

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201705119

星群观测任务自主规划的星地联合运行机制

张 超¹,李玉庆²,冯小恩²,唐梦莹²,江飞龙²,王日新²,徐敏强²

(1. 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室(中国电子科技集团公司第五十四研究所),石家庄 050081;
2.哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心,哈尔滨 150080)

摘 要: 对地观测卫星经常遇到发现新目标、偶发故障不能执行原观测任务等非预期情况,为了提高观测卫星的运行效率,解决在缺乏地面测控支持的情况下非预期观测任务的快速响应问题,需要设计面向自主任务规划的星地联合运行机制.首先针对遥感卫星星群的自主运行和任务规划问题,将其划分为地面规划和星上自主规划两部分,进而充分考虑地面和星上的资源特点和任务需求特点,提出了一种星地联合进行任务规划的运行机制,并详细设计了运行流程.通过自行开发的分布式仿真演示软件的仿真运行表明:该运行机制能够在星上自主任务规划和地面规划之间进行有效的协调、配合,既能够发挥地面计算资源优势、体现控制意图,又能充分利用星上计算的实时性和灵活性,对非预期任务进行快速响应;解决了地面对非预期观测任务响应不及时、星上计算资源受限、星地规划配合等问题,能够有效提高遥感卫星对非预期观测任务的响应能力.

关键词: 遥感卫星;运行机制;自主运行;规划与调度;快速响应

中图分类号: V55 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2018)04-0056-06

A ground-onboard joint operation mechanism for the autonomous mission planning of imaging satellite cluster

ZHANG Chao¹, LI Yuqing², FENG Xiaoen², TANG Mengying², JIANG Feilong², WANG Rixin², XU Minqiang²

(1. Key Laboratory of Aerospace Information Applications(CETC), Shijiazhuang 050081, China; 2.Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Earth observation satellite often encounters unexpected situations such as finding a new target, failing to perform the original observation tasks. To improve the operation efficiency of observation satellite, and make a rapid response to the unexpected observation tasks in the absence of ground supports, researchers need to design ground-onboard joint operation mechanism for the autonomous mission planning. Firstly, aiming at the autonomous operation of imaging satellite cluster, this paper divides the problem into two parts: the ground task planning and onboard autonomous planning. Furthermore, based on full consideration of the resources of ground station and satellite, and the requirments of observation task planning, a ground-onboard joint operation mechanism of mission planning is proposed, together with the detailed operation process. The result of the distributed simulation software shows that the mechanism can carry out an effective coordination between the on-board autonomous mission planning and the ground planning. It can reflect the controller's intention, taking advantage of ground computing ability and onboard real-time flexibility to rapid response on unexpected tasks. It can solve the problem of response delay on ground to the unexpected observation tasks, limited computing resources onboard and the cooperation between onboard planning and ground planning. The research achievements can effectively improve the response ability of the remote sensing satellite to the unexpected observation mission.

Keywords: imaging satellite cluster; operation mechanism; autonomous; planning and scheduling; rapid response

遥感卫星是获取地面敏感目标信息的重要途径和手段,世界各主要航天机构均将其列为重点研究和建设对象.其中,观测任务的规划调度技术是支持遥感卫星进行有效观测的核心技术之一.目前,卫星

遥感技术正逐渐由单星观测到多星观测、粗放式管理到精细化管理的趋势发展.这在传统的地面管控卫星运行的模式下,对星地测控通信的实时支持能力提出了愈来愈高的要求.

但是,由于卫星的轨道特点,以及地面测控站建设的限制条件,很难实现对遥感卫星的实时地面测控支持.尤其是卫星处于境外时,能够利用的地面测控条件非常有限.同时,在境外非测控区存在为数众多的敏感目标观测任务,而且不可避免的存在新目标出现、目标消失、执行故障无法观测等非预期情

收稿日期: 2017-05-22

基金项目: 中国电子科技集团公司航天信息应用技术重点实验室开放基金(EX166290023);深空探测着陆与返回控制技术国防重点学科实验室开放基金(HIT.KLOF.2016.077, HIT.KLOF.2017.076)

作者简介: 张 超(1987—),男,博士研究生,工程师;
徐敏强(1960—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李玉庆,bradley@hit.edu.cn

况.为了增强非测控区遥感卫星对此类非预期情况的快速响应能力,提高卫星遥感资源的利用效率,要求遥感卫星具备自主任务规划的能力,且能够实现多颗卫星的协同观测,以充分发挥不同载荷的特点和能力.随着对卫星运行智能化、精细化的要求程度不断提高,对遥感卫星自主任务规划能力的需求也日益凸显^[1-2].

