

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.007

引用格式:祝佳,陶峰.敏捷成像卫星需求筹划系统应用探析[J].电讯技术,2015,56(5):508-516.[ZHU Jia,TAO Feng. Application discussion on agile satellite requirements planning system[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(5):508-516.]

敏捷成像卫星需求筹划系统应用探析*

祝佳**1,陶峰²

(1. 中国西南电子技术研究所,成都 610036;2. 西安卫星测控中心 宇航动力学国家重点实验室,西安 710043)

摘要:作为一类具有大范围、快速机动能力的对地观测卫星,敏捷成像卫星在提高卫星观测效率的同时,也使得卫星需求的筹划与调度变得更加的复杂和困难,给卫星需求筹划技术带来了新的挑战。针对敏捷成像卫星的多种特殊工作模式,分析了敏捷成像卫星需求筹划的技术特点和约束条件,从工程应用实际出发,建立了一套基于复杂需求分解和动态规划调整的敏捷卫星地面需求筹划系统,并根据实际的应用需求,给出了相应的应用实例,最后进一步展望了未来敏捷成像卫星需求筹划的发展方向。

关键词:敏捷成像卫星;需求筹划;对地观测;应用探析

中图分类号:TN80;TP399 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)05-0508-09

Application Discussion on Agile Satellite Requirements Planning System

ZHU Jia¹,TAO Feng²

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. State Key Laboratory of Astronautic Dynamic, Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043, China)

Abstract:As a class of earth observing satellites with capability of large-scale and rapid attitude maneuver, agile satellites have improved the efficiency of satellite observations. Meanwhile they also make the planning and dispatching of satellite requirements become more complex and difficult and bring a new challenge for satellite requirements planning technology. According to the variety of special work modes of agile satellite, the technical features and constraint condition of agile satellite requirements planning are analyzed. In consideration of the actual situation of engineering applications, an agile satellites ground requirements planning system based on complex requirements decomposition and dynamic planning and adjustment is set up. According to the actual application requirements, an application example of agile satellite requirements planning system is also introduced. Finally, the prospect of future agile satellite requirements planning technology is described.

Key words: agile satellite; requirements planning; earth observation; application discussion

1 引言

随着成像卫星应用需求的不断提高,成像卫星平台及载荷技术也在不断地发展,高分辨率敏捷成像卫星就是根据未来卫星应用需求和技术发展趋势而设计研制的新一代先进卫星。

目前,国外已经成功研制并发射了多颗敏捷成

像卫星,例如欧洲的 Pleiades-1A、SPOT-6,美国的 GeoEye-1、WorldView-2 等,它们都具有大范围和快速的姿态机动能力。凭借这些能力,敏捷成像卫星可以在短时间内获取大量的遥感数据,并在国土测绘、灾害监测、农业资源管理、森林防护等多个领域发挥了巨大作用^[1]。

* 收稿日期:2015-12-24;修回日期:2016-04-05 Received date:2015-12-24;Revised date:2016-04-05

** 通讯作者:zhujiastc@163.com Corresponding author:zhujiastc@163.com

随着敏捷成像卫星平台能力的不断提升,其工作模式和任务需求也变得更加复杂多样,能够参与的卫星应用类型也更加灵活多变,这些同时也给敏捷卫星的需求筹划技术带来了新的问题和挑战。

美国宇航局的 Globus 等人^[2]指出对于敏捷成像卫星这类对地观测卫星而言,其需求筹划系统的主要难点在于约束条件的复杂多样和巨大的求解搜索空间,建议通过尽量安排高优先级的需求来解决这个问题。欧洲空间局的 Lemaitre 等人^[3]针对敏捷卫星需求调度问题,提出了将筹划模型简化为单星单轨道的需求筹划与任务调度问题。Habet 等人^[4]采用禁忌搜索算法来实现敏捷卫星任务需求的优化调度和冲突消解。国内的李玉庆等人^[5]提出采用模拟退火算法与遗传算法相结合的方式来解决三轴稳定卫星的点目标任务筹划问题,但不适用于复杂工作模式。陈宇宁等人^[6]基于蚁群算法提出了针对敏捷成像卫星的优化调度方法,并给出了相应的调度方案,但其筹划模型只是针对点目标的简单需求,同样没有涉及复杂的工作模式。向仍湘^[7]设计了一种针对敏捷卫星不同需求任务的筹划问题求解框架,涉及了区域目标分解、综合调度和立体成像需求等。孙凯等人^[8]针对敏捷卫星的复杂任务需求,采用前瞻启发式算法来进行任务规划,有一定的算法效率。郭浩等人^[9]从密集任务聚类的角度出发,设计了基于最大最小蚂蚁系统的聚类算法,提升了应急条件下的需求筹划能力。虽然针对敏捷卫星的需求筹划调度问题,国内外都已经开展了一系列的研究工作^[10-11],但不少研究往往只关注于算法理论上的改进与计算,忽视了许多在工程实现中会遇到的实际问题,因而有必要从实际工程应用需求的角度出发,研究更为实用的敏捷卫星需求筹划技术。

本文对敏捷成像卫星的需求筹划系统展开研究,针对其特殊的工作模式和约束条件,分析筹划模型的特点及关键技术,给出需求筹划流程及应用示例,以为相关领域的研究人员提供参考。

