

对地观测卫星任务规划研究

邓宝松^{1,2}, 孟志鹏¹, 义余江³, 余 焯³, 周晓光³

(1. 军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071; 2. 天津(滨海)人工智能军民融合创新中心, 天津 300457; 3. 西南电子电信技术研究所, 成都 610041)

摘要: 卫星任务规划是卫星地面系统的核心技术之一; 文章立足于对地观测卫星任务规划技术的工程应用, 结合多年卫星地面系统研制及管理实践, 对卫星任务规划的研究与应用现状及其未来发展趋势进行综述; 文章强调了可靠性、可控性、可理解性等概念, 以及规划架构设计在任务规划研究中的重要性; 在此基础上, 着重阐述和分析了应急卫星任务规划、多系统协同任务规划、高低轨卫星联合任务规划、低轨组网卫星任务规划一体化、星地协同任务规划、基于机器学习的任务规划等技术挑战, 最后就技术挑战进行了总结和展望。

关键词: 对地观测卫星; 任务规划架构; 任务规划一体化; 协同任务规划

Research of Task Scheduling of Earth Observing Satellites

Deng Baosong^{1,2}, Meng Zhipeng¹, Yi Yujiang³, Yu Ye³, Zhou Xiaoguang³

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China

2. Tianjin Artificial Intelligence Innovation Center (TAIIC), Tianjin 300457, China

3. Southwest Institute of Electronic Telecommunication Technology, Chengdu 610041, China)

Abstract: Satellite task scheduling is a core technique in the satellite ground system. Based on our practice of developing and managing the ground system of earth observing satellites (EOS) for years, we present a review of the recent developments on EOS task scheduling particularly from the viewpoint of engineering applications. The concepts of reliability, controllability and understandability are highlighted in the EOS task scheduling, as well as the significance of framework of task scheduling. We then study the technical challenges in practice, including emergency task scheduling, collaborative task scheduling of multiple systems, united task scheduling of the high and low orbits' satellites, integrated task scheduling of low-orbit satellite networks, collaborative task scheduling of satellites and ground stations, applications of machine learning in task scheduling and so on. This work is ended in conclusions and prospects on the EOS task scheduling technology.

Keywords: earth observing satellites (EOS); framework of task scheduling; integrated task scheduling; collaborative task scheduling

0 引言

对地观测卫星 (Earth Observing Satellites, EOS) 是目前在轨卫星的主要组成之一, 其星载载荷主要包括光学 (含可见光和高光谱)、雷达、通信 (有时也称为电子观测) 三大类型。对地观测卫星利用空间位置优势, 获取地球表面及其组成部分的重要数据和信息。对地观测卫星对于国防建设 (制空权、制天权、制信息权等) 和经济民生 (国土普查、抗震救灾、城市规划等) 具有极为重要的作用, 其数据与信息已经成为国家的基础性和战略性资源。

按国家航天局发布的《民用卫星工程管理暂行办法》定义, 卫星工程一般由卫星系统、运载火箭系统、发射场系统、测控系统、地面系统、应用系统等六大系统组成。卫星任务规划属于地面系统 (通常也称为运控系统) 的核

心组成部分, 与卫星系统、测控系统、应用系统均有重要的技术接口。

卫星应用流程简要示意如图 1 所示, 主要分为上行流程和下行流程两部分。上行流程为: 用户提出任务申请, 任务经预处理形成元任务输入至任务规划系统; 任务规划系统根据卫星、测控站、数传接收站等可用资源集合, 以及待规划的元任务集合和卫星约束模型, 进行优化求解并获得任务观测计划、测控计划、数传计划、地面站接收计划, 并更新数据库相关信息; 最后将任务观测计划和数传计划转化为卫星指令, 发送至测控运管中心并上注卫星执行。下行流程为: 卫星执行观测任务后, 按照数传计划将观测数据发送至地面接收站; 下行数据经数据预处理和数据处理后, 通过数据库获取元任务信息, 建立数据与任务的关联, 并经数据分发系统发送回用户。

卫星任务规划是国内外航天领域的研究热点之一, 经过多年的研究探索和工程实践, 取得了丰富的理论成果及显著的应用效果。文献 [1] 针对卫星任务规划中的任务需求及分解问题和任务调度模型和算法进行了较为全面的综