针对上述需求,国内外的学者^[3-4]结合不同背景进行了研究.例如,Verfaillie 等^[5]提出了一种动态规划算法,可用于卫星在轨进行自主任务规划;Chien 等^[6]对自主任务规划问题进行了深入研究,设计并实现了 EO-1 卫星的自主规划系统;Tangpattanukul 等^[7]设计了一种局部搜索启发式,用于地球遥感卫星的任务规划;陈浩等^[8-9]对电磁遥感卫星的规划调度算法进行了较为广泛的研究;李军等^[10]针对遥感卫星观测问题,提出了一种协同任务规划服务模型;李菊芳等^[11-12]研究了禁忌搜索和智能优化方法求解卫星观测任务的规划调度算法.

通过对目前研究成果的分析可见,多数研究是围绕求解方法或体系结构进行^[13-15],较少涉及自主运行机制和流程的设计.而实际上,对于遥感卫星星群的自主协同观测问题而言,自主运行机制和流程作为一项基础性技术问题,对系统整体的运行效果发挥着重要作用和影响.设计面向自主任务规划的星地联合运行机制的目的,是解决非预期目标的快速响应和观测问题,尤其是在缺乏地面测控支持的情况下该类情况的处理问题.该联合运行机制实现的技术基础,包括载荷自主图像分析、星上自主计算、星间网络通信等要素.需要指出,遥感星群的自主运行不宜完全依赖星上计算,究其原因:1)受星上计算能力限制,需要在计算时间和优化能力之间进行取舍;2)完全的自主观测难以体现某些特定的人为意图.因此,需要在星上自主任务规划和地面规划之间设计行之有效的协调、配合机制,使得系统整体既能够发挥地面计算资源优势、体现控制意图,又能充分利用星上计算的实时性和灵活性,对非预期任务进行快速响应.

本文即针对上述不足,研究面向遥感卫星星群的自主任务规划问题,设计一种包含地面静态和动态规划、星上自主规划的自主运行机制,并详细设计其运行流程.

1 遥感卫星任务规划概述

对于遥感卫星而言,其观测目标可以是点目标(观测目标的经纬度)或区域目标(由多个经纬度

坐标定义的多边形区域),对于有侧摆能力的卫星,要考虑其侧摆对观测的影响,其观测过程如图 1 所示.

传统的观测任务规划包括观测任务接收、多方会商、任务分解、任务规划、计划编制、指令编制、执行监控等多个环节,如图 2 所示.本文主要解决在引入在轨自主任务规划后,星上自主任务规划系统和地面任务规划系统的运行机制和运行流程问题.

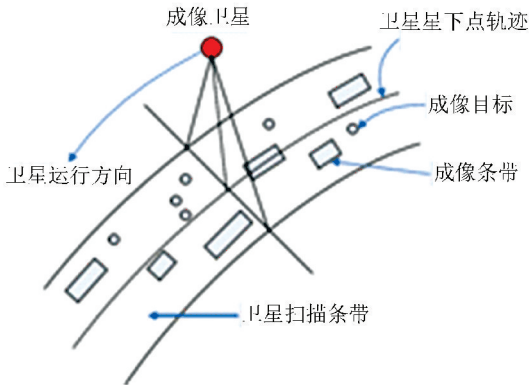


图 1 敏捷卫星观测示意

Fig.1 Agile satellite observations

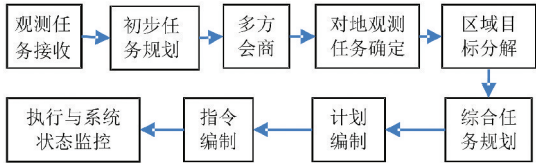


图 2 观测任务规划流程示意

Fig.2 The process of observation planning

2 自主任务规划的问题分解

虽然引入星上在轨自主任务规划能够提高对非预期任务的应急响应能力,但地面任务规划仍具有重要地位.这主要是由于通常地面具备较完善的计算资源,有利于对观测任务进行更加高效合理的优化.另外还存在不可忽视的人为意图因素,因此完全放弃地面任务规划是不合适的.所以,较为合理的自主运行机制应当包括星上自主任务规划和地面任务规划两个部分.

