

一种面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度方法

章登义¹ 郭雷¹ 王骞¹ 邹华¹

¹ 武汉大学计算机学院,湖北 武汉,430072

摘要:针对传统卫星调度方法难以满足应急观测强时效性的问题,提出一种针对敏捷成像卫星的调度方法。首先动态计算敏捷卫星观测摆角、幅宽和持续时间,再以平行条带分割区域目标,获得最小姿态调整时间;在此基础上,设计等步长搜索算法求解对区域目标的最佳观测点。构建了包含 4 颗敏捷成像卫星的 STK 仿真场景,仿真结果说明该方法在提高观测目标覆盖率的同时减少了获取影像的时间。

关键词:敏捷成像卫星;区域目标;单轨调度;动态分解;STK

中图法分类号:TP751

文献标志码:A

针对海上搜救、区域侦察、抢险救灾等应急观测需求,如何快速获取整个区域目标的高分辨率图像成为一个亟待解决的问题。按照星载传感器视场与地面目标的相对大小,观测任务对象可分为点目标和区域目标。区域目标通常是一个多边形区域,单颗传统成像卫星在单次过境的情况下无法获取其全部图像。以往研究中,多采用多星协同^[1-3]的方式弥补这个缺点,但是难以保证在应急时间窗口内有多颗满足要求的卫星按时过境。新一代敏捷成像卫星如 Pleiades-1^[4-5]以其灵活的姿态机动能力(滚动、俯仰和偏航)给卫星单轨观测整个区域目标提供了可能。文献[4]涉及区域目标观测问题,但是没有针对应急观测需求展开讨论,时效性不强。文献[6]针对应急观测需求,提出了一种基于最大最小蚂蚁系统的任务聚类方法,但是其观测任务仅限于点目标。

据现有资料显示,目前对应急条件下敏捷卫星观测区域目标的调度问题研究较少,由于敏捷卫星拍摄图像的开始时间和方位角不唯一,且不同的区域目标分解方案可派生出不同的成像任务集合,这些都给应急条件下的敏捷卫星单轨观测区域目标带来了困难。针对这一问题,本文建立了面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度问题模型,对文献[4]中的区域目标静态分解法进行改进,提出了动态分解法,在此基础上,为了使卫星在最快时间内获取对区域目标的最大覆盖,设计

了搜索算法求解敏捷成像卫星对区域目标的最佳观测点。

1 面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度问题

面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度问题是指在卫星单次过境的情况下,为了尽快获取区域目标的最大覆盖图像,如何安排敏捷卫星成像任务的开始时间、持续时间和每次成像时卫星观测摆角的过程。敏捷成像卫星单轨观测区域目标的过程如图 1 所示。

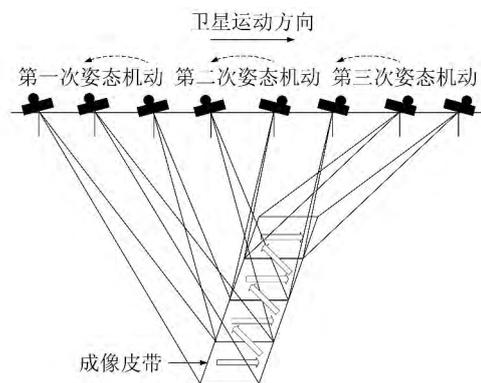


图 1 4 条带拼接示意图^[7]

Fig. 1 Four Strip Mapping^[7]

1.1 问题描述

1) 卫星单轨调度。成像卫星调度通常以天

收稿日期:2013-06-14

项目来源:国防预研基金资助项目(GFZX0404010502)。

第一作者:章登义,教授、博士生导师,主要从事空天信息仿真和卫星调度研究。E-mail: dyzhangwhu@163.com

通讯作者:郭雷,博士生。E-mail: guolei@whu.edu.cn

为调度周期,而此处以单轨为调度周期主要出于以下考虑,一是卫星每天绕地球飞行十多圈,每天的调度可转换为多个单轨调度问题;二是出于时效性的考虑,以单轨为调度周期比以天为调度周期的时效性更强。