收稿日期: 2019-05-02; 修回日期: 2019-05-21。

基金项目: 军队应用基础研究(2016110135)。

作者简介: 邓宝松(1978-), 男, 河北遵化人, 副研究员, 硕士生导师, 工学博士, 主要从事可视化仿真、增强现实方向的研究。

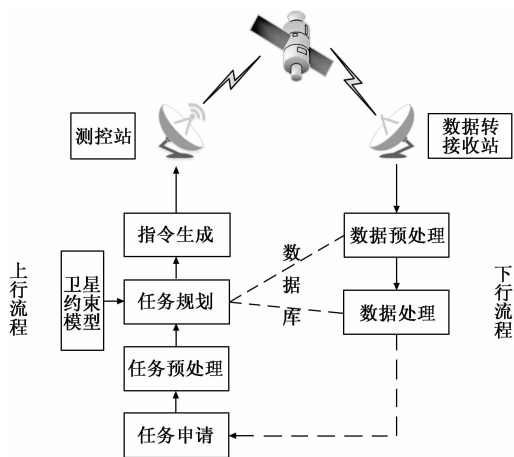


图 1 对地观测卫星应用流程简要示意图

述, 并就用户需求智能理解、卫星组网统筹规划、大规模求解理论、引入风险控制的任务规划等方面做了非常有意义的讨论和展望。本文围绕卫星任务规划的新近发展, 一方面对近年来的研究进展进行全面回顾, 另一方面重点针对卫星任务规划应用实践中所面临的理论与应用挑战进行综述与分析。因此, 本文综述不局限于任务规划算法与技术, 同时着重从地面系统和应用系统研制与发展的角度, 对卫星任务规划进行阐述、分析与展望。

1 卫星任务规划数学模型

本节首先介绍卫星任务规划的数学模型, 突出了可靠性、可控性、可理解性和架构设计等在卫星任务规划中的重要性。

1.1 卫星任务规划的数学模型

$$\max_{t_i, s_j, g_k, c_l} F(t_1, \dots, t_I; s_1, \dots, s_J, g_1, \dots, g_K, c_1, \dots, c_L)$$

$$s. t. \begin{cases} f_t(t_1, \dots, t_I) \leq T \\ f_s(s_1, \dots, s_J) \leq S \\ f_g(g_1, \dots, g_K) \leq G \\ f_c(c_1, \dots, c_L) \leq C \end{cases}$$

其中: t_i ($i=1, \dots, I$) 为任务集合, s_j ($j=1, \dots, J$) 为卫星资源集合, g_k ($k=1, \dots, K$) 为数传接收站资源集合, c_l ($l=1, \dots, L$) 为测控站资源集合; $f_t \leq T$ 、 $f_s \leq S$ 、 $f_g \leq G$ 和 $f_c \leq C$ 分别为任务、卫星资源、数传接收站、测控站的约束集合; $F(t_1, \dots, t_I; s_1, \dots, s_J, g_1, \dots, g_K, c_1, \dots, c_L)$ 为总体优化目标函数。

从上述数学模型可知, 任务规划建模主要包括载荷观测建模、优化目标建模和约束建模。载荷观测模型关系到卫星与地面目标(点目标及区域目标)的可观测性, 是任务规划的重要基础。目前较为常见的光学观测模型包括摆扫式(whisk-broom)、推扫式(push-broom)、凝视面阵式(staring array)等, 雷达观测模型包括聚束(strip map)、侧扫(side-scanning)等, 通信观测模型包括星下波束、前向波束、侧摆波束等。常见的优化目标模型包括

任务数量最大化策略、观测时长最大化策略、任务优先策略、多用户均衡策略等模型, 以及综合效益最大化策略模型(也称多目标优化策略模型)。常见的约束模型包括任务约束(时间窗口、观测条件等)、观测载荷使用约束、数传系统使用约束(如星上存储、数传时长等)、卫星平台使用约束、地面接收站约束(可见性约束、最小仰角约束等)、测控站约束等。

可以证明, 卫星任务规划在理论上是一个 NP 难问题。卫星任务规划具有很强的理论属性和应用属性。在研究与实践中, 通常需要结合具体任务建立有效的约束模型, 对优化目标和优化约束进行有效建模, 以确保任务规划技术的可行性和任务规划结果的可靠性。