本文综合考虑卫星星群运行的实际情况及自主运行的需求,按照卫星常规运行管理和响应非预期目标管理两种功能,将该问题分解为如下子问题(如图 3 所示).图中:1)面向长期管理的地面集中式星群静态协同任务规划;2)面向非预期目标重规划的地面集中式星群动态协同任务规划;3)面向快速响应非预期目标的星群自主动态协同任务规划.

对前两项内容,可以充分发挥地面的计算能力优势,采取智能优化等算法进行求解;对第 3 项内

容,可根据星上计算资源配置情况,采取基于启发式搜索、分布式优化等任务规划方法进行求解。

存在星间通信链路,构成分布式对地观测系统,如图 4 所示。

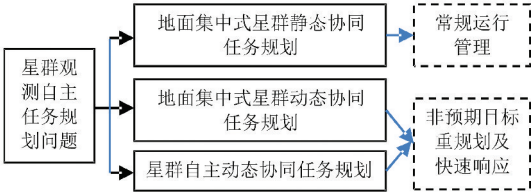


图 3 星群观测自主任务规划问题分解

Fig.3 The decomposition of cluster autonomous planning

3 星群自主任务规划的运行机制

考虑遥感卫星具备自主运行能力,并且为了能够支持多颗卫星之间的任务协同,假设各卫星之间

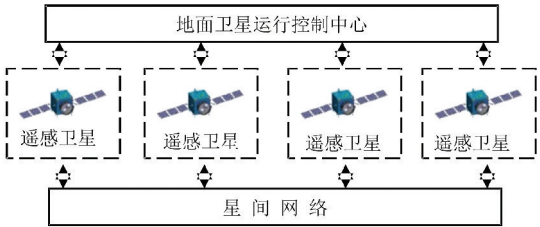


图 4 多星协同任务规划的系统结构示意图

Fig.4 The system structure for cluster collaborative planning

在上述系统结构的框架下,初步设计星群自主运行机制和流程,如图 5、6 所示。

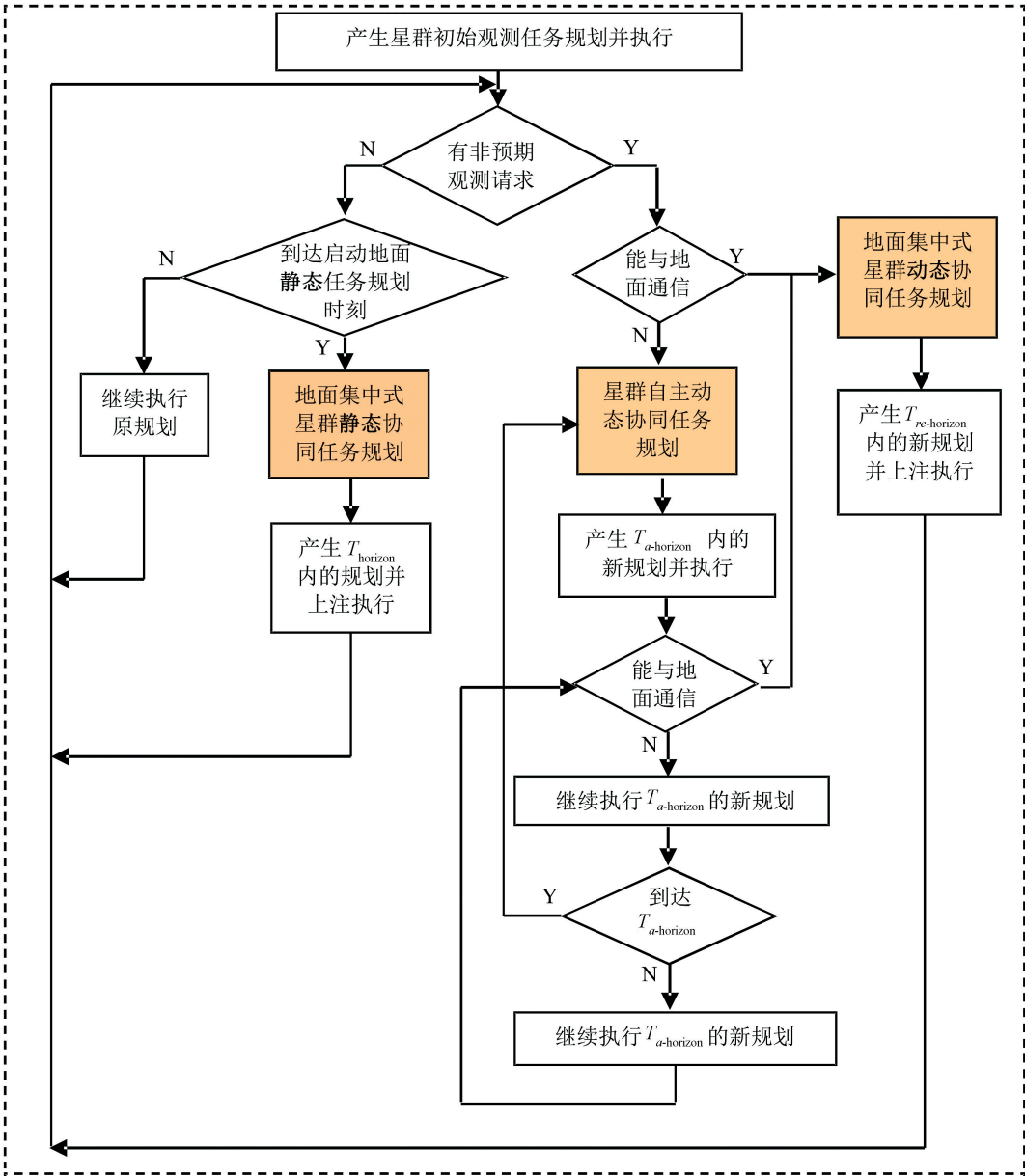


图 5 星群自主运行机制及流程示意

Fig.5 The operating mechanism and the process for the autonomous satellite cluster

在初始阶段通过统一的地面集中式规划为每颗卫星产生一个初始任务计划.任务开始执行后,正常情况下,各卫星按照既定规划执行观测任务.当有突发情况,产生非预期观测请求后,首先判断此时是否能获得地面通信支持:1)若存在可用星地链路,则由地面进行星群动态协同任务规划(即重规划);2)否则由各星进行分布式自主动态协同任务规划.具体的运行流程如下.

Step1 设初始规划区间的起始时间为 t_{start} , 结束时间为 t_{end} , 规划区间长度为 T_{horizon} , 在 $t_{\text{start}} - T_{\text{prePla}}$ 时刻启动初始观测任务规划,并在 t_{start} 前上注执行.