2) 区域目标分解。根据卫星幅宽将区域目标分解成多个能被卫星一次推扫成像的平行条带的过程,称为区域目标分解。区域目标分解是单轨调度的核心问题,分解后的成像条带直接影响到卫星对区域目标的覆盖率。

3) 卫星姿态调整时间。卫星在相邻条带之间的姿态调整不是瞬时完成的,卫星姿态调整时间的计算涉及复杂的卫星动力学,在调度过程中,通常简化其计算。

1.2 问题形式化

在合理假设的基础上,本文建立了面向区域目标的敏捷成像卫星单轨调度问题的数学模型。

1) 基本假设:在成像窗口内,卫星满足图像类型、光照等任务要求;有足够的能量和存储容量;不考虑立体图像获取任务等特殊需求;不考虑大幅度姿态机动对卫星图像几何处理的影响。

2) 符号和变量:

ET 和 LT 分别为卫星对目标的最早和最晚观测时间; $MaxRoll$ 、 $MaxPitch$ 和 $MaxYaw$ 分别为最大滚动角、最大俯仰角和最大偏航角; $Angles$ 是卫星观测摆角集合,每个观测摆角 $i \in Angles$,用时间 T_i 、滚动角 $Roll_i$ 、俯仰角 $Pitch_i$ 和偏航角 Yaw_i 表示; $Strips$ 为成像条带集合,每个成像条带 $j \in Strips$,用两个端点 $Point1_j$ 和 $Point2_j$ 、条带长度 $Length_j$ 、条带宽度 $Width_j$ 、分辨率 $Resolution$ 、条带开始时间 ST_j 、条带持续时间 Du_j 和有效面积 $Area_j$ 表示, $j+1$ 表示与 j 相邻的下一个条带; $Swath_i$ 为卫星观测摆角为 i 时的卫星幅宽; $TraTime_{j,j+1}$ 为相邻条带 j 和 $j+1$ 之间的最小卫星姿态调整时间。

3) 模型:

$$\max \sum_{j \in Strips} Area_j \quad (1)$$

$$\min \sum_{j \in Strips} (Du_j + TraTime_{j,j+1}) \quad (2)$$

$$s. t. \quad \forall j \in Strips, i \in Angles:$$

$$ET \leq T_i \leq LT \quad (3)$$

$$Roll_i \leq MaxRoll, Pitch_i \leq MaxPitch,$$

$$Yaw_i \leq MaxYaw \quad (4)$$

$$(ST_j = T_i) \Rightarrow (Width_j \leq Swath_i) \quad (5)$$

$$ST_j + Du_j + TraTime_{j,j+1} \leq ST_{j+1} \quad (6)$$

模型中,式(1)、式(2)是目标函数,目标是使卫

星以最快时间获取最大观测目标覆盖率,式(3)~(6)是约束条件,在敏捷成像卫星单轨调度的过程中必须满足这4个条件。 $\sum_{j \in Strips} Area_j$ 是成像条带集合 $Strips$ 对区域目标的有效覆盖面积, $\sum_{j \in Strips} (Du_j + TraTime_{j,j+1})$ 是卫星获取区域目标图像的总耗费时间。约束式(3)表明卫星观测区域目标必须在其成像窗口内,约束式(4)表明卫星观测摆角不能超过最大限制,约束式(5)表明成像条带的宽度不能超过卫星幅宽,约束式(6)表明相邻成像条带之间要满足最小卫星姿态调整时间限制。

2 区域目标动态分解

区域目标分解问题可转化为卫星观测摆角的选择问题。卫星观测摆角决定了卫星成像条带的宽度和位置,合理安排调度时间段内的卫星观测摆角,可产生相邻的互不重叠的多个成像条带集合,达到区域目标分解的目的。敏捷卫星在单轨观测区域目标的过程中,卫星对地面成像的方位角与卫星运动方向一致,如图1所示,这样的成像特点导致区域目标的分割方向平行于卫星轨道方向,区域目标分割单元的宽度等于卫星幅宽。

2.1 动态幅宽

动态幅宽是指卫星幅宽随卫星观测摆角动态变化的情况。以 *Pleiades-1A* 卫星为例,卫星滚动和俯仰对卫星幅宽的影响如表1所示。

表1 滚动和俯仰对 *Pleiades-1A* 卫星幅宽影响
Tab. 1 Effects of Roll and Pitch on *Pleiades-1A* Satellite Swath