2 敏捷卫星需求筹划特点

之所以被称为敏捷卫星,就是相较于以往的非敏捷卫星,这一类卫星拥有更为灵活的姿态机动能力和更大的姿态机动范围。表 1 给出了国外主要敏捷卫星的相关参数。

表 1 国外主要敏捷卫星相关参数

Tab.1 Parameters of foreign main agile satellites

卫星名称	幅宽/km	最大侧摆/(°)	角速度/(°/s)
GeoEye-1	15.2	±60	2.4
WorldView-2	16.4	±40	3.5
Pleiades-1A	20.0	±60	2.4
SPOT-6	60.0	±30	2.5

以往的非敏捷类卫星最多只有一个方向的自由度,也就是围绕翻滚轴做垂直于星下点轨迹的横向侧摆机动,能够进行观测的时间窗口较为狭小。而敏捷成像卫星拥有 3 个方向的自由度,卫星可以同时围绕翻滚、俯仰、偏航 3 个轴进行姿态机动,也就是说同时具备了在侧摆和俯仰姿态下的成像观测能力,如图 1 所示。特别是通过调整观测时的俯仰角,使得敏捷成像卫星可以通过前视、正视、后视等不同的姿态在一个更为宽广的时间窗口内,自由地对地面目标进行观测,更为灵活地选择观测的起止时间,从而消除以往很多观测需求之间所存在的观测时间冲突问题,提供了更强大的观测能力和更多的观测自由。

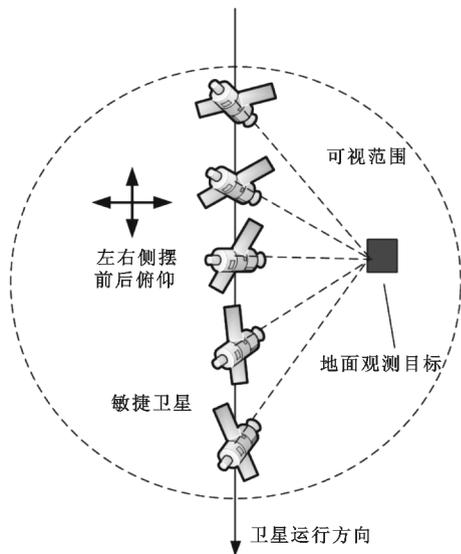


图 1 敏捷卫星姿态机动示意图

Fig.1 Diagram of agile satellite attitude maneuver

图 2 给出了一组敏捷成像卫星与非敏捷成像卫星在观测方式方面的对比示例。如图所示,沿星下点轨迹有 3 个待观测的任务需求目标,对于非敏捷卫星而言,目标的观测起止时间是确定的,由于目标 2 与目标 3 的观测起止时间存在重叠,因而这两个需求是相互冲突的,在筹划时只能安排其中一个进

行观测;而对于敏捷卫星而言,由于具有了俯仰方面的自由度,卫星与目标之间的可见时间窗口大大增加,通过在较为宽广的可见时间窗口内合理地调整安排不同目标的观测起止时间,可以使得上述的任务需求冲突得到消解,3个观测需求就可以在卫星的一次过境机会内全部安排完成观测。

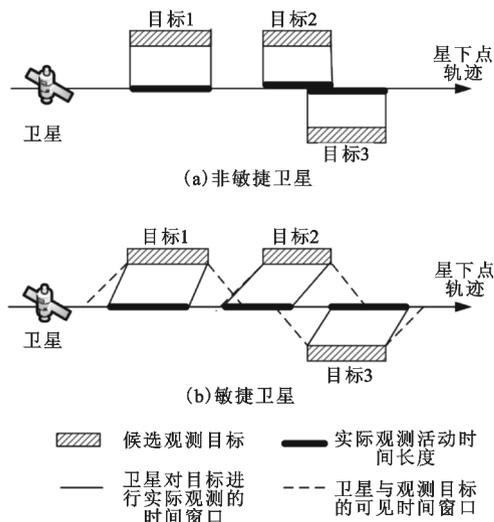


图2 敏捷卫星与非敏捷卫星观测方式的对比
Fig. 2 Comparison of observing way between agile satellite and non-agile satellite

观测方式的灵活性和观测机会的延长使得敏捷成像卫星有可能完成更多数量和更多类型的观测任务需求。然而,敏捷成像卫星在显著提高观测效率的同时,其相应的需求筹划和任务调度问题也变得更为复杂。除了与非敏捷卫星一样要选择观测需求和观测时间窗口之外,还需要决定不同观测需求的次序、观测需求在其时间窗口内的具体起止时间等。而且,前后两个需求动作之间存在能量和姿态的转换,使得卫星约束条件的表现形式与非敏捷卫星相比有着很多的不同。因此,需要通过建设合理先进的地面需求筹划系统来发挥敏捷成像卫星的强大对地观测能力,使其应用效益达到最大化。

3 敏捷卫星需求筹划模型

3.1 问题描述

敏捷成像卫星需求筹划问题可以这么描述:用户对于某颗敏捷成像卫星提出了一组观测需求,每个观测需求有各自对应的工作模式和需求优先级,敏捷卫星对于每个观测需求所对应的地面目标有一个可见时间窗口,在这个窗口内需要安排一个时间