Step2 执行过程中判断是否有非预期观测任务,若有,转 Step5,否则继续执行.

Step3 判断是否到达下一个任务规划时刻 $t_{\text{end}} - T_{\text{prePla}}$,若是,转 Step4 启动下一个规划区间的任务规划;若否,转 Step2 继续执行.

Step4 启动地面集中式星群静态协同任务规划,进行下一个规划区间的任务规划并上注执行,转 Step2.

Step5 判断能否与地面通信,若是,转 Step6 进行地面集中式星群动态协同任务规划;若否,转 Step7 进行星群自主动态协同任务规划.

Step6 设规划区间的起始时间为 $t_{\text{re-start}}$, 结束时间为 $t_{\text{re-end}}$, 规划区间长度为 $T_{\text{re-horizon}}$, 在 $t_{\text{re-start}} - T_{\text{getReady}}$ 时刻启动地面集中式星群动态协同

任务规划,并在 $t_{\text{re-start}}$ 前上注执行,转 Step2.

Step7 设规划区间的起始时间为 $t_{\text{a-start}}$, 结束时间为 $t_{\text{a-end}}$, 规划区间长度为 $T_{\text{a-horizon}}$, 在 $t_{\text{a-start}}$ 时刻启动星群自主任务规划,并认为其能够快速完成并更新各星任务,忽略计算及任务更新时间.

Step8 执行自主产生的任务规划期间,判断是否能与地面通信,若是,转 Step6;否则继续执行自主产生的任务规划.

Step9 判断是否到达 $t_{\text{a-end}}$,若是,转 Step7 进行下一 $T_{\text{a-horizon}}$ 的星群自主动态协同任务规划;否则转 Step8.

其中, T_{prePla} 为地面静态任务规划的准备时间,包括协商、计算、指令上注等过程. T_{getReady} 为地面动态任务规划的准备时间. $T_{\text{a-horizon}}$ 为星群自主任务规划的规划时间区间,该值根据星群的轨道特性和地面测控资源的分布情况确定,在该区间内应与地面进行通信,并且地面有足够时间产生新的任务规划上注.

