

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.007

## 基于双向锁定规则的多星任务规划算法

余玉成, 杨志, 王晓宇, 王丹丹, 杨钦宁

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要:**星座组网系统是未来的发展趋势, 针对星座系统的多星任务规划求解问题会随着卫星数量及目标数量的增加其复杂度也随几何增长。考虑到卫星姿态机动、电源能量等多条件约束条件, 本文建立一种基于规则的卫星及目标双向锁定算法, 对中国领土及周边地区 50 个点目标进行规划和仿真验证。仿真结果表明该算法能够满足全目标覆盖率 100%, 同时能达到较好重访效能。本文算法能支撑评估卫星星座体系方案优化, 同时为后续多星多约束条件任务规划问题提供了技术基础和可行解。

**关键词:**星座系统; 任务规划; 约束条件; 基于规则

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)S-0043-05

### A Mission Planning Algorithm for Multi-satellites Based on Bidirectional Locking Rules

SHE Yucheng, YANG Zhi, WANG Xiaoyu, WANG Dandan, YANG Qinming

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** Constellation networking systems are the trend of future. The planning and solving for constellation systems will increase with the increase of the number of satellites and targets, and its complexity will also increase by geometric ratios. Considering the multiple constraints such as satellite attitude maneuver and power supply energy, a rule-based bidirectional satellite and target locking algorithm is established to plan and simulate 50 point targets in China's territory and surrounding areas. Simulation results show that the algorithm can meet the full target coverage of 100% and achieve a good revisit efficiency. This algorithm can support the evaluation of satellite constellation system optimization scheme, and provides a technical basis and feasible solution for the subsequent multi-satellite and multi-constraint task planning problem.

**Key words:** constellation system; mission planning; constraints condition; rule-based

随着卫星成像技术不断发展, 卫星数量和能力都出现了质的提升, 在轨卫星数据也呈现几何增长, 用户对卫星观测的要求也更加复杂多变, 很多任务无法通过单星独立完成, 针对单星的任务规划方式已逐渐不能满足复杂多变的用户需求<sup>[1-2]</sup>。为了提高卫星系统的整体效益, 高效利用有限的在轨资源, 卫星星座系统任务规划应运而生<sup>[3-5]</sup>。

卫星星座系统任务规划是一个多星多载荷多约束条件的复杂组合优化问题<sup>[6-8]</sup>, 它极大地增加了约束空间的复杂度, 对求解的优化算法带来了巨

大的挑战。通过卫星星座系统任务规划与仿真分析, 可以对复杂卫星体系的任务执行情况进行预报分析, 从时空覆盖性能、载荷能力、任务完成度等方面形成量化分析结果, 该结果可以用来支撑卫星体系方案优化, 允许用户回到星座体系优化设计阶段开展迭代的方案修正。

本文主要研究卫星星座系统的任务规划与调度问题, 建立基于规则的卫星及目标双向锁定算法的多约束(姿态机动时间、电源能量和存储容量等)条件下的任务规划数学优化模型, 并进行仿真实验

收稿日期: 2022-06-05; 修订日期: 2022-07-30

通信作者: 余玉成, 男, 高级工程师, E-mail: yushensyc@163.com。

引用格式: 余玉成, 杨志, 王晓宇, 等. 基于双向锁定规则的多星任务规划算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 43-47. SHE Yucheng, YANG Zhi, WANG Xiaoyu, et al. A mission planning algorithm for multi-satellites based on bidirectional locking rules[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 43-47.

和任务完成率分析,最后给出了算法的结论,为后续的研究工作提供技术研究价值。

## 1 问题描述与建模

### 1.1 多星多载荷多任务分配问题

任务规划与分配问题可以简单理解为:将包含有任务类型、目标优先级、观测频次和空间分辨率等用户的任务需求在卫星可观测的时间窗范围内考虑有限的卫星资源(包含电源能量、存储容量、姿态机动和俯仰视角范围等)进行统一的任务规划,将各成像任务依据规划结果合理安排到合适的卫星,以执行完成成像观测任务。

整个任务规划与分配过程可以表示为1个四元组

$$M = \langle A, S, T, F \rangle \quad (1)$$

式中  $A$  为所有卫星集合,  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$ ,  $sn$  表示所有卫星的总数量,其中  $A_i$  代表单颗卫星的属性,  $A_i = \langle S_i, L_i, P_i, R_i, SSR_i, POW_i \rangle$ ,  $S_i$  表示第  $i$  号卫星  $L_i$  表示卫星  $s_i$  的载荷类型,  $P_i$  表示卫星  $s_i$  的俯仰角范围,  $R_i$  表示卫星  $s_i$  的测摆角范围,  $SSR_i$  表示卫星  $s_i$  的最大存储容量,  $POW_i$  表示卫星  $s_i$  的电源约束。