段作为需求的开始和结束时间。

敏捷成像卫星需求筹划与任务调度问题是一类典型的资源受限型筹划调度问题,因为对于一颗敏捷成像卫星而言,其运行轨道、姿态机动能力、有效载荷能力、数传链路、星上固存容量以及电源等资源条件都是相对固定的,敏捷卫星只能在这些限定资源的基础上满足有限的观测需求。对敏捷成像卫星进行需求筹划的目的就是要在这些有限的资源条件下,实现卫星各类任务需求的优化安排,按照特定工作模式及卫星平台自身的各类约束和使用规则,合理筹划调度,让用户的需求得到最大程度的满足,从而使得敏捷成像卫星系统的应用效能得到充分发挥。

卫星的需求筹划和调度问题本身就属于一类非确定性多项式难(NP-hard)问题,而敏捷成像卫星因其更强的对地观测能力,大幅增加了卫星可进行观测的工作模式,筹划的可行性方案空间明显增大,使得需求筹划问题复杂性和寻优难度大幅提高。这类问题需要在特定目标下寻找最优解来实现一定程度上的最优化筹划,解的优化程度与计算的复杂度成正比,为了寻求更加优化的筹划结果,往往要付出更大计算复杂度的代价。在卫星的实际工程应用中,需求筹划问题往往要同时兼顾筹划结果的合理性和筹划计算的复杂度。

3.2 需求与约束分析

3.2.1 复杂工作模式约束

由于敏捷成像卫星具有灵活的姿态机动能力,因而可以完成一些复杂工作模式的任务需求^[12],这些复杂的工作模式也存在一些相应的约束条件^[13]。

(1) 单轨大范围多目标成像需求

敏捷卫星按照用户的需求,在卫星姿态机动的可覆盖范围内对地面的指定目标进行成像观测,这类目标需求大多为点目标,且空间距离较近,需要发挥敏捷卫星快速机动的能力来完成,单个目标成像时间不宜过长。

(2) 区域目标成像需求

所谓区域目标,是指卫星受其成像幅宽有限的影响,不能在一次成像过程中完全覆盖的目标需求,需要通过在一次过境时间内进行多个条带区域的成像,再进行多条带拼接来完成对整个区域目标的覆盖^[14]。这类需求受卫星姿态机动能力的影响很大,敏捷卫星姿态机动能力越高,能够完成的可拼接条带数就越多,可以覆盖的区域目标范围就越大。对于一颗确定的敏捷成像卫星,其最多的可拼接条带

数是确定的,可以作为其进行区域目标成像时的约束条件。

(3) 立体成像需求

立体成像需求就是在卫星的一次过境时间内对同一个目标从不同的角度进行多次的成像观测,从而可以提取该目标区域的高程数据,获取目标的立体图像。这类需求一般根据立体成像的特点需要成像两次或三次,即前后 2 视或前中后 3 视成像,成像次数由用户在提出需求时设置;除了成像次数的约束外,根据立体成像原理,还需要考虑成像基高比的约束。基高比是指摄影基线长度与摄影高度之比,即相邻两次观测曝光瞬间镜头中心位置的距离与卫星高度的比值。基高比反映的是前后影像在航向上的重叠度,基高比越大,重叠越小,立体观测和高程测量精度越高,立体效应就越好。

(4) 动态监视需求

所谓动态监视,就是卫星在其一次过境时间内通过调整姿态对同一目标区域尽可能多地进行成像观测,以获取指定目标区域在一定时间段内具有时间分辨率的图像序列。敏捷成像卫星在其一次过境时间内可以连续成像的次数,受其姿态机动能力和单次成像时长的影响。一次过境最大可观测次数和单次成像的观测时长均可以作为动态监视需求的约束条件。

3.2.2 卫星平台约束

(1) 一般一颗敏捷成像卫星只搭载一个成像传载荷,在一个时刻只能对一个地面目标进行观测。

(2) 卫星载荷的开关机约束:包括单轨道圈次内的最大开机次数、一天内的最大开机次数、一次开机的最短工作时间和最长工作时间。

(3) 卫星传感器成像约束:包括一次开机最大成像次数、一次成像的最短时间和最长工作时间、单轨道圈次内累计最大成像时间、单日累计最大成像时间。

(4) 连续两次成像时间间隔约束:相邻两次成像观测之间存在一个时间间隔,最小时间间隔受卫星姿态机动能力影响,根据不同敏捷成像卫星的姿态机动角速度,从对前一个目标进行观测时的姿态调整到对后一个目标进行观测的姿态需要一个时间,姿态调整后往往还需要一定的载荷稳定时间。如果这两次观测之间载荷需要先关机再开机的操作(受开关机约束的影响)时,受星上载荷电气特性的影响,载荷关机后,需要等待一定的时间之后才能再次开机,也就是存在一个开机时间间隔约束^[15]。

(5) 姿态机动能力约束:不同的敏捷成像卫星根

据其卫星平台能力,由侧摆角机动范围、俯仰角机动范围和成像幅宽,连同其相对固定的轨道参数共同决定了该颗敏捷卫星对于地面目标的可见时间窗口;