滚动 / (°)	幅宽/km				
	俯仰 0°	俯仰 10°	俯仰 20°	俯仰 30°	俯仰 40°
0	20	20.5	21.6	23.7	27.5
10	20.9	21.1	22.3	24.5	28.2
20	23.3	23.5	24.9	27.3	30.9
30	28.6	28.8	30.1	31.6	36.1
40	39.2	39.3	39.8	41.7	47.4

从表1可以看出,卫星的正视幅宽是20 km。当滚动角不变时,卫星幅宽随俯仰角的增大而增大;当俯仰角不变时,卫星幅宽同样随滚动角的增大而增大。而且从数据变化的幅度上可以看出,滚动角对卫星幅宽的影响更大。当滚动角和俯仰角都小于20°时,卫星幅宽小于24.9 km,相比正视幅宽,卫星此时的幅宽增幅约在20%以内,在卫星调度中可基本忽略其对区域目标分解的影响;若大于此范围,不能忽略其对区域目标分解的影响。

2.2 卫星姿态调整时间

由于卫星在相邻条带之间进行姿态调整,调整

之后卫星的滚动角变化不大,因此卫星姿态调整时间的计算主要与卫星对条带的俯仰角有关。如图 2 所示,点 P_j, P_{j+1} 分别是条带 j 的结束端点 E_j 和条带 $j+1$ 的开始端点 S_{j+1} 在星下点地面轨迹上的投影; O, Q 分别是 t 时刻星下点和卫星当前位置。设卫星摆动角速率为 ω , 单位为 $^\circ/s, D_{\min}(s)$ 为最小转换时间, 卫星在 t 时刻从条带 j 的结束端点摆动到条带 $j+1$ 的开始端点的最小姿态调整时间:

$$TraTime_{j,j+1} = \frac{Pitch_{j,j+1}}{\omega} + D_{\min} \quad (7)$$

式中,

$$Pitch_{j,j+1} = |Pitch_j - Pitch_{j+1}| \quad (8)$$

t 时刻卫星对条带的俯仰角 $Pitch_j$ 和 $Pitch_{j+1}$ 可利用 STK 软件计算。

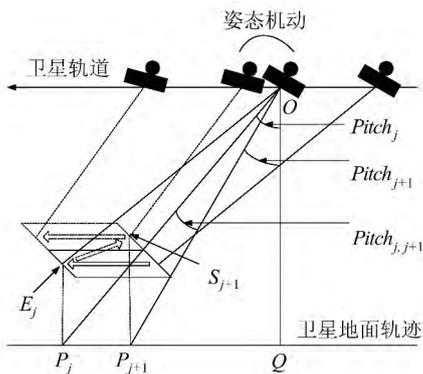


图 2 卫星姿态调整时间计算模型示意图
Fig. 2 Calculation Model of Satellite Attitude Transition Time

2.3 动态分解法

以文献[4]采用固定宽度的平行条带划分区域目标的静态分解法为基础,对其进行改进,提出一种以动态幅宽的平行条带分割区域目标的动态分解法。动态分解法的主要思想是以敏捷卫星单轨观测区域目标的开始时间(简称为观测点)为初始分割点,以卫星轨道方向为分割方向,以卫星幅宽为分割单元的宽度,自西向东对区域目标依次分割,分割过程中动态计算卫星观测摆角、卫星幅宽、分辨率、成像条带持续时间和卫星姿态调整时间。

动态分解法的伪代码如下:

算法 1: AreaCutIntoStrips(T_0)

输入:观测点 $T_0, ET \leq T_0 \leq LT$

输出: $Angles, Strips, TotalTime$;

1) 初始化 $Angles, t, Strips, UnCutArea, TotalTime$;

2) 利用 STK 计算 t 时刻卫星对未分割区域目标最西面顶点的观测摆角 ($Roll, Pitch, Yaw$);

3) 利用 STK 计算卫星幅宽 $Swath$ 和分辨率 $Resolution$;

4) 以此幅宽对未分割区域自西向东按轨道方向分割,得到成像条带 $Strip$ 的 $Point1, Point2$ 和 $Length$;