$S = \langle TG_{ij}, ST_{ij}, ET_{ij}, DT_{ij}, P_{ij}, Y_{ij}, R_{ij}, SSR_{ij}, POW_{ij} \rangle$ , 其中  $TG_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到第  $j$  号目标  $TG_j$ ,  $ST_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测目标  $TG_j$  的开始时间,  $ET_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的结束时间,  $DT_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的连续时长,  $P_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的俯仰角,  $Y_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的偏航角,  $R_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的测摆角,  $SSR_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的所拥有的存储容量,  $POW_{ij}$  表示卫星  $s_i$  观测到目标  $TG_j$  的所拥有的电源容量。

$T$  为所有待观测任务集合,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{NT}\}$ ,  $NT$  为所有观测任务总数。每一个观测任务  $t_k = \langle TL_k, TS_k, LS_k, LD_k, LE_k, TG_k \rangle$ ,  $TL_k$  代表观测任务序号  $t_k$  标识,  $TS_k$  表示可执行观测任务  $t_k$  的单颗卫星,  $LS_k$  和  $LE_k$  分别表示观测任务  $t_k$  可见时间窗的开始和结束时间,  $LD_k$  表示观测任务  $t_k$  可见时间窗的可见时长,  $TG_k$  表示观测任务  $t_k$  中被观测的目标。其中  $TG = \{tar_1, tar_2, \dots, tar_{N_{tar}}\}$ ,  $TG$  表示所有被观测目标的属性集合,  $N_{tar}$  为所有观测目标总数,  $tar_j = \langle TG_j, LAT_j, LNG_j, LEV_j \rangle$ ,  $TG_j$  代表目标序号标识  $tar_j$ ,  $LAT_j$  表示目标  $tar_j$  的纬度信息,  $LNG_j$  表示目标  $tar_j$  的经度信息,  $LEV_j$  表示目标  $tar_j$  的优先级信息。  $F$  为卫星星座执行所

有观测任务最终的最佳任务规划分配方案。

### 1.2 多约束条件的任务规划

#### 1.2.1 决策变量

多星不同载荷多任务的任务规划面临着众多约束条件,整个任务规划模型的核心决策变量为  $V = \{G_i, S_i, P_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, sn$ , 式中  $G_i$ 、 $S_i$ 、 $P_i$  为布尔变量,分别表示卫星  $s_i$  上的存储容量状态、姿态机动时间状态和电源能量状态。只有当  $G_i = S_i = P_i = 1$  时,表示卫星  $s_i$  状态可执行观测任务。

#### 1.2.2 约束条件

##### (1) 存储容量约束

卫星  $s_i$  在执行观测任务前需要检测是否满足存储容量约束,即

$$CSR_j \leq SSR_j \leq SSR_{\max} \quad (2)$$

式中:  $CSR_j$  代表卫星  $s_i$  在观测任务  $t_j$  所消耗的存储器容量;  $SSR_j$  代表卫星  $s_i$  在观测任务  $t_j$  之前星上拥有的可存储容量;  $SSR_{\max}$  代表卫星  $s_i$  最大存储容量。

##### (2) 姿态机动时间约束

执行任务时敏捷卫星  $s_i$  的侧摆角和俯仰角的姿态机动调整时间需在两个任务时间间隔内完成,即两个观测任务之间需满足

$$\begin{aligned} |\text{pitch}_{j+1} - \text{pitch}_j| &\leq V_p |st_{j+1} - et_j| \\ |\text{roll}_{j+1} - \text{roll}_j| &\leq V_r |st_{j+1} - et_j| \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $V_p$  代表卫星在观测任务  $t_j$  时的姿态机动俯仰角速度;  $V_r$  代表卫星在观测任务  $t_j$  时的姿态机动翻滚角速度。本文中卫星姿态机动约束将简化为时间约束为 3 min。

##### (3) 电源能量约束

卫星在执行成像观测任务  $t_j$  时需要满足电源能量约束,即

$$\frac{\text{ap}_{E_t} |ELe_{j+1} - ELe_j|}{V_p} + \frac{\text{ap}_{A_t} |ELe_{j+1} - ELe_j|}{V_r} \leq POW_j \quad (4)$$