(6) 存储器容量约束:当地面目标与地面接收站相对于敏捷卫星不能同时可见时,观测数据不能实时传回地面,需要先存储在卫星的存储器内,等后续进入地面站的回传窗口时再将存储数据传回地面并删除星上数据,这就需要所存储的观测数据量不能超过星上存储器的存储容量。

3.2.3 其他约束

(1) 成像质量约束:这里所描述的成像质量主要体现在成像的分辨率,在传感器参数确定的情况下,敏捷卫星成像的分辨率主要取决于卫星与地面待测目标的距离,以及卫星对地面目标进行观测时的姿态角度,所以为了保证成像质量,需要尽可能地安排小角度姿态角的观测。

(2) 太阳光照约束:敏捷成像卫星一般为可见光成像卫星,因此需要在地面有太阳光照的条件下进行观测工作,而且对观测时地面目标的太阳高度角也有一定的约束条件,只有当太阳高度角不低于最小太阳高度角时,所成像的观测数据才是有效的。

(3) 地面资源约束:不仅星上资源是有限的,地面的接收管理资源也是有限的,除了地面站存在一定的回传时间窗口外,地面站天线的数传能力也存在最大值,通常一个地面站天线在某一时刻只能为一颗卫星提供数传业务服务。

(4) 对于区域目标成像、立体成像和动态监视等特殊工作模式的需求,由于其一个需求内包含了两次以上的成像观测动作,因此约定这些多个的观测动作必须在卫星一次过境时间内都完成才算该需求完成,且这些观测动作需要连续完成,中间不能安排其他的观测需求动作。

(5) 特殊成像需求约束:对于一些特定行业的用户而言,基于他们对于卫星产品的特殊需求,会对敏捷卫星观测提出一些约束,如指定观测的俯仰角、指定观测时间段、观测次数和时间间隔等。

3.3 筹划模型及数学描述

由上述分析可见,敏捷成像卫星需求筹划问题的约束条件较多且复杂,观测的需求种类也包括了点目标、区域目标、立体成像和动态监视等。根据这些敏捷卫星的需求筹划特点,我们建立相应的需求筹划模型及数学描述^[16]。

筹划模型的输入是敏捷成像卫星 s 和一组卫星

任务需求集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$, 其中 N 为任务需求的数量, 包含了点目标、区域目标、立体成像和动态监视等类型的任务需求。筹划模型的决策变量集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, N\}, x_i \in \{0, 1\}$ 。其中: $x_i = 1$ 表示任务需求 t_i 被安排执行; $x_i = 0$ 表示任务需求 t_i 不被安排执行。

下面描述筹划模型的约束条件。

(1) 对于需要多次成像的任务需求, 多个观测动作必须在卫星一次过境时间内都完成才算该需求完成:

$$\forall t_i \in T: (x_{iv} = 1) \Rightarrow x_i = 1, \sum_{v=1}^{N_i} x_{iv} = N_i. \quad (1)$$

式中: $x_{iv} = 1$ 表示任务需求 t_i 划分的观测动作 v 被安排执行; $x_{iv} = 0$ 表示观测动作 v 没有被安排执行; N_i 为任务需求 t_i 划分的观测动作数量。

(2) 一个任务需求只能被执行一次:

$$\forall t_i \in T: \sum_{i=1}^N x_i \leq 1. \quad (2)$$

(3) 对于目标成像的观测时间窗口存在以下约束:

$$\forall v \in t_i: (x_{iv} = 1) \Rightarrow (s_{iv} \leq p_{iv} \leq q_{iv} \leq e_{iv}). \quad (3)$$

式中: s_{iv}, e_{iv} 为任务需求 t_i 划分的观测动作 v 可见时间窗口的开始、结束时间; p_{iv}, q_{iv} 为实际观测的开始、结束时间。

(4) 同一任务需求下的各个观测动作之间的时间间隔存在以下约束:

$$\forall v \in t_i \Rightarrow (q_{iv} + t_s \leq p_{i(v+1)}). \quad (4)$$

式中: t_s 为前后两个观测动作之间的姿态转换时间。

(5) 前后两个任务需求之间的时间间隔存在以下约束:

$$\forall t_i \in T \Rightarrow (E_i + T_s \leq S_{i+1}). \quad (5)$$

式中: E_i 为前一个任务需求的结束时间; S_{i+1} 为后一个任务需求的开始时间; T_s 为前后两个任务需求之间的姿态转换时间。

卫星的轨道参数和性能参数是确定的, 任务需求信息包含了需求所需要的工作模式、待测目标坐标信息、需求优先级、区域范围、单次观测时长、观测次数等, 某些特殊需求还可以指定观测的角度等。

对于敏捷卫星需求筹划问题而言, 其筹划的目标可以有不同的形式, 具体取决于用户的偏好, 以最大化满足需求, 最大化发挥对地观测数据效益为目标。一般的筹划方案通常是考虑以需求的重要程度作为筹划调度目标, 通过设置并调整需求优先级, 在不能满足全部用户需求的情况下, 尽可能多地满足

更重要的观测需求。

下面给出筹划模型目标函数的数学描述。

(1) 成像收益 最大化任务需求的优先级加权之和:

$$Profit = \max \left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot \omega_i \right). \quad (6)$$

