

文章编号: 1001- 2486(2009) 02- 0059- 05

面向点及区域目标的遥感卫星任务调度*

白保存, 贺仁杰, 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: 遥感应用需求中存在点目标和区域目标两类任务, 遥感卫星对两类任务的调度方式存在很大区别, 将二者统一调度困难。本文将点目标视为特殊的区域目标, 将它们按照卫星观测机会分解, 构建元任务, 将两类目标在元任务层次进行统一; 根据任务类型分别构建收益函数, 兼顾了二者在收益计算上的差异, 并建立了面向点及区域目标的遥感卫星任务调度模型, 实现了对两类任务的综合调度。仿真实例证明, 此方法能够提高卫星的观测效率。

关键词: 遥感卫星; 调度; 点目标; 区域目标

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Remote Sensing Satellites Observing Scheduling toward Spot and Polygon Targets

BAI Bao-cun, HE Ren-jie, LI Ju-fang, CHEN Ying-wu

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

Abstract: Two types of tasks, the spot and polygon targets, are requested in remote sensing. However, great difference exists between the two request tasks and it is difficult to schedule the two kinds of requests within one model. In this paper, a novel model is proposed to tackle it by the following method. The spot requests are regarded as special polygon and they are also partitioned into subtasks. All of the subtasks generated by the requests are mapping into atomic task, and two types of request were unified in atomic task level. Finally, two evaluation functions were proposed to deal with there difference. Simulation results demonstrate the validity of the current approach.

Key words: remote sensing satellites; scheduling; spot targets; polygon targets

遥感卫星任务调度是在满足遥感卫星使用约束条件下, 在调度时段内, 为任务选择卫星资源并安排成像活动, 以实现最大完成任务的目的^[1-2]。依据目标与卫星传感器视场的大小关系, 可分为点和区域两类目标。点目标通常是一个面积较小的矩形/圆形区域, 可以被星载传感器单次覆盖; 而区域目标通常是较大范围区域, 需要多次拍摄才能完成。因此, 对区域目标, 必须首先依据一定的规则将其分解成多个子任务, 再安排卫星成像^[3]。区域目标在处理上的特殊性导致遥感卫星对两类任务的调度存在很大区别:

(1) 卫星对区域目标进行调度时, 首先要进行任务分解, 分解的子任务间存在交叉覆盖关系, 安排卫星观测时必须考虑子任务之间的覆盖情况, 而点目标无须分解。(2) 区域目标的范围较大, 需要分配给多个传感器共同观测, 以提高卫星对区域目标的覆盖率, 点目标只需由单颗卫星一次观测完成。(3) 点目标只存在完成或未完成两种状态, 而区域目标还存在着部分满足状态, 即区域目标被部分观测的情形。为了量化区域目标的完成情况, 必须采用区域目标被观测的覆盖率或覆盖面积等参数进行量化分析。因此, 二者在收益计算方面也存在差异。

遥感需求中可能同时存在点和区域两类目标, 为充分发挥卫星能力, 并提高任务的完成效率, 需要将它们综合调度。但由于上述差异, 将两类目标综合调度存在困难。目前多数研究只能针对单类目标

* 收稿日期: 2008- 09- 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70601035)

作者简介: 白保存(1980—), 男, 博士生。

调度,少量研究将区域目标转换为点目标,然后按照点目标的方式统一调度^[1],但其对区域目标的分解方式存在诸多不足,降低了卫星对区域目标的观测效率^[3]。

本文通过分析卫星对两类任务调度的特点,将点目标视为特殊的“区域目标”,按照卫星的观测机会进行分解,并与区域目标分解的子任务统一映射为元任务,采用任务组的方式对元任务进行管理,并依据目标类型分别建立收益函数,兼顾二者在收益计算上的差异,从而将两类目标统一在一个框架下调度,提出了面向点及区域任务的遥感卫星任务调度模型。最后,通过仿真实例验证了该方法的有效性,结果证明其可以提高卫星的观测效率。

1 面向点及区域目标的遥感卫星任务调度模型

面向点及区域目标的遥感卫星任务调度可以用五元组 $\langle E, S, T, C, F \rangle$ 表示, E 是调度时段, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ 是卫星集合, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ 是任务集合, C 是约束条件集合, F 是目标函数。任务集合 T 中包含点及区域两类任务,分别以 $Spot, Polygon$ 表示。

遥感卫星任务调度是在卫星及载荷约束条件下,在调度时段内,为目标优化安排卫星资源,并确定卫星观测的角度及起止时间,使得完成任务最大化。当任务为点目标时,优化目标一般为完成任务的优先级之和最大。当任务为区域目标时,以目标的价值与综合覆盖率衡量,优化目标为总收益最大。为统一表示,可以将点目标的优先级转换为收益,因此,本文的优化目标为安排任务获取的收益最大化。