式中  $\text{ap}_{E_t}$  和  $\text{ap}_{A_t}$  代表敏捷卫星侧摆及俯仰姿态调整时,单位时间内所消耗的能量。本文中对电源能量约束简化为卫星单轨时间内开机时长不超过 2 min。

#### 1.2.3 最大目标收益

##### (1) 目标覆盖率最大化

任务规划与分配结果应该满足区域内目标覆盖最大化甚至全覆盖,该覆盖率函数可表示为

$$f_1 = \text{tch}_j / N_{tar} \quad (5)$$

式中  $\text{tch}_j$  表示目标  $tar_j$  是否被卫星成像观测。

##### (2) 平均重访时间最小化

在目标覆盖率最大化的基础上,还得考虑卫星

观测的频次,重访时间越短单位时间内观测的次数越多,卫星的效能价值就越高。平均重访时间目标函数可以表示为

$$f_2 = (N_{tar} \times sh) / \sum_{j=1}^{N_{tar}} tnh_j \quad (6)$$

式中:  $tnh_j$  表示目标  $tar_j$  被卫星成像观测的次数,  $sh$  表示仿真时长。

## 2 多星任务分配求解算法

基于多星多载荷多约束的任务规划问题中变量规模巨大,一般的优化算法求解过程会比较困难,对于全局寻优的优化算法中蚁群算法<sup>[9]</sup>以及遗传算法<sup>[10-11]</sup>目前都已经在单星卫星任务规划中获得了优异的应用成果。而对于多星任务规划,尤其是大规模任务规划问题的卫星星座系统任务规划,容易因单星任务处理子问题采用单星全局最优解而陷入多星的局部最优解的可能,可能导致本该被安排上的任务无法被安排,影响任务规划的效率,进而降低整个多星系统的运行效率。针对这一问

题,本文提出采用基于规则的卫星及目标双向锁定的多星任务分配算法。

通过对问题的分析,在未执行任务规划操作之前,很难精确地判定某一任务分配方法的优劣。若希望得到任务分配的最优解,通常需要结合任务规划过程并进行多次迭代来实现。然而,星上环境复杂多变,对于算法的实时性要求也较高,基于静态的信息得到的最优分配方案也不一定满足星上未来的不确定性要求,故本文提出了基于规则的卫星及目标双向锁定的多星任务分配算法。

该算法的主要思想是:在任意时刻,将所有满足时间窗要求的任务加入任务待规划列表序列中,在考虑到以上决策变量约束的条件下按照任务目标优先级及卫星实时可观测目标数量的策略实时更新卫星及目标的锁定状态,并逐一将任务加入每颗被锁定卫星的待规划任务中,直到任务待规划列表中所有待分配任务都分配完。

根据以上分析,算法流程图如图1所示。

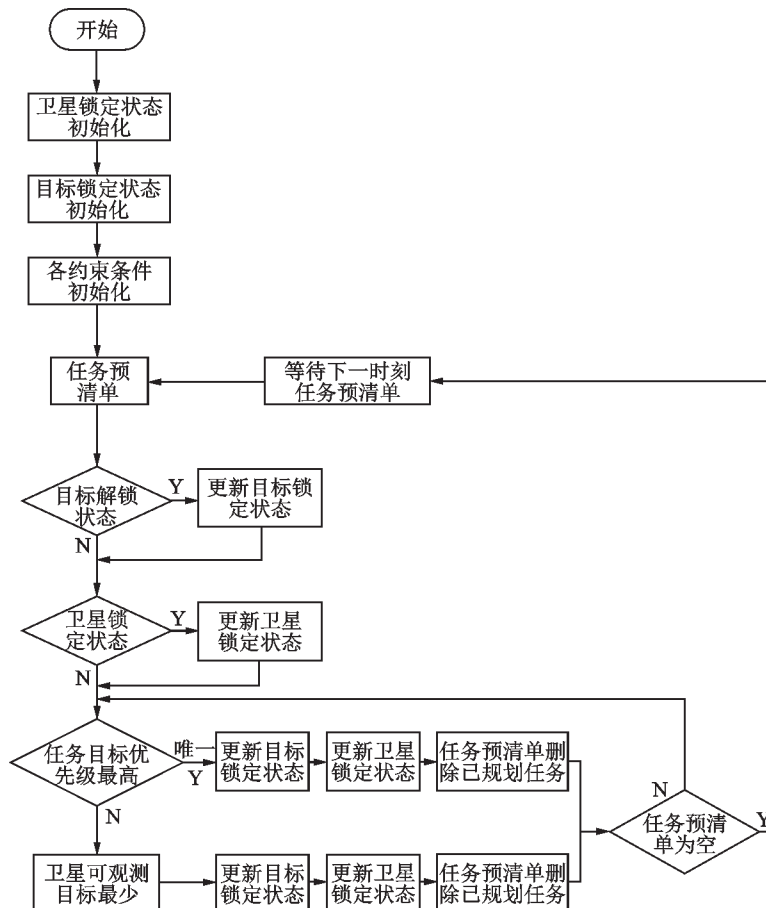


图1 基于规则的卫星及目标双向锁定算法流程图

Fig.1 Flow chart of satellite and target bidirectional locking algorithm based on rules