1.2 卫星任务规划的重要特点

与其他领域任务规划问题相比, 卫星任务规划既有共通的理论属性, 同时具有显著的航天特色和工程实践属性。以下, 结合卫星工程应用实践分析卫星任务规划的重要特点。

1) 可靠性。可靠性是卫星工程的首要要求和安全红线, 这也是我国航天数十年发展的重要经验结晶。卫星任务规划作为卫星工程的关键组成部分, 也须具备极高的可靠性。卫星任务规划的可靠性主要体现在: 1) 任务规划结果是安全可行的, 即任务规划结果不存在违反卫星使用安全约束、特别是危及平台及载荷安全的“技术归零”的情形; 2) 任务规划结果是约束自洽、无冲突的, 即在外界因素影响下, 任务规划结果须能完全按计划执行, 不存在任务互相冲突或部分任务无法正常执行的情形; 3) 任务规划是确定可重复的, 即对于相同的任务和资源输入、以及相同的约束模型, 任务规划的结果输出应该是完全相同的。

一般而言, 任务规划可靠性在卫星应用中的主导作用和重要性要远超过任务规划效率。因此, 任务规划必须对卫星约束模型进行谨慎、全面的数学建模, 并在任务规划优化过程中进行必要的、甚至是冗余的合法性、合理性检验, 以保证任务规划的可靠性。这一点尤为值得所有卫星任务规划研究人员的高度重视。

2) 可控性。任务规划可控性是可靠性的一个必然延伸。卫星任务规划的可控性是指用户对任务规划具有完全的控制权, 主要体现在: 1) 用户可对任务规划算法的模型参数进行编辑, 同时任务规划系统对不合理的参数设置具备警告提示和系统保护功能; 2) 用户可对卫星、载荷、数传等约束模型参数进行编辑; 3) 用户可对输入的元任务进行编辑; 4) 用户可对任务规划过程实施干预, 包括中止、重启任务规划等。

3) 可理解性。可理解性是卫星任务规划经常被学术界所忽略、而在实践中极为重要的一个特点。卫星任务规划的可理解性包括: 1) 任务规划结果可理解, 即规划失败的任务必须给出明确的原因说明, 因此需要对规划失败类型

进行建模与枚举；2) 任务规划过程可理解，即任务规划过程（包括架构与算法）应尽可能透明化，黑盒式的架构或算法会大幅增加用户排查问题的难度，这也是基于动态规划和贪婪算法思想等确定性任务规划方法在工程实践中被广泛采用的一个重要原因；3) 任务规划可视化，多层次、多手段的任务规划可视化有助于用户了解任务的时空分布特性、卫星资源利用效率等。

4) 卫星任务规划架构设计。卫星任务规划架构设计是软件架构设计在卫星任务规划的应用，它描述了任务规划的内部组成、内部接口、外部接口、数据库等。任务规划算法和任务规划约束模型属于任务规划的内部组成。架构设计是任务规划的整体解决方案设计，反映了实际应用的需求，决定了任务规划算法的选型及数据库系统的设计，是卫星任务规划实践成败的关键。卫星任务规划架构设计在当前国内研究中涉及较少，这也是导致某些卫星任务规划算法应用性较差的一个重要原因。

以下，我们将紧密结合上述显著特点，对卫星任务规划的研究现状及应用挑战进行阐述与分析。

2 卫星任务规划研究现状

近年来，卫星任务规划的研究主要集中在单星任务规划、多星协同任务规划、敏捷卫星任务规划、应急任务规划、自主任务规划等。下面将分别对上述方向的研究现状及趋势进行综述（需要指出的是，卫星任务规划的研究论文数量极其浩繁，本文只是重点引用了近几年的部分重要研究成果）。

2.1 单星任务规划研究

文献 [2] 是较早由美国 NASA 研究人员提出的 EOS 任务规划方法。Barbulescu 等人在文献 [3] 阐述美国空军早期的卫星控制网络，比较了启发式局部搜索算法、Gooley 算法、遗传算法 (genetic algorithm) 的性能，表明对于多任务冲突情形 Gooley 算法和遗传算法性能更优。文献 [4] 从指挥概念、交互界面、体系架构、基于优先级的任务规划算法等方面介绍了德国 terraSAR-X 卫星的任务规划系统。

文献 [5] 在对成像卫星任务规划基础理论进行阐述的基础上，总结了成像卫星任务规划的基本模型和主要求解算法，并提出快速模拟退火算法 (simulated annealing) 的求解方法。此外，该研究还介绍了任务规划系统的组成部分，如采集任务的接收与处理子系统、卫星及地面站资源管理子系统、多星任务规划子系统、单星计划编排子系统、仿真推演子系统和任务规划方案评估子系统等。近几年的研究针对更为复杂的任务集合，采用复杂度更高的算法进行求解，以获得更高的任务规划效率，如文献 [6] 的自适应模拟退火算法及动态任务聚类策略，文献 [7] 针对任务观测及下行数传组合问题的近似路径搜索方法。

