networks [J]. Nature, 406, 378-382, 2000.
- [14] Batagelj V. Efficient Generation of Large Random Networks [C]// XXIV Social Network Conference, 2004, 3: 12-16.
- [15] Fudenberg D, Tirole J. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- [16] Erdős P, Rnyi A. On the Evolution of Random Graphs[R]. Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5: 17-61.
- [17] Barabási A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, 1999, 286: 509-512.