以上算法不能保证每一次的任务规划结果都是全局最优的,但是本算法能够以较少的时间消

耗得到一个合理的规划方案,能适应星上环境复杂多变的不确定性要求,进而有利于后续任务规

划的进行,满足卫星星座系统任务规划系统整体的要求。

### 3 仿真实验

#### 3.1 场景描述

本实验任务场景拟对中国领土及周边地区进行普查,并对普查区域内具有一定数量的点目标执行成像任务。实验仿真的星座由60颗SAR卫星和40颗光学卫星组成,均匀分布在500 km的20个轨道面,每个轨道面有3颗SAR和2颗光学卫星。通过任务规划分配方案并由上述星座对区域内目标执行成像指令,检验任务规划分配方案的合理性及星座的重访效能。整个仿真场景以两轨3小时为周期,观测点目标共50个,其地理位置如图2所示。其中目标Target 1~Target 10设置优先级最高为5,Target 11~Target 25优先级为3,其他为1。



图2 观测目标点分布

Fig.2 Distribution of observation target points

#### 3.2 仿真结果及分析

规划结果见表1,在仿真时长2021/8/1 12:00:00~2021/8/1 15:00:00可见时间窗内满足目标函数和约束条件下完成规划任务470次。由图3可知,任务目标50个全部被规划,任务覆盖完成度 $f_1$ 为100%,其中最高优先级任务平均被观测15.7次,所有目标平均重访时间 $f_2$ 为19.15 min。

表1 多星任务分配算法规划结果

Table 1 Planning results of multi-satellite task allocation algorithm

序号	任务目标	卫星编号	起始时间	结束时间	任务优先级
1	Target10	SAR081	2021/8/1 12:00:10	2021/8/1 12:00:15	5
2	Target26	SAR064	2021/8/1 12:00:47	2021/8/1 12:00:52	1
3	Target12	OPT023	2021/8/1 12:01:29	2021/8/1 12:01:34	3
4	Target3	OPT031	2021/8/1 12:02:18	2021/8/1 12:02:23	5
5	Target40	SAR071	2021/8/1 12:02:50	2021/8/1 12:02:55	1
6	Target29	SAR085	2021/8/1 12:02:50	2021/8/1 12:02:55	1
7	Target47	SAR095	2021/8/1 12:03:28	2021/8/1 12:03:33	1
8	Target48	SAR042	2021/8/1 12:03:41	2021/8/1 12:03:46	1
9	Target37	SAR084	2021/8/1 12:03:50	2021/8/1 12:03:55	1
10	Target1	SAR081	2021/8/1 12:04:09	2021/8/1 12:04:14	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
469	Target40	OPT033	2021/8/1 14:59:23	2021/8/1 14:59:28	1
470	Target13	SAR087	2021/8/1 14:59:54	2021/8/1 14:59:59	3

