

卫星对地观测任务全周期规划模型*

刘刚, 王建江, 李志猛

(国防科技大学 信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:为解决应急条件下卫星对地观测任务时间紧迫的问题,从卫星执行对地观测任务的全过程出发,提出了卫星对地观测任务全周期规划模型,综合考虑卫星完成任务的各个阶段,缩短整个任务的执行时间,使其满足应急条件下的时间需求。采用启发式算法求解,并研究了基于冲突队列的解的调整优化策略。实验验证所提的模型和算法能够较好地解决卫星对地观测任务规划问题,在时间紧迫的条件下与传统的各阶段的独立任务规划相比,能够提高任务的完成率,具有实际的应用价值。

关键词:卫星观测;任务规划;全周期

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0062-05

The model of whole cycle mission planning for satellite observation

LIU Gang, WANG Jianjiang, LI Zhimeng

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the satellite observation planning problem for emergency tasks with timing limits, the process of satellite observation is analyzed, and a whole cycle mission planning model on satellite observation is proposed. The model integrates four phases of satellite observation, to satisfy the timing limits of satellite observation missions in emergency. A heuristic algorithm was suggested to solve the model, and an optimization adjustment strategy based on conflict queue was also proposed. Simulation results show that the model and algorithm are feasible for mission planning of satellite observation, and improving the mission accomplishment ratio of independent mission planning for each phase.

Key words: satellite observation; mission planning; whole cycle

对地观测卫星主要的工作是根据用户的需求获取指定地面目标的图像数据。由于卫星在信息获取方面的大范围、无国界限制等方面的优势,对地观察卫星的应用越来越广泛,对卫星观测的需求也越来越多。在实际的应用中,许多卫星观测需求处于应急条件下,如战争爆发或者抢险救灾,观测任务的时效性要求较高,从用户提出需求到最终收到卫星信息产品的时间较短,传统的针对卫星的调度研究已不能满足具有较强时效性要求的卫星观测任务需求。实际上,整个卫星观测任务的执行过程应该包括数据的采集、传输、处理、分发等多个环节,如何通过对卫星观测任务执行的全过程进行合理的规划,以缩短应急条件下观测任务执行的时间,使资源的使用效益最大化,成为一个亟待解决的难题。

目前,国内外关于卫星资源规划调度^[1-2]的研究较多,主要集中于卫星信息获取过程中的采集^[3-4]和数传^[5-6]的规划调度,局限于对卫星有效载荷的优化使用,没有考虑后续的处理和分发

等过程,缺乏对卫星信息获取整个过程的规划调度的研究,不能保证整个观测任务的完成时间,无法解决应急条件下的卫星观测任务规划问题。从系统工程的角度出发,全周期任务规划^[7]包括从用户提出需求到产品提交给用户,对卫星有效载荷的调度只是其中的一个环节。对卫星信息获取过程进行全周期规划可更好地协调各个环节数据的流转,提高资源利用率和用户的满意度,缩短整个卫星信息获取过程的时间消耗。

1 卫星对地观测任务规划

卫星观测任务的执行过程是一个从用户提交需求到最终获得卫星信息产品的闭环,如图1所示。

主要包含以下6个步骤:

- (1) 用户通过网络提交需求;
- (2) 分析需求,并转换为卫星观测任务;
- (3) 根据观测任务进行卫星载荷采集调度;
- (4) 根据采集任务进行卫星数传调度;

* 收稿日期:2012-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61104180)

作者简介:刘刚(1986—),男,江苏江都人,博士研究生,E-mail:liugang1109@126.com;

李志猛(通信作者),男,博士,讲师,E-mail:zmli@nudt.edu.cn

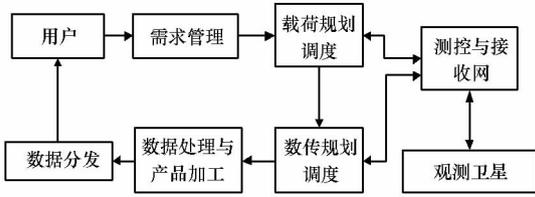


图1 卫星观测任务执行过程

Fig. 1 Processing of observation tasks

表1 任务相关的主要符号及其意义

Tab. 1 Notations about mission

符号	意义
R	参与规划的成像卫星集合
m	参与规划的成像卫星数目
I	成像任务集合
J	所有可能数传任务的集合
n	成像任务集合总数
pri_h	任务 h 的优先级
$Consume_h$	任务 h 的观测资源消耗,包括容量,能量等
g_h	任务 h 是否完成,取值为0或1
(O_h^s, O_h^e)	任务 h 的观测时间约束
p_h^t	任务 h 的最晚图像产品收到时间
st_i	活动 i 的开始时间
x_{ij}^r	布尔变量,卫星 r 连续执行活动 i 和 j 时取1