总体而言，单星任务规划的理论研究和工程应用目前

都已较为成熟。

2.2 多星协同任务规划研究

多星协同任务规划是当前卫星任务规划的一个研究热点。较早的工作如文献 [8] 介绍了 COSMO-SkyMed 星座的任务规划方法及系统。COSMO-SkyMed 星座由搭载成像雷达载荷的四颗卫星组成，任务规划综合考虑了天上固存、任务运行规则、多用户资源分配、优先级等约束，以任务数量及数传数据量最大化为优化目标，给出了一种较为实用的构造算法进行求解。文献 [8] 对 COSMO-SkyMed 星座的约束模型进行了细致且全面的建模，规划算法思想简单却十分实用，应用效果显著，是一个具有良好工程应用价值的学术研究范例。

文献 [9] 针对多类型 EOS 的点目标成像观测问题，综合考虑侧视、天上存储、数传数据量、天上能源等多种约束，以观测任务评价最大化为目标，采用基于贪婪随机自适应搜索过程及模拟退火的混合任务规划算法，求解多星的任务观测计划和数传计划，取得了较为良好的仿真结果。该研究对成像卫星的约束模型进行了较为深入的建模，但未曾考虑任务优先级对任务规划的影响，算法也未经实际卫星和数据的检验。

文献 [10] 研究了多卫星、多地面站的控制网络问题。根据给定规划时间区间，综合考虑了地面站的天线摆角角度和时间约束、图像下行分配约束等，利用 STK 计算卫星与地面站的可见时间，从而把规划问题转化为经典的背包问题；然后分别采用动态规划和贪婪算法进行求解与比较，取得了较好的结果。

文献 [11] 把多星任务规划建模为多时间窗口、多优化目标和多约束条件的组合优化问题。它首先采用经典逻辑关系、时序逻辑关系、资源需求约束关系对组网卫星的协同工作模式进行建模，并数学化描述了主要约束条件和任务规划模型，最后利用启发式遗传禁忌算法 (heuristics tabu search) 进行规划求解，并与遗传算法、启发式遗传算法、遗传禁忌算法进行了性能比较。该研究对约束关系、约束条件、规划模型进行了细致的数学建模，但没有考虑星间链路的实际影响，仿真结果也表明该算法性能与启发式遗传算法、遗传禁忌算法等经典算法的性能并无显著差异。

文献 [12] 阐述了英国萨里卫星技术公司 (SSTL) 针对商用小卫星星座的任务规划策略与思考。该文首先介绍了优先级、系统模型保真度、响应能力及可靠性、卫星数量的尺度变化、互操作性和异构性、自适应性、人在回路、用户干预、经济与效率等方面在任务规划系统的重要性；然后描述了 SSTL 任务规划系统的体系架构设计组成，包括卫星任务规划模块、分布式任务拆分模块、Atlas 任务交互；最后分析了 SSTL 任务规划系统设计与发展所面临的一些问题。该研究有助于外界了解 SSTL 关于商业卫星星座的技术现状及发展路径。

文献 [13] 针对 EOS 刈幅成像问题 (swath acquisition problem, SAP), 即给定任务规划时间区间, 从 EOS 卫星资源集合中选取子集以满足覆盖感兴趣区域 RoI (region of interest) 的成像规划问题。作者将 SAP 问题建模为整形线性规划问题, 并结合启发式算法和贪婪随机自适应搜索过程 (GRASP) 算法进行求解。文章最后采用多个实际场景以及公开卫星数据对算法进行测试, 表明了该方法的有效性。值得注意的是, 该研究并没有采用计算复杂度高的模拟退火或遗传算法, 而是采用较为简单的启发式和贪婪算法思想, 较好地兼顾了计算效率及优化效果。

文献 [14] 针对紧急观测场景, 考虑卫星特定时刻失效的容错需要, 为了提高卫星规划的可靠性, 提出了一种基于容错 (fault-tolerance) 和主份-备份原则的多星协同规划方法; 为提高规划效率, 提出了主备合并、备备合并、主主合并的策略。STK 仿真表明该方法具有较好的效果。