为了将两类目标综合调度,本文将点目标视为一类特殊的“区域目标”,对点目标按照卫星的观测机会也进行“分解”,并得到多个子任务,并把两类目标分解后的子任务统称为元任务(atomic task)。称之为元任务的意义在于,这些任务都是可以由单颗卫星一次观测完成的,并且是不可再分的原子任务。将它们统一为元任务,有利于对任务统一描述和处理,避免两类目标的差异。另外,两类目标在收益计算上具有特殊性,采用分别定义收益函数的方式兼顾二者差异,实现了对两类任务的综合调度。

1.1 元任务构造

元任务可以理解为卫星对目标的一次可选观测活动,采用六元组表示:

$\{AtomicId, TaskId, SatId, Win, Angle, Coordinate\}$

分别为元任务标识、任务标识、卫星标识、时间窗口、观测角度及任务的坐标信息。点目标分解的元任务坐标为其经纬度坐标,区域目标分解的元任务坐标为划分后得到的条带的四个顶点的经纬度坐标序列,该坐标信息用于调度过程中统计区域目标被观测的覆盖率。

点目标和区域目标的元任务构造分三个阶段,处理流程如图 1。

预处理阶段主要是通过卫星轨道预报软件获取卫星与任务间的时间窗口,以利于对观测任务进行分解。

任务分解阶段根据卫星对每个目标的观测机会进行分解,并将分解得到的元任务组成元任务组。其中,卫星对点目标的每个观测机会均构造一个元任务,元任务的时间窗口及观测角度为该观测机会内,卫星对目标的时间窗口和观测角度。区域目标的分解比较复杂,可以采取多种分解方式,如离散为点目标^[4-5]、采用预定义的参考系统^[6]、按照固定方向和宽度分解^[7]以及动态分解方式^[8-9]。动态分解方式能够根据不同卫星的特点,如传感器幅宽、侧摆性能等参数对区域目标重复分

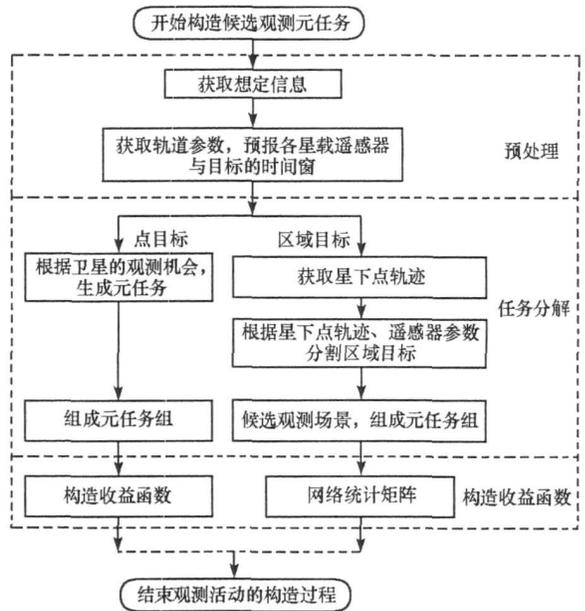


图 1 元任务构造流程图
Fig. 1 The procedure of atomic task generation

解,更适用于多星对区域目标的观测情况,因此,本文采用动态分解方法将区域目标分解为多个元任务,图2为根据两颗卫星对区域进行目标动态分解的示意图。

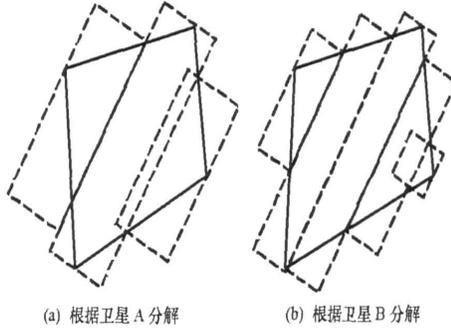


图2 区域目标动态分解示意图

Fig. 2 Dividing Polygon with dynamic segmenting method

构造收益函数阶段是为不同的目标建立收益函数。点目标只要求一次观测即可视为完成任务,因此,分解的元任务的收益为点目标的收益。区域目标分解的元任务间存在交叉覆盖关系,重复覆盖部分不会增加收益,计算收益时要计算所有已经安排的元任务对区域的综合覆盖情况。因此,对区域目标构造网格收益矩阵,采用网格统计法统计多个元任务对区域目标的综合覆盖情况。由于两类目标在收益计算上存在差别,模型中采用分别构造收益函数的方式兼顾二者的特点。