若在极端条件下, $T_{\text{a-horizon}}$ 时间内:1)未能同地面通信;2)地面没有完成新规划上注;3)未到新规划执行时间.在上述情况下,自主规划执行的结束时间 $t_{\text{a-end}}$ 和地面重规划的执行开始时间 $t_{\text{re-start}}$ 之间将存在空档期,如图 6(c) 中情况所示.对于这类情况,由 Step7~Step9 可知,星群将启动新一轮的自主任务规划并执行,直至得到地面新规划、并且地面新规划开始执行为止,如图 7 所示.

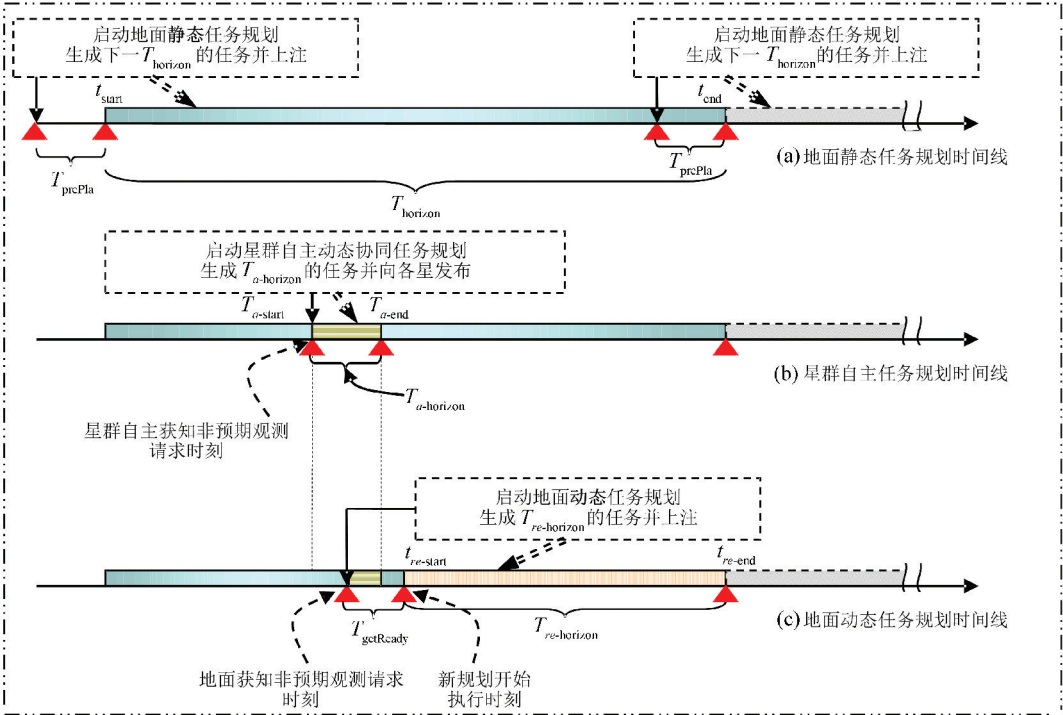


图 6 星群自主任务规划运行流程时间线示意

Fig.6 The timeline of the operating process for the autonomous satellite cluster

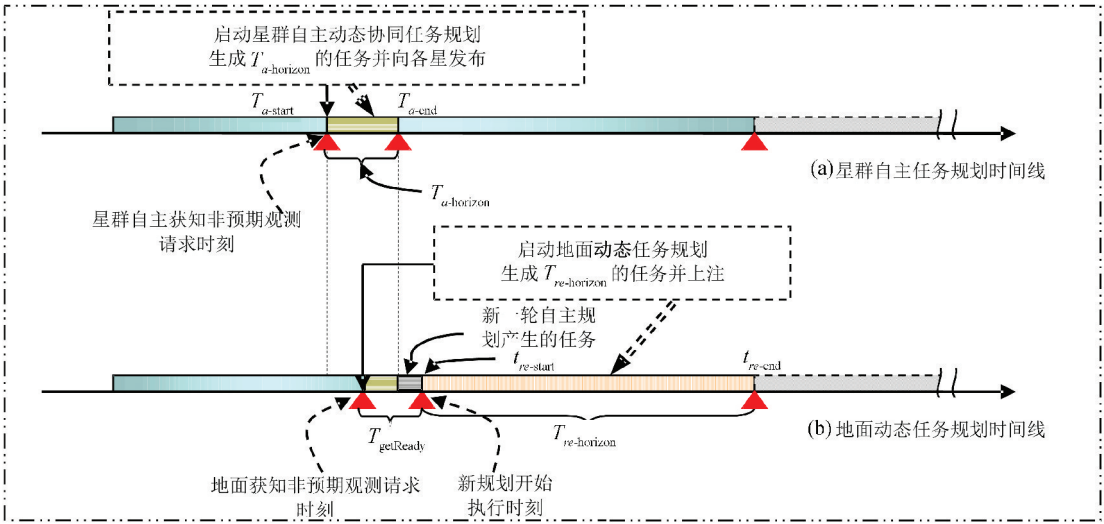


图 7 连续自主规划与地面重规划协调运行时间线示意

Fig.7 The timeline of the operating process for the continuous autonomous planning and ground re-planning

4 算例分析

为了对上述运行机制和流程进行演示验证,应用 pRTi1516+VC6.0+STK 开发了基于 HLA 的分布式仿真演示软件.该软件包括运行控制、信息显示、STK 演示 3 个主界面,如图 8 所示.软件应用进化算法进行地面动态任务规划,应用基于招投标的求解算法进行星上自主任务规划.

软件中设置初始观测目标 100 个,初始规划区间长度 $T_{\text{horizon}} = 7 \text{ d}$,地面动态任务规划的准备时间 $T_{\text{getReady}} = 120 \text{ min}$,自主任务规划区间 $T_{\text{a-horizon}} = 180 \text{ min}$.运行过程中随机指定非预期目标和完成期限(12~48 h),并包含产生非预期观测请求时具有星地可用链路(I类)、不具有星地可用链路(II类)等不同情况,共运行 10 次,运行结果统计见表 1.