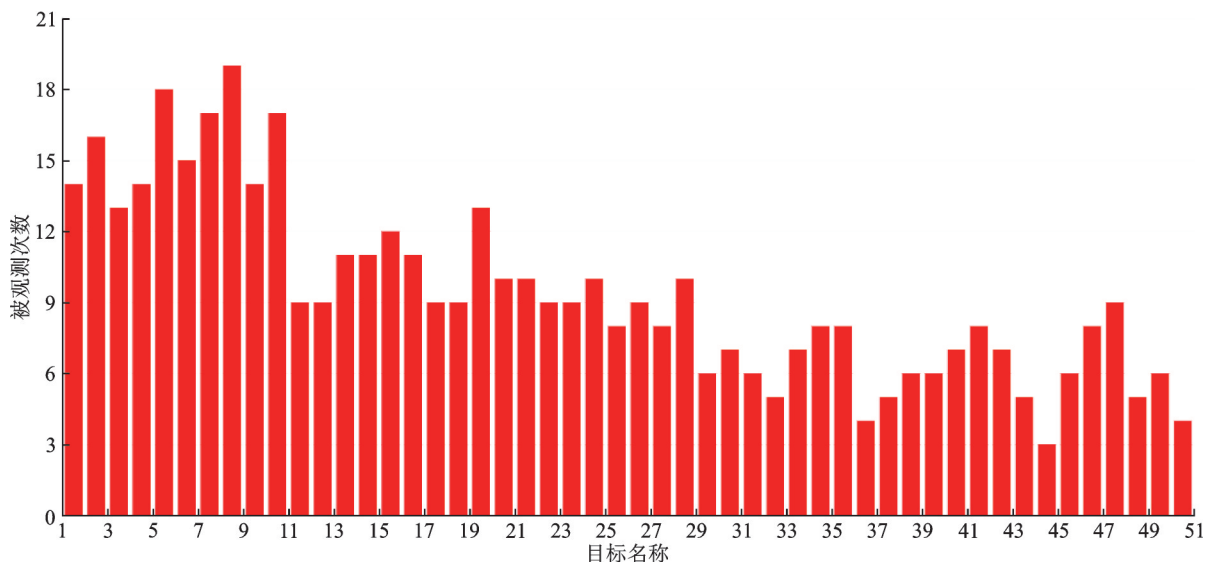


图3 点目标观测次数

Fig.3 Observation times of point target



## 4 结 论

本文主要研究卫星星座系统的任务规划与调度问题,考虑到卫星姿态机动、电源能量等多条件约束条件,建立了一种基于规则的卫星及目标双向锁定算法,通过对上述场景进行规划和仿真实验验证了任务规划算法的合理性,实现全目标覆盖率100%,满足高优先级目标能够高频次成像,同时整体能达到较好重访效能。本文算法不仅能为多星、多约束条件任务规划问题提供了技术基础和可行解,同时还能支撑评估卫星星座体系方案及优化为后续星座体系优化设计阶段提供量化分析。

### 参考文献:

- [1] 廉振宇,谭跃进,贺仁杰,等. 高分对地观测系统通用任务规划框架设计[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(5): 981-989.  
LIAN Zhenyu, TAN Yuejin, HE Renjie, et al. Design of general mission planning framework for high resolution earth observation system[J]. Computer Integration Manufacturing System, 2013, 19(5): 981-989.
- [2] 邓宝松,孟志鹏,义余江,等. 对地观测卫星任务规划研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 130-139.  
DENG Baosong, MENG Zhipeng, YI Yujiang, et al. Study on mission planning of earth observation satellite [J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(11): 130-139.
- [3] 姜维,郝会成,李一军. 对地观测卫星任务规划问题研究述评[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(9): 1878-1885.  
JIANG Wei, HAO Huicheng, LI Yijun. Review of task scheduling research for the earth observing satellites[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(9): 1878-1885.
- [4] 郭玉华. 多类型对地观测卫星联合任务规划关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.  
GUO Yuhua. The study on key technologies of multiple types of earth observing satellites united scheduling [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [5] 刘嵩. 集成任务和动作的敏捷对地观测卫星自主规划方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 7-15.  
LIU Song. Autonomous planning for agile earth observation satellite integrating tasks and actions[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 7-15.
- [6] 张英恩. 多成像卫星自主任务规划模型与算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 4-10.  
ZHANG Ying'en. Research on autonomous mission planning model and algorithm for multi imaging satellites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 4-10.
- [7] BUNKHEILA F, ORTORE E, CIRCI C. A new algorithm for agile satellite-based acquisition operations [J]. Acta Astronautica, 2016, 123: 121-128.
- [8] 王凌峰,陈兆荣,陈浩,等. 一种基于多目标优化的卫星周期性持续观测任务规划方法[J]. 小型微型计算机系统, 2018, 39(6): 1366-1371.  
WANG Lingfeng, CHEN Zhaorong, CHEN Hao, et al. Method of satellite periodic continuous observing task scheduling based on multi-objective optimization [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2018, 39(6): 1366-1371.
- [9] 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]. System Engineering Theory & Practice, 2014, 34(3): 793-801.
- [10] 王海蛟,贺欢,杨震. 敏捷成像卫星调度的改进量子遗传算法[J]. 宇航学报, 2018, 39(11): 1266-1274.  
WANG Haijiao, HE Huan, YANG Zhen. Scheduling of agile satellites based on an improved quantum genetic algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(11): 1266-1274.
- [11] LI Y Q, WANG R X, LIU Y, et al. Satellite range scheduling with the priority constrain: An improved genetic algorithm using a station id encoding method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3): 789-803.

(编辑:刘彦东)