式中: ω_i 为任务需求 t_i 的权重 (优先级)。

(2) 成像质量 最小化观测动作的平均俯仰角和平均侧摆角之和。

任务需求 t_i 的平均俯仰角为

$$Pitch_i = \frac{\sum_{v=1}^{N_i} x_{iv} \cdot pitch_v}{N_i}. \quad (7)$$

式中: N_i 为任务需求 t_i 划分的观测动作数量; $pitch_v$ 为观测动作 v 的俯仰角。

任务需求 t_i 的平均侧摆角为

$$Roll_i = \frac{\sum_{v=1}^{N_i} x_{iv} \cdot roll_v}{N_{i,v}}. \quad (8)$$

式中: $roll_v$ 为观测动作 v 的侧摆角。

任务需求 t_i 没有被安排执行时,

$$Pitch_i = Roll_i = 0. \quad (9)$$

综上, 成像质量目标函数为

$$ImageQuality = \min \left(\sum_{i=1}^N (Pitch_i + Roll_i) \right). \quad (10)$$

(3) 需求满足度 最大化任务需求被安排执行的数量:

$$TaskNumber = \max \left(\sum_{i=1}^N x_i \right). \quad (11)$$

在敏捷卫星需求筹划模型中, 输入敏捷成像卫星 s 和一组卫星任务需求集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 后, 进入敏捷卫星需求筹划调度流程 (详见第 4 节)。通过综合筹划调度, 结合上述各类约束条件, 确定各任务需求的决策变量值及任务观测时间等, 再采用动态调整策略对存在冲突的任务需求进行消解, 动态调整时实时计算筹划模型的目标函数值, 寻求需求调度的最优解, 使得调整后的任务需求安排最大化满足用户需求。完成动态调整和冲突消解后, 输出卫星任务需求的安排情况以及安排的观测开始时间和结束时间。

4 敏捷卫星需求筹划流程

根据敏捷成像卫星需求筹划问题的特点, 我们将敏捷成像卫星需求筹划问题的求解过程划分为目标需求分解、综合筹划调度以及动态调整与冲突消

解三个主要阶段,筹划流程及求解框架如图 3 所示。

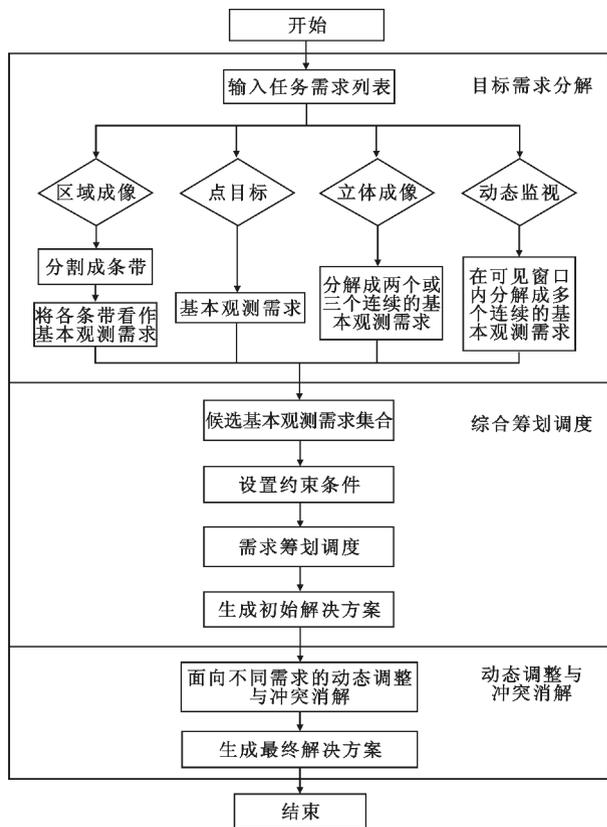


图 3 敏捷卫星需求筹划流程图

Fig. 3 Flow chart of agile satellite requirements planning system

4.1 目标需求分解

敏捷成像卫星的工作模式中,除了点目标成像需求之外,其余需求类型在筹划调度层面都显得较为复杂,不利于进行综合筹划和调度,因此需要先进行需求分解的预处理。目标需求分解就是根据不同的特殊需求类型,将复杂工作模式的需求分解简化成便于统一综合筹划调度的基本观测需求,即一次成像就能完成的观测需求。

(1) 点目标需求:一次成像就可以完成观测,已是最简化的需求了,直接作为基本观测需求。

(2) 区域目标成像需求:由于一次成像只能观测一个条带的范围,因此需要沿着星下点轨迹方向按照敏捷卫星的成像幅宽将目标区域划分成多个等宽的条带,每个条带作为一个基本观测需求。

(3) 立体成像需求:根据用户提出的观测次数和观测角度要求,将立体成像需求分解为连续的两个或三个基本观测需求,特别地,每个基本观测需求是附加有特殊观测角度要求的。