表 1 仿真运行结果统计

Tab.1 Simulation results

场景类型	自主规划次数	地面规划次数	原任务完成率/%	新任务完成率/%
II 类	1	1	100	100
II 类	1	1	100	100
II 类	2	1	100	100
II 类	1	1	100	100
II 类	1	1	100	100
I 类	0	1	100	100
II 类	1	1	100	100
II 类	1	1	100	100
I 类	0	1	100	100
I 类	0	1	100	100

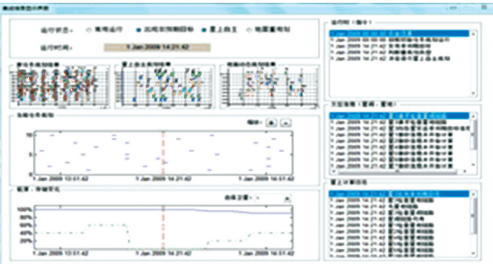
通过对上述仿真运行的结果分析可知,本文提出的星地联合运行机制能够很好地处理非预期观测请求的快速响应问题,在保障原有任务正常执行的情况下,能够及时响应非预期出现的新任务,验证了该联合运行机制的有效性.

5 结 论

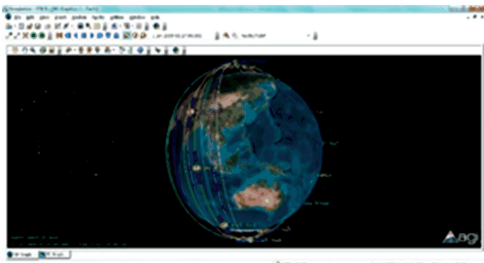
1)分析了地面规划和星上自主规划的特点,按



(a) 运行控制界面



(b) 集成信息显示界面



(c) STK显示界面

图 8 分布式仿真演示软件界面

Fig.8 Interface of distributed simulation software

照任务类型进行了问题划分,将其划分为地面规划和星上自主规划两部分.

2)充分考虑了地面和星上的资源特点,提出了一种星地联合的自主运行机制,并详细设计了运行流程.

3)应用自行开发的分布式仿真演示软件进行了仿真验证,结果表明该机制能够有效地处理非预期任务的快速响应问题.

参考文献

[1]KARAPETYAN D, MITROVIC-MINIC S, MALLADI K T, et al. The satellite downlink scheduling problem: a case study of RADARSAT-2[M]//MURTY K G. Case Studies in Operations Research. New York: Springer, 2015: 497-516. DOI 10.1007/978-1-4939-1007-6_21.