- (5) 处理卫星数据,加工为卫星信息产品;
- (6) 通过网络将卫星信息产品分发给用户。

在步骤(2)中,考虑卫星、载荷的限制,剔除无法满足的需求,在步骤(3)中,考虑轨道、天气的限制,剔除无法执行的任务。

由于不同用户对卫星信息的需求不同,不同类型的卫星产品对后期处理的时间和资源需求也是不同的;同时,卫星产品的数据量较大,压缩的时间和传输占用的带宽都是制约卫星观测任务按时完成瓶颈。

2 任务规划模型

2.1 约束与假设

本文建立了卫星观测任务的全过程规划模型,用系统工程的思想从整体对卫星观测任务进行规划,以提高任务的完成率,优化资源利用率。在现实环节中,一个卫星观测任务的完成可分为多个环节,所有环节的顺利完成才意味着一个观测任务的完成。本文假设在进行卫星观测任务规划前,通过对用户需求的分析,已经将不满足采集条件的用户需求剔除,如分辨率不满足等。为了研究的方便,将整个卫星观测任务规划分为四个环节,即采集规划、数传规划、处理规划和分发规划。

假设:(1)仅考虑同种类型的多颗卫星任务规划;(2)不考虑中继卫星的使用;(3)处理中心同一时间只处理一个任务。

本文的研究主要针对采集的时间和收到图像产品的时间都有要求的观测任务。通过对任务需求分析,将任务对观测的时间以及其他环节处理资源的约束转化为各个规划阶段的时间约束。在采集阶段为采集窗口,数传也可表示为数传窗口,处理可表示为处理时间,分发阶段也可表示为分发时间。

与任务相关的主要符号及意义如表1所示,其中,活动在采集规划阶段表示采集活动,在数传规划阶段则表示数传活动,在处理与分发阶段则表示处理活动和分发活动。

任务规划的目标函数为

$$\max \sum_{h=1}^n pri_h \times g_h$$

使整个规划时间内尽可能多地满足用户的需求,完成规划任务,获取最大收益。

在任务规划过程中,处理与分发阶段没有时间窗口的约束,为了研究的方便,本文将这两个阶段同时规划,即整个任务规划过程可以分为三个阶段:采集规划、数传规划和处理与分发规划,如图2所示。

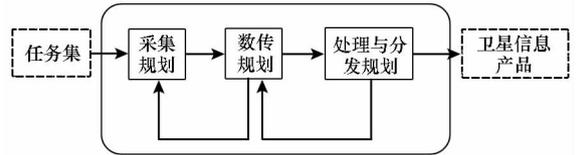


图2 卫星观测任务规划过程

Fig. 2 Tasks scheduling process

2.2 采集规划模型

采用约束满足问题(CSP)^[8]对采集任务进行建模。采集规划阶段的主要符号及意义如表2所示。

采集规划的属性模型可表示为

$$\sum_{r \in R_i} \sum_{i \in I_r} x_{ij}^r \leq 1, \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{i \in I_i} x_{ij}^r - \sum_{i \in I_r} x_{ji}^r = 0, \forall r \in R, j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ri}} y_{ir}^k - \sum_{i \in I_r} x_{ij}^r = 0, \forall r \in R, j \in I \quad (3)$$

$$y_{ir}^k (st_i - stw_{ri}^i) \geq 0, \forall r \in R, i \in I_r, k \in \{1, 2, \dots, n_{ri}\} \quad (4)$$

表 2 采集规划的主要符号及其意义

Tab.2 Notations about observation scheduling

符号	意义
R_h	可完成任务 h 数据采集的卫星集合
r_{limie}	卫星的资源限制,包括容量、能量等
$Consume_r$	卫星 r 已消耗的资源
I_r	处理后卫星 r 为可选资源的采集活动集合
TW_{kri}	采集活动 i 与卫星 r 在第 k 个时间窗口,时间范围 $[stw_{ri}^k, etw_{ri}^k]$
n_{ri}	采集活动 i 与卫星 r 可见的窗口数目
dt_{ri}	采集活动 i 由卫星 r 完成需要的持续时间,
y_{ir}^k	布尔变量,当数据采集活动 i 在卫星 r 之间的第 k 个时间窗口完成时,取 1

$$y_{ir}^r(st_i + dt_i^r - etw_{ri}^i) \leq 0, \forall r \in R, i \in I_r, k \in \{1, 2, \dots, n_{ri}\} \quad (5)$$