文献 [15] 围绕我国现有星地资源运用过程及其面临的综合运用能力弱、数传资源浪费等不足, 对现有星地资源的特点和应急条件下星地资源响应慢的技术原因进行了深入的分析。在此基础上, 提出了一种星地资源综合应用模式的新构想, 从卫星资源、测控网、运控、应急任务需求、星地资源运用调度与规划等方面阐述了应用框架, 对数传网、各类资源 (卫星、测控、数传等)、数据库等方面的关键技术进行了分析, 并进行了仿真计算。该研究对星地资源综合调度的实践及困难做了较为全面的阐述, 但对于其中的关键技术及解决方案的分析与研究还不够深入。

Lee 等人在文献 [16] 和 [17] 的多星任务规划方法重点考虑星上能源和固存对数传与任务的约束, 以任务优先级、能源与固存、成像时间构成优化目标函数, 利用遗传算法进行求解, 并就不同的应用模式进行了仿真计算。该研究对约束模型和目标函数进行了深入的分析与建模, 但提出的方法缺乏与其他方法的详细比对, 算法性能也缺乏实际验证。

2.3 应急任务规划研究

应急任务规划近年来受到广泛的关注。文献 [18] 首先分析了电子侦察卫星需要应急任务插入的情形, 从新任务构建、扰动测度、约束及目标函数等方面描述了任务规划模型, 以最大化任务优先级之和以及对原侦察计划最小调整为目标, 提出了一种基于启发式规则的动态插入算法, 并给出了仿真计算结果。该研究对任务规划进行了较为详细的分析与建模, 但对电子侦察卫星的任务特点、星上约束等分析不够全面, 对电子侦察卫星的任务规划架构也没有涉及。

文献 [19] 分析了突发任务的特点与约束, 采用问题定义语言 (PDDL) 对突发性任务进行简化建模, 然后根据逻辑和数值约束、时间初始化文字的约束、时序约束的处理提出了启发式搜索与改进的计划评审技术相结合的双阶段规划算法, 并给出了仿真计算结果。该研究提出了新的

PDDL 建模方法, 但对该建模方法的优点缺乏充分的论证和深入的比较分析。

文献 [20] 对任务规划的资源与任务、任务优先级和时间裕度进行了分析, 然后提出了基于优先级和时间裕度的任务规划模型, 并采用遗传算法进行求解。该研究对应急任务和任务规划的建模都有待进一步深化。

文献 [21] 针对大范围应急观测的任务规划问题提出了多目标优化的方法。作者首先将对目标区域进行条带切分, 综合考虑覆盖率、成像时间、平均空间分辨率和平均成像角度等, 将优化求解问题转化为多目标的整数规划模型, 并采用遗传算法进行求解。文章对 2008 年汶川地震灾害的场景进行了仿真计算并与相关算法进行了比较。该研究对优化目标和算法性能都做了较为深入的分析。文献 [14] 和 [15] 也对应急条件下的星地资源协同规划进行了研究。

2.4 敏捷卫星任务规划研究

敏捷卫星具有快速发射、易于机动、组网观测的优点, 是航天领域近年兴起的一个新发展方向, 典型的敏捷卫星如美国 IKONOS-2 卫星、World View 系列卫星以及法国 PLAIEDES 星座等。不少研究者针对敏捷卫星任务规划进行了深入的研究。

文献 [22] 针对单颗成像敏捷卫星的任务规划问题, 以成像整体效益最大化和多用户均衡为优化目标, 提出了一种基于指示 (indicator-based) 的多目标局部搜索方法 (IBMOLS)。IBMOLS 本质上是一种基于局部搜索算法与遗传算法的迭代方法, 其在第一次迭代和后续迭代中使用了两种不同的群体生成 (population generation) 策略, 并多次应用较为快速的非支配遗传算法求解和局部搜索策略, 从而获得较快的收敛速度。与有偏随机密钥遗传算法 (BRKGA) 的比较结果表明, IBMOLS 具有更优的 hyper-volume 指标以及更快的 Pareto 收敛速度。该研究表明 IBMOLS 在效益最大和多用户均衡优化目标下的优越性, 或有望应用于多星组网或者其它优化目标约束下的敏捷卫星任务规划研究。