[2]ZHENG Zixuan, GUO Jian, GILL E. Swarm satellite mission scheduling & planning using Hybrid Dynamic Mutation Genetic Algorithm[J]. Acta Astronautica, 2017, 137: 243-253.DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.04.027.

[3]SUNDAR K, QIN Jianglei, RATHINAM S, et al. Algorithms for a satellite constellation scheduling problem[C]//Proceedings of the International Conference on Automation Science and Engineering. Fort Worth, TX: IEEE, 2016:373-378. DOI: 10.1109/COASE.2016.7743431.

[4]LI Yuqing, WANG Rixin, LIU Yu, et al. Satellite range scheduling with the priority constraint: An improved genetic algorithm using a station ID encoding method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(3):789-803. DOI: 10.1016/j.cja.2015.04.012.

[5]VERFAILLIE G, BORNSCHLEGL E. Designing and evaluating an on-line on-board autonomous Earth observation satellite scheduling system[C]//Proceedings of the 2nd NASA International Workshop on Planning and Scheduling for Space. California: [s.n.], 2013: 122-126.

[6]CHIEN S, CICHY B, DAVIES A, et al. An autonomous Earth observing sensorweb[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(3): 16-24. DOI: 10.1109/MIS.2005.40.

[7]TANGPATTANAKUL P, JOZEFOWIEZ N, LOPEZ P. A multi-objective local search heuristic for scheduling Earth observations taken by an agile satellite[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 245(2):542-554. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.011

[8]陈浩,李军,唐宇,等.基于动态罚函数遗传算法的电磁探测卫星多星规划方法[J].国防科技大学学报, 2009, 31(2): 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2009.02.010.

CHEN Hao, LI Jun, TANG Yu, et al. An approach for electromagnetic detection satellites scheduling based on genetic

algorithm with dynamic punish function[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(2): 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2009.02.010.

[9]陈浩,景宁,李军,等. 基于外包合同网的自治电磁探测卫星群任务规划[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2285-2291.DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.038.

CHEN Hao, JING Ning, LI Jun, et al. An approach for Autonomous electromagnetic detection satellite constellation scheduling based on outsourcing contract net[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 2285-2291. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.038.

[10]李军,李军,钟志农,等.基于 SWE 的空天资源对地观测协同任务规划服务模型[J].国防科技大学学报, 2013, 35(3): 108-113.DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2013.03.019.

LI Jun, LI Jun, ZHONG Zhinong, et al. A service model based on SWE for space-aeronautics cooperation earth observing operations [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(3): 108-113. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2013.03.019.

[11]李菊芳,贺仁杰,姚锋,等. 成像卫星集成调度的变邻域禁忌搜索算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12):3040-3044. DOI: 10.12011/1000-6788(2013)12-3040.

LI Jufang, HE Renjie, YAO Feng, et al. Variable neighborhood tabu search algorithm for integrated imaging satellites scheduling problem[J]. Systems Engineerin -- Theory & Practice, 2013, 33(12):3040-3044. DOI: 10.12011/1000-6788(2013)12-3040.

[12]陈英武,姚锋,李菊芳,等. 求解多星任务规划问题的演化学习型蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 791-801. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6788.2013.03.031.

CHEN Yingwu, YAO Feng, LI Jufang, et al. A learnable ant colony optimization to the mission planning of multiple satellites[J]. Systems Engineering--Theory & Practice, 2013, 33(3):791-801. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6788.2013.03.031.

[13]AUGENSTEIN S, ESTANISLAO A, GUERE E, et al. Optimal scheduling of a constellation of Earth-imaging satellites, for maximal data throughput and efficient human management [C]// Proceedings of the 26th International Conference on Automated Planning and Scheduling. London, UK: AAAI Press, 2016:345-352.

[14]TANG Yinin, WANG Yueke, CHEN Jianyun, et al. Uplink scheduling of navigation constellation based on genetic algorithm [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Signal Processing (ICSP).Chengdu, China: IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICSP.2016.7878003.

[15]LI Yuqing, WANG Rixin, XU Minqiang. Rescheduling of observing spacecraft using fuzzy neural network and ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(3): 678-687. DOI: 10.1016/j.cja.2014.04.027.

(编辑 张 红)