$$(st_i - o_i^s) \geq 0, \forall r \in R, i \in I_r \quad (6)$$

$$(st_i + dt_i^r - O_i^e) \leq 0, \forall r \in R, i \in I_r \quad (7)$$

$$Consume_r + Consume_h \leq r_{limie} \quad (8)$$

其中约束(1)和约束(2)表示数据采集活动最多被某颗卫星执行一次,且同一个卫星执行的活动有明确的先后之分。约束(3)说明某个活动的执行必须在某个卫星的一个时间窗口内。约束(4)和约束(5)说明采集活动的起止时间不能超过卫星窗口时间。约束(6)和约束(7)说明采集活动必须在任务规定的观测时间内完成,约束(8)说明资源的消耗必须满足卫星的资源限制,包括容量、能量等。

2.3 数传规划模型

根据采集规划的结果,确定数传任务集,采用 CSP 对数传任务进行建模。其中一个采集活动可能对应了多个可选的数传活动,由于在采集规划阶段,并不是所有的采集活动都能得到规划,因此并不是每个采集活动都有相应的数传活动与之对应。数传规划的主要符号及其意义如表 3 所示。

表 3 数传规划的主要符号及其意义

Tab.3 Notations about data download scheduling

符号	意义
J_r	处理后卫星 r 相关的数传活动集合
TW_j	数传活动 j 与地面站的可见窗口, $[stw_j, etw_j]$
dt_j	数传活动 j 的持续时间
y_{jr}^k	布尔变量,当数传活动 j 在卫星 r 与地面站之间的第 k 个时间窗口完成时,取 1

数传规划的属性模型可表示为

$$\sum_{r \in R_i} \sum_{i \in I_r} x_{ij}^r \leq 1, \forall i \in J \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I_i} x_{ij}^r - \sum_{i \in I_r} x_{ji}^r = 0, \forall r \in R, j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{ri}} y_{jr}^k - \sum_{i \in I_r} x_{ij}^r = 0, \forall r \in R, j \in J \quad (11)$$

$$y_{jr}^r(st_j - stw_j) \geq 0, \forall r \in R, j \in J \quad (12)$$

$$y_{jr}^r(st_j + dt_j - etw_j) \leq 0, \forall r \in R, j \in J_r \quad (13)$$

$$y_{jr}^r(st_j + dt_j + d_i + f_i - p_i^i) < 0, \forall r \in R, j \in J_r \quad (14)$$

其中约束(9)和约束(10)表示数传活动最多被某颗卫星执行一次,且同一个卫星执行的活动有明确的先后之分。约束(11)说明某个活动的执行必须在某个卫星的一个时间窗口内。约束(12)和约束(13)说明数传活动的起止时间不能超过卫星窗口时间。约束(14)说明该任务能够有时间完成后续的处理和分发活动。

2.4 处理与分发规划模型

根据数传规划的结果,确定处理与分发的任务集。每个处理活动和分发活动都对应这一个采集活动,由于采集规划和数传规划时并不是每个活动都能得到规划,因此,处理活动和分发活动是采集活动的子集。处理与分发规划的主要符号及其意义如表 4 所示。

表 4 处理与分发规划的主要符号及其意义

Tab.4 Notations about processing and distribution

符号	意义
D	处理活动集合, $D \subseteq I$
F	分发活动集合 $F \subseteq I$
d_i	任务 i 处理所需要的时间
f_i	任务 i 分发所需要的时间

$$(st_i + d_i - st_{i+1}) \leq 0, i \in D \quad (15)$$

$$(st_i + f_i - st_{i+1}) \leq 0, i \in F \quad (16)$$

$$st_i + f_i \leq p_i^i, i \in F \quad (17)$$

其中约束(15)和约束(16)表示处理和分发中心同一时间只能处理一个任务,约束(17)说明用户必须在任务截止时间前收到产品。

3 全周期任务规划求解

3.1 模型初始解

关于卫星采集、数传的规划调度的研究较为广泛,有很多成熟的求解算法^[9-10]。在应急条件下,为了快速得到规划调度方案,本文采用求解效率较高的启发式算法求解规划模型。

根据模型,卫星对地观测任务规划可分为三个阶段,分别是采集规划、数传规划、处理规划和分发规划。

采集规划阶段,①选取任务;②计算时间窗口(可用,闲置);③如有时间窗口,则分配给该任务;④如果冲突,加入对方冲突队列中。

数传规划阶段,①根据采集任务生成候选的数传任务;②计算可用窗口;③如有时间窗口,则分配给该任务;④如果冲突,加入对方冲突队列中,转下一个调度任务处理和分发阶段不存在时间窗口,利用带时间约束的经典的流水车间调度模型^[11]进行规划,如果规划失败的任务,则记录失败的任务。