1.2 观测任务收益函数构造

模型中统一处理两类目标,必须考虑各类目标价值的归一化处理。为了便于处理,由计划编制人员综合考虑目标的重要程度以及观测目标所需要的资源,制定每个目标的价值(收益)。设任务 t_i 的价值为 w_i ,其分解得到的元任务集合为: $O_i = \bigcup_{j=1}^{N_s} \bigcup_{k=1}^{N_{ij}} o_{ijk}$, $i \in [1, \dots, N_T]$,其中 N_{ij} 为任务 t_i 依据卫星 s_j 的观测机会构造的元任务数量。设 s_j 在 o_{ijk} 内对 t_i 的观测角度为 g_{ijk} ,起止时间为 $[ws_{ijk}, we_{ijk}]$ 。元任务的状态变量为 x_{ijk} ,当 o_{ijk} 被安排观测时, x_{ijk} 为 1, 否则为 0。

(1) 点目标收益函数

当 t_i 为点目标时,其所对应的元任务组中只要有一个元任务被安排观测,就可视为已完成任务,多次观测不增加收益,因此,1.3节的数学模型中加入了点目标只被一次观测的约束。点目标的收益函数为

$$Profit(t_i) = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_{ij}} x_{ijk} \cdot w_i, \quad \forall t_i \in Spot \quad (1)$$

(2) 区域目标收益函数

当 t_i 为区域目标时,必须首先统计其被观测的有效覆盖率,首先定义了区域目标被观测的覆盖率计算公式:

$$Cover(t_i) = \left[\bigcup_{i=1}^{N_s} \bigcup_{k=1}^{N_{ij}} x_{ijk} \phi(o_{ijk}) \right] \cap \phi(t_i), \quad \forall t_i \in Polygon \quad (2)$$

此处采用集合论中的“并”关系表示多个元任务代表的小区域的组合关系,采用“交”关系表示多个元任务对区域的覆盖关系。其中 $\phi(o_{ijk})$ 表示元任务 o_{ijk} 所表示的多边形区域(条带或单景), $\phi(t_i)$ 表示区域目标 t_i 的多边形区域。由于本文设区域目标的收益为线性回报函数,由此得到区域目标的收益函数:

$$Profit(t_i) = Cover(t_i) w_i, \quad \forall t_i \in Polygon \quad (3)$$

调度的总收益为所有任务的收益之和,计算时要根据任务的类型选择相应的收益函数。

1.3 数学模型

为完善模型还需要定义以下变量:设卫星 s_j 的存储容量为 M_j ,最大能量为 P_j ,观测单位时间所消

耗的存储容量及能量为 m_j, p_j , 卫星侧摆速率为 ϑ_j , 侧摆后的稳定时间为 d_j 。

模型采用元任务的状态变量 x_{ijk} 为决策变量, 下面给出面向点及区域目标的遥感卫星任务调度模型:

$$\max f = \sum_{i=1}^{N_T} Profit(t_i) \quad (4)$$

约束条件为

$$\forall o_{jk} \neq o_{jk}' \text{ and } x_{ijk} = 1, x_{ijk}' = 1, ws_{jk} \geq we_{jk}' \Rightarrow we_{jk}' + |g_{jk} - g_{jk}'| / \vartheta_j + d_j \leq ws_{jk} \quad (5)$$

$$\forall i \in [1, \dots, N_T] \text{ and } t_i \in Spot: \sum_{j=1}^{N_S} \sum_{k=1}^{N_j} x_{ijk} \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall j \in [1, \dots, N_S]: \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_j} x_{ijk} (we_{jk} - ws_{jk}) m_j \leq M_j \quad (7)$$

$$\forall j \in [1, \dots, N_S]: \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{k=1}^{N_j} x_{ijk} (we_{jk} - ws_{jk}) p_j \leq P_j \quad (8)$$

式(4)为目标函数,表示优化目标为总收益最大;式(5)为任务间的转换时间约束,包括侧摆转动时间及侧摆后的稳定时间,它同时保证了卫星在任意时刻只能采用一种角度进行观测;式(6)表示所有点目标最多只安排一次观测;式(7)为卫星的存储约束;式(8)为卫星的能量约束。

模型将点目标视为特殊的“区域目标”,和区域目标同时分解为元任务,元任务代表了卫星为完成某个任务的所有可能的观测活动。模型的根本特点在于将元任务,而不是任务(点目标、区域目标)作为调度的基本元素,屏蔽了点目标与区域目标的区别。同时又通过元任务与任务间的联系,获取每个任务被观测的情况。并依据其任务类型调用相应的收益函数计算收益,兼顾了二者的差异,体现了不同类型任务的调度特点。