5) 计算条带 $Strip$ 的持续时间 Du 和有效面积 $Area$;

6) 利用 § 2.2 方法计算卫星从 $ST + Du$ 时刻开始,调姿到相邻条带端点的时间 $TraTime$;

7) 更新 $Angles, t, Strips, UnCutArea, TotalTime$;

8) 如果 $t > LT$ 或 $UnCutArea = \emptyset$, 返回; 否则转步骤 2)。

3 等步长搜索算法

在区域目标动态分解法中,观测点是输入参数。设计搜索算法采用如下思路:在所有观测点中,按等时间步长寻找最佳观测点即区域目标覆盖率最大并且卫星总耗时最小的观测点。

等步长搜索算法伪代码如算法 2 所示。

算法 2: StepSearch(Δt)

输入:时间步长 Δt , 一般可取 1 s

输出:最大区域目标覆盖率 $MaxCov$, 最优卫星观测摆角集合 $OptimalAngles$, 最优成像条带集合 $OptimalStrips$

1) 初始化 $MaxCov, OptimalAngles, OptimalStrips, t$;

2) 调用算法 1 AreaCutIntoStrips(t);

3) 计算并记录区域目标的覆盖率 $CovRate$;

4) 更新 t , 如果 $t > LT$, 返回; 否则转步骤 2);

5) 覆盖率最大且总耗费时间最小的方案为最优方案。

4 实验分析

仿真实验以海上侦察为背景,选取中国沿海两个具有代表性的区域目标,目标信息如表 2 所示。所选卫星为全球最新的 4 颗高分辨率敏捷卫

表 2 区域目标信息

Tab. 2 Area Target Information

目标	纬度/ $^\circ$	经度/ $^\circ$	面积/ km^2
目标 1	31.97, 31.76,	123.46, 125.62,	60 339.3
	29.2, 29.43	124.86, 122.7	
目标 2	25.58, 25.15,	121, 124,	121 761
	21.59, 22, 23.5	123, 120.4, 120.4	

星 GeoEye-1、WorldView-2、Pleiades-1A 和 SPOT-6,卫星轨道参数来源于 AGI 公司于 2013 年 1 月发布的全球卫星轨道数据库,其他主要参数如表 3 所示。仿真场景时间为[6 Feb 2013 01:

48:00.000 UTCG, 6 Feb 2013 03:14:00.000 UTCG],在此 86 min 的时间内,4 颗敏捷卫星依次对两个区域目标过境一次。

表 3 敏捷卫星主要参数

Tab.3 Main Parameters of Agile Imaging Satellites

卫星名称	GeoEye-1	WorldView-2	Pleiades-1A	SPOT-6
发射时间	2008 年	2009 年	2011 年	2012 年
成像幅宽/km	15.2	16.4	20	60
分辨率/m	0.41	0.46	0.7	2
偏离星下点/(°)	±60	±40	±60	±30
角速度/(°/s)	2.4	3.5	2.4	2.5

根据该算法,在仿真时间内计算 4 颗敏捷卫星对两个区域目标的最佳观测点,得到最优卫星观测摆角集合和最优分割方案。以 Pleiades-1A

卫星为例,计算得出的最优卫星观测摆角集合如表 4 所示,对应的区域目标最优分割方案如图 3 和图 4 所示。

表 4 Pleiades-1A 最优观测摆角集合

Tab.4 Sets of Pleiades-1A Optimal Observing Angles

观测目标	成像条带	开始时间	结束时间	持续时间/s	滚动角/(°)	俯仰角/(°)
目标 1	1	02:58:55	02:59:40	45	28.3	60
	2	02:59:43	03:00:28	45	33.9	56.9
	3	03:00:32	03:01:16	44	38.9	52.3
	4	03:01:21	03:02:05	44	43.3	45.7
目标 2	1	03:00:52	03:01:53	61	27.9	60
	2	03:01:58	03:02:58	60	34.3	55.8
	3	03:03:04	03:04:04	60	39.9	48.6
	4	03:04:24	03:05:24	60	44.8	33.7
	5	03:05:36	03:06:36	60	47.7	12.4
	6	03:06:50	03:07:50	60	49.2	-12.5