文献 [23] 针对光学成像敏捷卫星应用中的云层遮挡问题, 假定卫星携带的云层探测仪器可实时获取云层信息, 从而利用敏捷卫星的机动能力, 研究避开云层以获得成像效益最大化的问题。文章通过对云层遮挡信息进行建模, 在云层遮挡时间窗口计算时加入了预判和二分法, 有助于提高求解效率; 建立了考虑云层信息的敏捷卫星任务规划模型, 采用蚁群算法 (ant colony optimization) 进行求解, 对蚁群算法的状态转移规则、任务安排和信息策略也做了详细的分析。该方法对提高可见光成像效率具有重要作用, 但未考虑星上能源对于敏捷卫星机动能力的约束, 对算法性能也缺乏深入分析。

文献 [24] 针对敏捷成像卫星时间依赖型调度问题展开研究, 将时间依赖调度与敏捷成像卫星调度相结合。根据

成像质量随成像时间动态变化的特点,设计了随时间动态变化的收益函数,并将轮盘赌思想和时间窗口裁剪概念引入到求解方法中,提出了一种启发式算法。仿真结果表明,通过对时间依赖的考虑,更多的任务能够在最佳观测时刻点附近成像,同时也表明了模型的合理性以及算法的有效性。

文献 [25] 对敏捷卫星任务规划的国内外研究进行了总结分析。该研究首先从用户需求和资源选择复杂、观测任务多、约束多、建模复杂度高、组合复杂度高、优化难度大等方面,对敏捷成像卫星任务规划的难点进行了分析。然后,对点目标、区域目标、同轨立体成像、长条带目标等不同场景下的任务规划算法进行了比较分析。最后,文章指出了当前研究的一些普遍不足,如约束模型过于简单、算法性能难于评价等,并对多种成像模式下的任务规划、敏捷卫星组网协同和自主任务规划、高效的求解算法等方面进行了讨论与展望。

文献 [26] 研究了敏捷双星的任务规划问题。该敏捷双星由一颗面向目标检测的低分辨率卫星和一颗面向目标识别的高分辨率卫星构成。作者对低分辨率卫星引导高分辨率卫星进行海上目标检测与识别的问题进行了分析,对该问题的任务规划问题进行数学建模,并提出了分支限界 (Branch and Bound) 的求解算法。

2.5 星上自主任务规划研究

自主任务规划因其分布式、灵活机动、星上自主在线、无人值守的前景而受到学术界和工业界的重视。SSTL 也将自主任务规划作为其下一步研究与发展的重点方向 [12]。

针对 2013 年欧洲航天局 (European Space Agency) 与 Inmarsat 公司联合发射的 Alphasat 卫星 (该卫星搭载了 4 个技术演示验证载荷), 文献 [27] 结合 Alphasat 卫星的使命任务, 对技术演示验证载荷、平台状态与机会窗口、任务需求、约束条件、问题与目标进行了详细的建模; 然后提出了基于迭代修复 (iterative repair) 范式的任务规划方法, 并详细介绍了规划引擎的概念以及规划架构。文章最后还介绍了用户需求分析与理解的一些技术解决案例, 如在考虑操作员在任务规划优化迭代策略的作用时, 系统需同时考虑算法求解和向操作员提供及时反馈的两个方面, 需平衡系统能力、优化目标、信息有效性等因素。该研究 [27] 立足于 Alphasat 卫星的研制、使用与管理实践, 尽管采用的任务规划算法较为简单, 但在地面规划系统的整体性能优化、以及提升用户体验和使用效率方面做了较为深入的分析, 具有较为重要的实践意义。

文献 [28] 针对传统成像卫星的不足, 阐述了新型卫星的功能需求, 如星上自主规划能力、快速计算与处理能力、观测结果星上分析能力等, 并提出了一种新的星地一体自主任务规划结构框架。在这个新架构中, 卫星的角色从简单的指令执行者变成了具有自主决策能力的智能体, 由星上和地面两个子系统协同完成自主任务规划。文章简

要分析了星上自主规划的动态信息分析、任务柔性化处理、算法可配置、系统可重构、“平台+插件”设计、需求自主挖掘等关键技术, 最后进行了仿真计算。该研究考虑了星上资源受限的约束, 提出的星上与地面任务规划功能分离与协同的思想具有很好的借鉴意义; 但对涉及的星上功能和关键技术分析较为简单。此外, 这些功能和技术十分依赖于卫星设计与制造水平, 因此有必要结合卫星设计与制造作进一步的深入论证与分析。

文献 [29] 针对多卫星系统观测行为被干扰或中断的情形, 提出了一种星上自主重规划的方法。该研究融合利用多目标混合动态变异遗传算法和重规划技术, 并比较了周期重规划 (CRM) 和近实时重规划 (NRRM) 两种重规划方法的优劣。该研究采用复杂度较高的星上自主任务规划方法, 但未能考虑星上能源及计算资源特性的约束, 因此该方法在星上实现的可行性仍然存疑。