3.2 基于冲突队列的调整机制

本文中的任务集是指经过预处理的任务,因载荷、天气等原因限制无法完成的任务已经剔除。在规划过程中,一个任务如果无法完成,必然是由于与其他任务的时间窗口产生了冲突。

任务规划分为多个阶段,每个阶段规划时并不能预测下一阶段规划的情况,因此可能出现本阶段规划成功的任务在下一阶段与更高优先级的任务产生冲突而被放弃。此时,前阶段对该任务的规划便没有意义,它所占用的资源也会造成浪费。此时如果对前阶段重新规划,规划时间难以满足,同时仍然有可能出现类似的情况,最终很难完成整个的任务规划。本文的全周期任务规划正是为了解决这样的问题而被提出的(图3)。

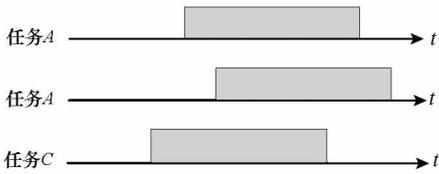


图3 采集阶段的任务时间窗口冲突

Fig.3 Time windows conflict of observation

为了能够高效地解决前阶段的任务调整问题,最大化利用资源,本文提出建立冲突队列的思想。即在每阶段规划时,对于规划成功的某任务A,建立一个冲突队列,将与任务A有时间窗口冲突而无法完成的任务加入到A的冲突队列中,并按优先级排序,如表5所示。在后阶段如果任务A不能完成,则需要取消任务A的规划,直接从冲突队列中按照优先级依次寻找可能的替代任务,重新利用时间窗口。

表5 采集规划阶段任务A的冲突队列

Tab.5 Task conflict queue of a during observation

任务	冲突队列
A	B, C, ...
D	E, H, ...

3.3 规划结果调整优化

根据任务规划的初始解,以及得到的冲突队列,对规划的结果进行调整优化,将没有完成所有环节规划的任务在前阶段的规划过程中占用的资源释放,并进行调整,使得这些资源能够发挥作用。

首先在数传的规划结果中将处理和分发阶段规划不成功的数传任务取消,同时查找这些任务在数传阶段的冲突队列,寻找可替代的数传任务,并对其进行处理和分发规划,如果能够规划成功,则将其插入到数传规划结果和处理分发结果中,遍历每一个处理分发阶段规划失败的任务。

如果处理与分发阶段规划失败的任务在数传阶段没有找到合适的替补任务,则将其加入到数传规划失败任务中,在采集规划中取消数传规划失败的任务,同时查找这些任务在采集阶段的冲突队列,寻找合适的替补任务,并对其进行数传和处理分发规划,如果能够成功,则将其插入到采集、数传和处理分发的规划结果中,遍历每一个数传阶段规划失败的任务。

4 仿真案例

考虑有两颗卫星和三个地面站的情况下,在不同任务量情况下,分析全周期规划的结果。

利用卫星软件工具包 STK 建立场景,其中两颗卫星为法国的 SPOT4 和 SPOT5,三个地面站的位置如表6所示,每个地面站有一个接收天线。观测点的坐标以及各阶段的时间要求随机产生。仿真是时间段为[1 Feb 2011 12:00:00, 2 Feb 2011 12:00:00]。

表6 地面站位置

Tab.6 Location of ground station

地面站	经度	纬度
1	-40.595	-10.040
2	90.595	40.040
3	-75.595	40.040

不同任务量情况下的调度结果如表7所示。从表中的计算结果可以看出,当任务量较小时,各个阶段规划都能成功,规划的结果不需要调整优

化。随着任务量的增加,采集阶段规划成功的任务在数传阶段有可能规划失败,需要调整采集规划的结果,以提高资源的利用率。同时,由于任务时效性的要求,在处理与分发规划阶段也会有少部分任务不能及时完成而被取消,从而需要调整前两个阶段的结果来提高资源利用率。

表7 任务规划结果

Tab.7 Result of tasks scheduling

任务数量	采集规划成功任务数	数传规划成功任务数	处理与分发规划成功任务数	调整优化后增加的任务数
10	10	10	10	0
50	48	48	46	1
100	91	91	89	2
200	190	190	184	5
500	472	349	324	32