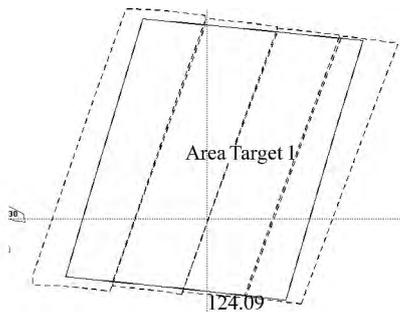


图 3 区域目标 1 最优分割方案

Fig.3 Optimal Cutting Scheme of Area Target 1

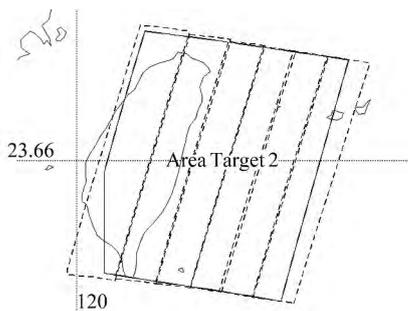


图 4 区域目标 2 最优分割方案

Fig.4 Optimal Cutting Scheme of Area Target 2

最后,利用 STK 的覆盖分析功能计算卫星对区域目标的覆盖率,计算结果主要与文献[4]对比,如表 5 所示。表 5 中平均姿态调整时间是最优卫星观测摆角集合中每次姿态调整时间的平均值。文献[2-3]中采用的是多颗非敏捷卫星调度算法,表 5 中仅列出其覆盖率结果供读者参考,其所选 4 颗卫星的幅宽分别为 11 km、70 km、60 km 和 60 km。

对比实验结果可知,我们所提出的方法在分辨率上与文献[4]中方法差不多,在覆盖率和平均姿态调整时间上均优于文献[4]中方法,而对目标 1 而言,本文方法比文献[4]方法在覆盖率上平均提高 17.6%,平均姿态调整时间平均减少 22.9%;对目标 2 而言,本文方法比文献[4]方法在覆盖率上平均提高 48.4%,平均姿态调整时间平均减少 27.5%。

本文提出的方法在以下两个方面比文献[4]方法有改进。首先,在区域目标分解上,由于考虑了卫星幅宽随卫星摆角变化的实际情况,计算出的卫星实际幅宽大于卫星的正视幅宽,导致分解后的单个成像条带更宽,能获得更大的覆盖面积。

其次,在姿态调整时间计算上,采用了更加合适的计算模型,姿态调整时间比文献[4]减少 20% 以上,在卫星对区域目标成像窗口长度一定的情况下,增加了卫星有效观测时间,从而提高了观测目标覆盖率。

采用该算法调度 GeoEye-1 或者 Pleiades-1A 卫星单星单轨观测区域目标的覆盖率甚至超过了文献[2-3]中 4 颗卫星联合观测该区域目标的覆盖率,一方面表明了本文算法的优越性,另一方面也说明了敏捷卫星的强大覆盖能力。

表 5 覆盖率、分辨率和平均姿态调整时间比较

Tab. 5 Comparisons of Coverage, Resolution and Average Attitude Transition Time

采用方法	所选卫星	观测目标覆盖率/%		分辨率/m		平均姿态调整时间/s	
		目标 1	目标 2	目标 1	目标 2	目标 1	目标 2
文献[4]方法	GeoEye-1	80.03	40.40	0.9	1.1	13	17
本文方法	GeoEye-1	100	80.16	1.0	1.3	8.9	8.4
文献[4]方法	WorldView-2	39.35	21.32	0.6	0.6	9	11
本文方法	WorldView-2	45.31	26.13	0.7	0.7	8.3	9.7
文献[4]方法	Pleiades-1A	87.57	66.5	1.8	2.2	12	16
本文方法	Pleiades-1A	100	100	2.0	2.6	4.7	9.4
文献[4]方法	SPOT-6	86.02	59.64	2.6	3	12	16
本文方法	SPOT-6	100	73	2.8	3.2	13	15
文献[2]方法	IKONOS-2, IRS-1D, SPOT-4, SPOT-5	59.11	60.32	-	-	-	-
文献[3]方法	IKONOS-2, IRS-1D, SPOT-4, SPOT-5	98.69	74.52	-	-	-	-