2 仿真实验分析

为验证本方法对点目标和区域目标的联合调度效果,进行如下仿真实验:2颗卫星在24h内联合对一组任务进行观测。其中包含两个区域目标和80个点目标。两个区域目标分别处于东海区域和台海区域,区域信息如表1所示。点目标则为我国境内(北纬 $20^\circ \sim 50^\circ$,东经 $70^\circ \sim 130^\circ$)随机生成的80个点目标,优先级设为 $[1, 10]$ 的随机数。为简化问题,所有区域目标的总体收益均与其面积成正比,点目标的收益为其优先级的5倍。经过轨道预报,并计算卫星对区域的覆盖情况发现,其中两颗卫星均有对区域目标的可见时间窗口,但均不能完全对区域目标进行覆盖。

表1 区域信息表

Tab. 1 The coordinates of polygon targets

| | 区域 A | | 区域 B | |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 纬度($^\circ$) | 经度($^\circ$) | 纬度($^\circ$) | 经度($^\circ$) |
| 区域顶点 坐标信息 | 25 1753 | 121. 234 | 31. 4046 | 123. 666 |
| | 23 4098 | 120. 201 | 33. 903 | 123. 432 |
| | 22 2106 | 120. 801 | 33. 903 | 125. 098 |
| | 24 5757 | 122. 067 | 32. 5372 | 124. 798 |
| 面积(km^2) | 28368 | | 27798 | |
| 总收益 | 2836. 8 | | 2779. 8 | |

采用三种方式规划任务。方案1:首先规划点目标,然后依据卫星剩余观测能力规划区域目标;方案2:先规划区域目标,然后依据卫星剩余观测能力规划点目标;方案3:采用本文方法统一规划两类目标。规划点目标时采用了文献[2]中的禁忌搜索算法进行求解,规划区域目标采用了文献[8]的算法。

由于本文方法是将点目标最终统一为区域目标,因此点和区域联合调度的算法主体也采用了文献[8]的算法,并加入了点目标分解、两类目标收益函数构造以及最终收益的统计,具体算法此处从略,调度结果如表2所示。

表2 调度结果表

Tab. 2 Comparison of different scheme on scenario

| | 点目标收益 | 区域目标收益 | | | 总收益 |
|-----|-------|----------|----------|--------|--------|
| | | A 覆盖率(%) | B 覆盖率(%) | 区域总收益 | |
| 方案1 | 1575 | 0 | 0 | 0 | 1575 |
| 方案2 | 215 | 62.6219 | 65.3065 | 3591.8 | 3806.8 |
| 方案3 | 450 | 59.6137 | 63.7439 | 3463.1 | 3913.1 |

由结果可以看出,方案一所得收益最小,方案二居中,方案三最好。不考虑算法性能的影响,仅从理论上分析,前两种方案为阶段性优化过程,即先规划任务中的子集,然后规划剩余部分,而最后一种方案为全局的优化求解。另外,本实例中区域目标的单个条带所需观测时间较长,所消耗的资源较多,因此假定区域目标具有较大的价值。卫星运行受单圈最大开机次数等约束影响,每圈成像次数有限,第一种方式中,每圈次的开关机次数、侧摆次数等资源率先消耗在价值较小的点目标上,以至于没有剩余资源去观测区域目标,导致整体收益最低。

必须注意到,前两种方式优先调度一类目标,其计算结果受目标价值差异的影响较大,而本文将点目标与区域目标综合进行调度,目标的价值变化对其影响不大,其调度目标始终为收益最大化。

3 结论

为了实现卫星对点与区域两类目标的综合调度,以提高卫星的观测效率,本文提出了将点目标视为“区域目标”处理的思路,通过将各类目标分解,在元任务层次上对两类目标进行统一。为兼顾了二者在收益计算方面的差异,根据任务类型分别构造收益函数,实现对不同类型任务收益的分别计算。最终建立了面向点及区域目标的遥感卫星任务调度模型,实现了对两类不同类型任务的统一调度。通过仿真实验,验证了该方法是有效的。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贺仁杰. 成像侦察卫星调度问题研究[D]. 国防科技大学, 2004.
- [3] 阮启明. 面向区域目标的成像侦察卫星调度问题研究[D]. 国防科技大学, 2006.
- [4] Walton J. Models for the Management of Satellite-based Sensors[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [5] Rivett C., Pontecorvo C. Improving Satellite Surveillance through Optimal Assignment of Assets(DSTO-TR-1488)[R]. Australian Government Department of Defense, 2004.
- [6] http://bsrsi.msu.edu/tf/iq/data_portal/Landsat7doc/.
- [7] Lematre M., Verfaillie G. Selecting and Scheduling Observations of Agile Satellites, Aerospace Science and Technology[J]. 2002, 6: 367-381.
- [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, 阮启明, 陈英武. 多星协同观测条件下区域目标的动态划分方法[J]. 运筹与管理, 2008, 17(2): 43-47.