(4) 动态监视需求:根据用户提出的单次观测

时长和观测次数需求,将动态监视需求分解成可见时间窗口内的多个连续的基本观测需求。

4.2 综合筹划调度

通过目标需求分解的预处理后,所有的任务需求转换成了一组待分配的基本观测需求集合,根据敏捷卫星的性能参数和候选需求类型等情况,设置需求筹划的各类约束条件。

按照这些约束条件和需求各自的优先级,对候选的基本观测需求进行需求筹划和调度。通过约束条件先对观测需求进行筛选,提取出满足基本约束的需求;然后按照时间和优先级顺序,依次安排可执行的需求,初始筹划调度时各个基本观测需求均以较小的观测姿态角度来安排观测时间段,通过比较相邻两个基本观测需求的卫星姿态来计算出两个需求间所需要的姿态机动幅度,从而得出姿态机动时间,用以判断两个需求间的时间间隔能否满足约束条件。

通过需求筹划与调度处理,我们得到一组初始的筹划调度结果,包含了可执行的需求序列和对应的时间段、存在冲突的需求集以及需求被拒绝的理由信息。

4.3 动态调整与冲突消解

在初始解决方案中,给出了存在冲突的需求集合以及不可执行需求被拒绝的理由信息,我们可以根据实际的情况,面向不同的任务需求进行动态调整和冲突消解,实现需求满足的最大化,确保任务的有效执行。

由于敏捷卫星有较宽的可见时间窗口,具备进行动态调整的空间,我们在敏捷卫星需求筹划系统中设计了一个模块,基于滑动块的方式来对冲需求集进行可视化的动态调整,以消除存在的需求冲突。如图 4 所示,有一组存在冲突的需求集合,在动态调整之前,只安排了需求 2 作为可执行需求,需求 1 和 3 由于与需求 2 冲突,不能被安排执行。界面上滑块代表执行该需求所需要的时间范围,滑块滑动的窗口代表该需求对应的可见时间窗口,我们通过在界面上拖动滑动块,使得在时间轴上存在重叠的滑动块分开,并留有一定的时间间隔,然后再进行约束校验分析,判断时间间隔能否满足敏捷卫星的姿态机动时间,从而确认经过动态调整后,存在冲突的需求是否都能被满足。图中的 3 个冲突需求经过动态调整后都能执行了。

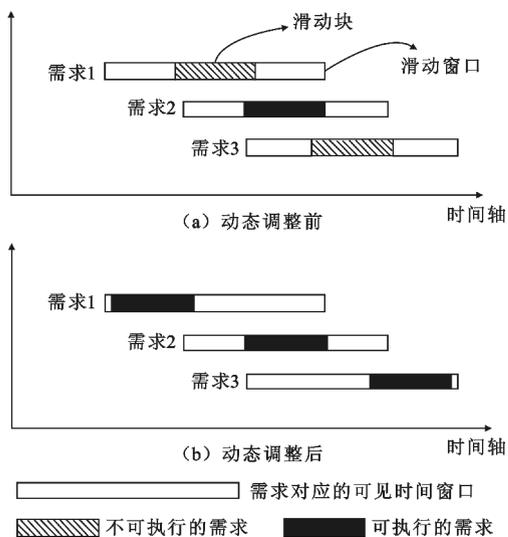


图 4 基于滑动块的动态调整示意图

Fig. 4 Diagram of dynamic regulation based on sliding blocks

针对特殊的几种工作模式,需要对其分解后的多个基本观测需求筹划结果进行统一分析评估,区域成像需求需要分析其成像条带对于该目标区域的覆盖程度是否能满足用户要求,立体成像和动态监视需求需要评估受理通过的可执行基本观测需求数目是否满足要求,如不满足,要么通过调整满足整个需求的执行,要么整个需求所包含的所有基本观测需求都不执行。

最后经过分析调整后,输出最终的筹划解决方案。

5 应用实例

敏捷成像卫星需求筹划系统以 Microsoft 公司的 Visual Studio. Net 2008 作为开发环境,以 C#作为开发语言,系统运行环境为 Windows 7,系统软件包含了需求预处理、需求筹划和动态调整 3 个主要功能模块。

用户输入需求筹划所用的各类信息,包括需求目标经纬度坐标、工作模式、观测次数、单次观测时长等,敏捷卫星的轨道参数、平台性能参数、各类约束条件等以配置文件的形式进行存储,用户可以根据需要进行设置维护。通过预处理、需求筹划和动态调整,最后输出可执行的需求列表及执行观测的开始结束时间。

图 5 为敏捷卫星需求筹划系统的处理界面示意图。表 2 给出了一组待筹划的需求示例,包含了 20 个观测需求,涵盖了点目标成像、区域成像、立体成像、动态监视等工作模式。该实例中,采用的敏捷卫星相关参数和轨道根数与 GeoEye-1 卫星相同(见

表 1),卫星单次成像时长至少为 5 s。由各个需求对应地面目标的卫星过顶时间可以看出,不少需求之间的时间间隔很短,观测时间上存在冲突。表 3 和表 4 分别给出了在动态调整之前和之后的需求安排情况,如果不进行姿态调整,仅按照过顶时刻来观测,这组需求里只能安排完成约一半的需求;而通过敏捷卫星需求筹划系统的动态调整与冲突消解,这组需求全部都能安排执行。