5 结 语

研究面向区域目标的敏捷卫星单轨调度问题,对提升应急条件下高分图像的获取能力具有十分重要的意义。首先,对该问题进行了描述和建模;其次,针对区域目标分解,在分析研究了现有的采用固定宽度的平行条带划分区域目标的静态分解法的基础上,提出以动态幅宽的平行条带分割区域目标的动态分解法,并给出了卫星最小姿态调整时间计算模型;然后,设计了求解区域目标最佳观测点的等步长搜索算法;最后,通过实验分析验证了本文方法能有效地解决面向区域目标的敏捷卫星单轨调度问题。下一步的研究方向是敏捷卫星多轨调度和多颗敏捷卫星协同调度问题。

参 考 文 献

- [1] Zhu Jianghan, Li Xi, Mao Chulong, et al. Elevations Selection Approach of Area Target Observation Task Using Satellites Resource[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(10): 868-870(祝江汉,李曦,毛赤龙,等.多卫星区域观测任务的侧摆方案优化方法研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2006, 31(10): 868-870)
- [2] Ruan Qiming. Research on Photo-reconnaissance Satellites Scheduling Problem for Area Targets Observation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 (阮启明.面向区域目标

的成像侦察卫星调度问题研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006)

- [3] Liu Xiaodong, Chen Yingwu, Long Yunjun. A MapX-based Preprocessing Approach for Multi-satellite Cooperative Observation Towards Area Target[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(12): 2 269-2 275 (刘晓东,陈英武,龙运军.基于 MapX 的多星协同对区域目标观测的预处理方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(12): 2 269-2 275)
- [4] Lemaître M, Verfaillie G, Jouhaud F, et al. Selecting and Scheduling Observations of Agile Satellites[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2002, 6(5): 367-381
- [5] 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
- [6] Guo Hao, Wu Guohua, Qiu Dishan. Intensive Task Clustering Method for Agile Imaging Satellites[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 931-935 (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)
- [7] 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(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)

(下转第 922 页)

A Method of Combing the Model of the Global Quadtree Index with Local KD-tree for Massive Airborne LiDAR Point Cloud Data Organization

YANG Jiansi¹

¹ School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430070, China

Abstract: This paper proposed a kind of hybrid index structure for organizing airborne LiDAR point cloud data to solve the problem of large data organization and visualization, which combines the global quadtree with local KD-tree. The global quadtree is used to index the upper level of point cloud data in global area. The KD-tree is used to index the data in a leaf of quadtree. This method not only can organize massive point cloud data, but also guarantee the indexing efficiency. To test our method, experiments using 1 billion points of Dunhuang area are conducted, which reach a 30 frame rate visualization speed, providing a primary step for large point cloud visualization.

Key words: LiDAR; point clouds; quadtree; KD-tree; hybrid index structure

Author: YANG Jiansi, PhD, associate professor. Her research interests include computer graphics, virtual reality and 3D city models. E-mail: yangjiansi6877@hotmail.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 61331016; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 170325.

.....
(上接第 905 页)

An Improved Single-orbit Scheduling Method for Agile Imaging Satellite Towards Area Target

ZHANG Dengyi¹ GUO Lei¹ WANG Qian¹ ZOU Hua¹

¹ School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Traditional satellite scheduling method has difficulties to meet the need for timely response in emergency observation missions. In this paper, an improved single-orbit scheduling method is proposed for agile imaging satellites as a tentative solution. This method first dynamically calculates the observation angle, swath, and duration of the agile imaging satellite. Cutting of area targets are then performed using parallel strip, followed by the acquisition of minimum attitude transition time. A specialized step-size search algorithm is employed to find the best observation point towards the area target. In our experiments, the STK simulation scenario is constructed with four agile imaging satellites. The simulation results show that the new method improves the coverage of area target while reduces the image acquisition time.

Key words: agile imaging satellite; single-orbit scheduling; area target; dynamic decomposition; STK

First author: ZHANG Dengyi, professor, specializes in aerospace information simulation and satellite scheduling. E-mail: dyzhangwhu@163.com

Corresponding author: GUO Lei, PhD candidate. E-mail: guolei@whu.edu.cn

Foundation support: The Defense Advance Research Foundation of China, No. GFZX0404010502.