由于本文采用的是启发式算法,因此求解的速度较快,图4给出了不同任务量下采集规划的求解时间,可以看出在任务量达到1000时,求解时间约150s,是可接受的。同时,数传规划的时间窗口数远小于采集规划阶段,因此数传规划所需要的时间小于采集规划的时间。处理与分发规划的算法没有时间窗口的约束,复杂度更小,所需要的时间更少。因此整个全周期规划的算法时效性是能够满足要求的。

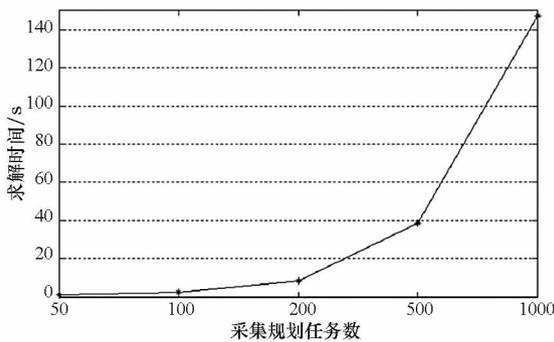


图4 不同任务数的采集规划时间

Fig.4 Time consume of observation scheduling

5 结论

本文主要解决了应急条件下的卫星对地观测任务全周期规划问题。通过分析卫星观测任务执行的一般过程,研究了卫星对地观测任务的全周期规划模型,并给出了启发式求解算法,基于冲突队列的规划结果优化方法,为进一步提高卫星资源的利用率和从全局规划卫星资源奠定基础。

随着观测卫星在各个领域的应用越来越受到重视,用户对于卫星观测的需求在不断增加。特

别是应急条件下,单独在卫星载荷调度或数传规划阶段优化求解已不能很好地提高卫星资源的利用率。而从全局出发,综合分析卫星任务执行各个阶段,提高完成任务的数量是必然的趋势。目前关于卫星信息获取过程中的采集和数传的规划调度研究较多,对卫星任务执行全周期进行规划调度的研究还较少,已有的部分研究一般假设数传资源实时可以,当需要的时候安排数传即可,没有将卫星观测任务的时间窗口与数传的时间窗口结合起来,综合考虑卫星调度过程中能量、存储容量以及时间窗口的冲突。本文对卫星对地观测任务全周期规划的模型进行了一定的探索,采用的算法较为简单,今后需要对模型进行细化,使之能够更好地反映实际情况,并使用更加智能的求解算法,以得到较好的初始解。

参考文献 (References)

- [1] Baek S W, Han S M, Cho K R, et al. Development of a scheduling algorithm and GUI for autonomous satellite missions [J]. *Acta Astronautica*, 68, 1396 - 1402, 2011.
- [2] Wang P, Reinelt G, Gao P, et al. A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of a earth observing satellite constellation [J]. *Computer & Industrial Engineering*, 61, 322 - 335, 2011.
- [3] Wolfe W J, Sorensen S E. Three Scheduling Algorithms Applied to the Earth Observing Systems Domain [J]. *Management Science*, 2000, 46:148 - 168.
- [4] Cordeau J F, Laporte G. Maximizing the value of an Earth observation satellite orbit [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2005, 56:962 - 968.
- [5] Damiani S, Verfaillie G E, Charneau M-C. A continuous anytime planning module for an autonomous earth watching satellite [C]//Proc of the 4th International Workshop on Planning and Scheduling for Space(IWPSS - 04), Darmstadt, Germany, 2004.
- [6] 李云峰, 陈祥国, 武小悦. 卫星数传调度模型研究[J]. *国防科技大学学报*, 2007, 29(6):121 - 125.
LI Yunfeng, CHEN Xiangguo, WU Xiaoyue. Research on the model of satellite data transmission scheduling[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(6):121 - 125. (in Chinese)
- [7] 李菊芳, 贺仁杰, 姚锋. 全周期卫星对地观测任务规划[J]. *遥感应用*, 2008(3):50 - 55.
LI Jufang, HE Renjie, YAO Feng. The whole cycle mission planning for satellite observation [J]. *Remote Sensing Information*, 2008(3):50 - 55. (in Chinese)
- [8] Huffman D A. Impossible objects as nonsense sentences[J]. *Machine Intelligence*, 1971(6):295 - 323.
- [9] Parish D A. A genetic algorithm approach to automating satellite range scheduling [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology Master Thesis, 1994.
- [10] Barulescu L, Howe A, Whitley D. AFSCN Scheduling: How the problem and solution have evolved[J]. *Mathematics and Computer Modeling*, 2006, 43: 1023 - 1037.
- [11] Dudek R, Panwalkar S, Smith M. The iessons of flow shop scheduling research [J]. *Operations Research*, 1992, 40(1): 7 - 13.