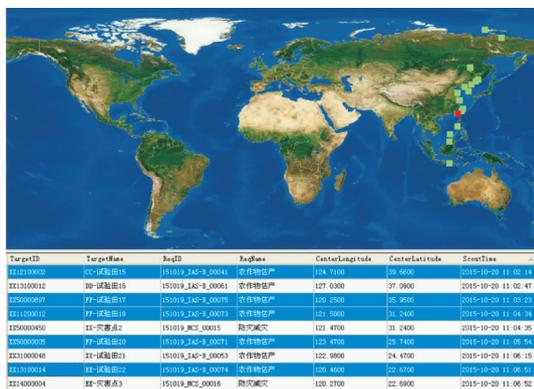


图 5 需求筹划系统界面

Fig. 5 Interface of requirements planning system

表 2 敏捷卫星需求筹划示例

Tab. 2 Example of agile satellites requirements planning

需求名称	工作模式	经度/ (°)	纬度/ (°)	过顶时间
BB-试验田 9	点目标	137.63	75.79	10:52:26
BB-试验田 10	区域成像	147.90	70.62	10:53:23
BB-试验田 11	立体成像	128.15	51.75	10:58:57
BB-试验田 12	点目标	133.41	44.26	11:00:36
BB-试验田 13	点目标	131.75	43.12	11:00:59
CC-试验田 14	点目标	129.09	41.28	11:01:36
CC-试验田 15	点目标	124.71	39.66	11:02:14
DD-试验田 16	点目标	127.03	37.09	11:02:47
FF-试验田 17	立体成像	120.25	35.95	11:03:23
FF-试验田 18	点目标	121.50	31.24	11:04:34
XX-灾害点 2	动态监视	121.47	31.24	11:04:35
FF-试验田 20	点目标	123.47	25.74	11:05:54
XX-试验田 21	点目标	122.98	24.47	11:06:15
EE-试验田 22	点目标	120.46	22.67	11:06:51
EE-灾害点 3	区域成像	120.27	22.69	11:06:52
XX-试验田 24	点目标	120.27	14.79	11:08:54
FF-试验田 25	点目标	115.52	9.88	11:10:45
XX-试验田 26	点目标	115.25	5.30	11:11:08
EE-灾害点 4	动态监视	115.20	1.10	11:13:52
XX-试验田 27	点目标	115.17	-8.75	11:15:17

表3 动态调整前的任务需求安排情况表

Tab.3 Requirements arrangement before dynamic adjustment

需求名称	安排结果	观测开始时间	观测结束时间
BB-试验田 9	接受	10:52:21	10:52:31
BB-试验田 10	拒绝	10:52:23	10:54:23
BB-试验田 11	接受	10:58:27	10:59:27
BB-试验田 12	接受	11:00:31	11:00:41
BB-试验田 13	拒绝	11:00:54	11:01:04
CC-试验田 14	接受	11:01:31	11:01:41
CC-试验田 15	拒绝	11:02:09	11:02:19
DD-试验田 16	接受	11:02:42	11:02:52
FF-试验田 17	拒绝	11:02:53	11:03:53
FF-试验田 18	接受	11:04:29	11:04:39
XX-灾害点 2	拒绝	11:03:35	11:05:35
FF-试验田 20	接受	11:05:49	11:05:59
XX-试验田 21	拒绝	11:06:10	11:06:20
EE-试验田 22	接受	11:06:46	11:06:56
EE-灾害点 3	拒绝	11:05:52	11:07:52
XX-试验田 24	接受	11:08:49	11:08:59
FF-试验田 25	接受	11:10:40	11:10:50
XX-试验田 26	拒绝	11:11:03	11:11:13
EE-灾害点 4	接受	11:12:52	11:14:52
XX-试验田 27	拒绝	11:15:12	11:15:22

表4 动态调整后的任务需求安排情况表

Tab.4 Requirements arrangement after dynamic adjustment

需求名称	安排结果	观测开始时间	观测结束时间
BB-试验田 9	接受	10:51:44	10:51:54
BB-试验田 10	接受	10:52:23	10:54:23
BB-试验田 11	接受	10:58:15	10:59:15
BB-试验田 12	接受	10:59:40	10:59:50
BB-试验田 13	接受	11:00:18	11:00:28
CC-试验田 14	接受	11:00:54	11:01:04
CC-试验田 15	接受	11:01:27	11:01:37
DD-试验田 16	接受	11:01:58	11:02:08
FF-试验田 17	接受	11:02:38	11:03:38
FF-试验田 18	接受	11:04:01	11:04:11
XX-灾害点 2	接受	11:04:35	11:05:35
FF-试验田 20	接受	11:05:58	11:06:08
XX-试验田 21	接受	11:06:31	11:06:41
EE-试验田 22	接受	11:06:46	11:06:56
EE-灾害点 3	接受	11:07:22	11:08:41
XX-试验田 24	接受	11:09:15	11:09:25
FF-试验田 25	接受	11:10:25	11:10:35
XX-试验田 26	接受	11:11:13	11:11:23
EE-灾害点 4	接受	11:12:52	11:14:52
XX-试验田 27	接受	11:15:31	11:15:41