文献 [30] 和文献 [31] 分别从不同侧重点回顾总结了自主任务规划技术的卫星应用。文献 [30] 对实现星上自主任务规划与实现的基于模型 (model-based) 的技术进行了综述。作者深入分析了基于马尔科夫决策过程 (MDP) 模型的自主规划方法, 并与基于其他模型的方法进行了详细的比较, 结果验证了基于 MDP 模型方法的优越性。该研究结合规划系统和动态重规划能力, 描述了星上软件的实现方式, 并分析和测试了该方法在欧洲空间项目的实现途径及应用性能。文献 [31] 研究了自主性概念 (autonomy) 在分布式卫星系统 (distributed satellite system, DSS) 的应用及趋势, 着重从功能与体系架构、多 agent 的任务规划系统 (mission planning system, MPS)、自组织双星 MPS、规划问题分解、时间轴表示、规划优化、运行性能、问题建模、任务建模、资源约束、卫星组网等方面阐述和分析了自主性在 DSS 任务规划的应用潜力。该研究认为, 自主性不仅仅可提高 DSS 的反应能力, 也可为提升 DSS 的机动性、自适应性以及在轨资源交换能力。总体而言, 具有自主规划能力的分布式卫星系统仍是一个处于开放式研究的课题, 其应用模式和卫星设计实现有待进一步研究和验证。文献 [32] 和 [33] 也分别从自主地面运行及任务解译闭环仿真的角度, 研究了自主卫星的控制与规划。

2.6 研究现状分析

从上述公开发表的研究成果来看, 卫星任务规划研究在国内外广受重视, 在理论和应用方面有较为深入的探索和研究。以研究侧重点分类, 当前的卫星任务规划研究或可以分为两类。

第一类研究侧重理论和算法, 重点在于提高任务规划的算法性能, 采用的算法包括禁忌搜索、模拟退火、遗传算法、蚁群算法等。这一类研究多来自于学术界, 多见于可见光成像卫星的任务规划研究。这一类研究的不足主要有 3 个方面。首先, 这类研究对于卫星安全使用约束建模较为理想化、简单化。然而, 约束建模是卫星任务规划研

究中极为重要的组成部分, 约束建模过于简化也意味着规划问题的建模偏差, 从而导致规划方法的实用性较差。其次, 部分研究只注重任务规划算法性能的提升(性能提升也可能是微弱的), 而忽略了其他方面的研究。正如我们在 1.2 节指出的, 任务规划算法的可靠性、可控性、可理解性对算法的实际应用也十分重要。对于至关重要的任务规划架构设计, 这方面的学术研究仍然较少。需要特别强调的是, 卫星任务规划不仅仅是一个单纯的算法优化问题, 其体系架构设计是更为核心、更为关键的基础性研究。最后, 这类任务规划研究主要面向可见光成像卫星, 对于雷达与通信这两类观测载荷的研究较少, 而后两者的任务规划技术也更为复杂。这与雷达与通信载荷主要用于军事用途而不易获得相关数据的客观情况也有一定关系。

第二类研究着重任务规划系统。这类研究多来自于工业界和卫星管理部门, 它不局限于任务规划算法, 往往是从任务建模、卫星安全使用约束建模、功能与架构设计、系统鲁棒性、系统可扩展性、用户体验、性能平衡等方面进行较为全面的研究。随着商业卫星的发展, 这类研究逐渐引起了包括学术界在内的重视, 对于卫星任务规划发展起到了非常良好的促进作用。这类研究的一个不足在于其所采用的任务规划算法性能可能是次优的。

尽管这两类研究目前尚存在一定的隔阂, 随着卫星应用的发展, 这两类研究的融合趋势也会增强。一方面, 随着对卫星约束建模越来越复杂并越符合实际, 第一类研究的研究成果可望更有效运用于卫星地面系统的应用实践。另一方面, 随着卫星数量越来越多、规划问题越来越复杂, 第二类研究也需要采用复杂度更高、优化性能更好的任务规划算来提升整体系统性能。