6 结束语

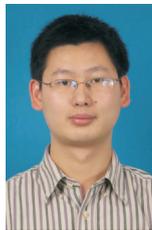
敏捷成像卫星是一类具有大范围、快速机动能力的对地观测卫星,它的出现大大增加了地面目标的可观测机会,使得对地观测卫星的观测能力和使用效率得到进一步提升。虽然敏捷成像卫星具有很强的对地观测能力,但其观测能力的充分发挥和应用效益的最大化则取决于合理先进的地面需求筹划系统。本文基于工程应用的实际情况,建立了一套相应的需求筹划系统流程,有效地提高了敏捷卫星的需求筹划效益。未来敏捷卫星平台能力还会进一步提升,其需求筹划的难度也会越来越大,星上自主筹划也将会是一个重要的发展方向,因此我们需要对敏捷成像卫星的需求筹划系统进行更加深入的研究和开发,真正实现筹划系统的智能化、综合化。

参考文献:

- [1] 葛玉君,赵键,杨芳. 高分辨率光学遥感卫星平台技术综述[J]. 国际太空,2013(5):2-8.
GE Yujun,ZHAO Jian,YANG Fang. Technical review of high resolution optical remote sensing satellite platforms [J]. Space International,2013(5):2-8. (in Chinese)
- [2] GLOBUS A,CRAWFORD J,LOHN J, et al. A comparison of techniques for scheduling earth observing satellites [C]//Proceedings of Sixteenth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. San Jose, California:ACM,2004:836-843.
- [3] LEMAITRE M,VERFAILLIE G,JOUHAUD F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. Aerospace Science and Technology,2002(6):367-381.
- [4] HABET D,VASQUEZ M,VIMONT Y. Bounding the optimum for the problem of scheduling the photographs of an agile earth observing satellite [J]. Computational Optimization and Applications,2010,47(2):307-333.
- [5] 李玉庆,徐敏强,王日新. 三轴稳定卫星点目标观测任务优化调度技术[J]. 吉林大学学报(工学版),2008,38(6):1447-1451.
LI Yuqing,XU Minqiang,WANG Rixin. Scheduling observations of spot object of three-axis stabilized satellites [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2008,38(6):1447-1451. (in Chinese)
- [6] 陈宇宁,邢立宁,陈英武. 基于蚁群算法的灵巧卫星调度[J]. 科学技术与工程,2011,11(3):484-503.
CHEN Yuning,XING Lining,CHEN Yingwu. Scheduling of agile satellites based on ant colony algorithm [J]. Science Technology and Engineering,2011,11(3):484-503. (in Chinese)
- [7] 向仍湘. 敏捷卫星任务调度技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.

- XIANG Renxiang. Research on selecting and scheduling observations of agile satellites [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 孙凯, 白国庆, 陈英武, 等. 面向动作序列的敏捷卫星任务规划问题[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6): 141-147.
- SUN Kai, BAI Guoqing, CHEN Yingwu, et al. Action planning for agile earth-observing satellite mission planning problem[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(6): 141-147. (in Chinese)
- [9] 郭浩, 伍国华, 邱涤珊. 敏捷成像卫星密集任务聚类方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 931-935.
- GUO Hao, WU Guohua, QIU Dishan. Intensive task clustering method for agile imaging satellites [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 931-935. (in Chinese)
- [10] 严珍珍, 陈英武, 邢立宁. 基于改进蚁群算法设计的敏捷卫星调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(3): 793-801.
- YAN Zhenzhen, CHEN Yingwu, XING Lining. Agile satellite scheduling based on improved ant colony algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(3): 793-801. (in Chinese)
- [11] 陈成. 时间依赖调度方法及在敏捷卫星任务规划中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- CHEN Cheng. Research on time-dependent scheduling methods and application on agile satellites mission planning [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] 张新伟, 戴君, 刘付强. 敏捷遥感卫星工作模式研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 32-38.
- ZHANG Xinwei, DAI Jun, LIU Fuqiang. Research on working mode of remote sensing satellite with agile attitude control[J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 32-38. (in Chinese)
- [13] ROMAIN G, GERARD V, ANTOINE F. Action and motion planning for agile earth-observing satellites [J]. Acta Futura, 2012(5): 121-131.
- [14] 章登义, 郭雷, 王骞, 等. 一种面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(8): 901-922.
- ZHANG Dengyi, GUO Lei, WANG Qian, et al. An improved single-orbit scheduling method for agile imaging satellite towards area target[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8): 901-922. (in Chinese)
- [15] 廉振宇, 谭跃进, 严珍珍. 敏捷卫星调度的时间约束推理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1206-1211.
- LIAN Zhenyu, TAN Yuejin, YAN Zhenzhen. Temporal reasoning technology for AEOS scheduling[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(6): 1206-1211. (in Chinese)
- [16] 郝会成. 敏捷卫星任务规划问题建模及求解方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- HAO Huicheng. Research on mission planning problem modeling and solving method of agile earth observation satellite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

作者简介:



祝佳(1984—),男,四川乐山人,2012年于中国科学技术大学获博士学位,现为工程师,主要从事卫星应用地面系统技术研究工作;

ZHU Jia was born in Leshan, Sichuan Province, in 1984. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2012. He is now an engineer. His research concerns satellite application technology.

Email: zhujiaustc@163.com

陶峰(1966—),男,安徽无为,高级工程师,主要从事无线电测量技术与航天测控站总体设计工作。

TAO Feng was born in Wuwei, Anhui Province, in 1966. He is now a senior engineer. His research concerns radio measurement and overall design of TT&C station.