3 卫星任务规划的应用挑战

当前, 我国卫星应用正处于转型与发展期, 从体制与技术上逐步打破航天资源分头隶属、烟囱林立的旧有格局, 大力推进航天资源共享协同与统筹规划。

围绕着新形势带来的新任务和新挑战, 结合作者多年的卫星地面系统和应用系统的研制与管理经验, 以下重点阐述和分析我国卫星任务规划面临的重大应用挑战。需要特别说明的是, 以下应用挑战主要从技术层面进行分类阐述, 但在实际中他们是经常相互关联的, 即一个任务规划应用可能同时包含了多个不同的任务规划技术挑战。

3.1 应急卫星任务规划技术

应急观测是对地观测卫星应对突发事件的重要功能之一, 应急卫星任务规划技术主要包括两个方面的研究。

首先, 应急任务规划算法研究。应急任务插入及重规划问题在文献 [18-21] 中已有深入的探讨。许多对地观测卫星的星务管理或载荷管理采用 ID 重载的方式支持应急任务插入和替换。应急任务一般具有以下特点: 应急任务优先级高, 应急任务数量少, 应急任务规划需快速完成。因

此, 应急任务规划通常以应急任务成功规划、对已上注观测计划最小调整为目标。此外, 为保证应急任务快速上注和数据快速回传, 应急任务规划通常还包括测控计划和数传计划的重规划, 从而也会影响到已上注的任务观测计划和数传计划。

应急任务规划在保证应急任务和应急数传的成功规划前提下, 需要平衡重规划效率最大化和已有观测计划的最小调整。根据平衡策略的不同, 应急任务规划方法大致可分为两类。第一类是整体重规划方法, 即把应急任务和数传与受影响的星上已有观测计划和数传计划进行整体重规划。整体重规划分两阶段实现: 第一阶段规划应急任务和应急数传, 本阶段规划只需考虑应急任务、应急数传窗口、星上约束等; 第二阶段在第一阶段规划的基础上, 采用既有的任务规划目标及算法对常规任务进行规划优化。整体重规划方法的优点是卫星利用效率充分, 缺点是对已上注的任务观测计划和数传计划调整可能较大。第二类方法是基于冲突消解的树搜索方法, 即根据已有观测任务的树结构, 逐个删除与应急任务和应急数传有冲突的已有观测任务。观测任务的树结构一般可按载荷通道、数传窗口、任务时间等进行构建。树搜索规划方法的优点在于对星上已有任务观测计划和数传计划改变较小, 缺点在于规划效率可能会比较低。

其次, 应急任务规划架构设计研究。由于应急任务的突发性特点, 必须从规划架构设计上保证应急任务的快速申请、快速规划和快速指令生成。良好的应急任务规划架构应至少满足以下两个条件。首先, 应急任务快速生成。通常来说, 应急任务并不是参数完备的任务申请, 而往往是模糊的需求申请。因此, 应急任务快速生成需要快速把需求申请转化为合理的任务申请。其次, 应急任务快速规划。应急任务规划与常规任务规划具有明显不同的业务流程, 例如: 应急任务规划应尽可能简化流程, 减少人工干预, 以提高应急任务规划的时间效率; 应急任务规划的测控时间窗口和数传时间窗口一般需要视应急任务需要选定, 而常规任务规划是先给定测控和数传时间窗口作为规划约束条件; 对于受影响的原有任务观测计划、数传计划、地面接收计划, 需同步更新数据库系统的相关数据。可以说, 应急任务规划架构设计是决定应急任务规划成败的主要因素。

3.2 多系统协同任务规划技术

多系统协同任务规划是推进航天资源共享与协同、提升航天资源使用效率的必然要求。在当前大力推进航天资源统协同共享、统筹规划的形势下, 多系统协同任务规划研究具有特别的重要性和紧迫性。

由于历史原因, 各卫星任务规划系统采用的操作系统、开发环境、数据库系统都不尽相同。若将现有的任务规划系统进行规范化、标准化的全面升级, 则因周期长、成本高、影响在轨运行等客观困难而变得不切实际。因此, 需

在逐步推进任务规划标准化、一体化的同时，在既有任务规划系统的基础上研究多系统协同任务规划。一种较为可行的方法是在现有若干规划系统的基础上，增加多系统任务预调度顶层系统，其逻辑拓扑如图 2 所示。

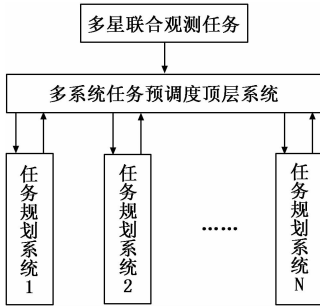


图 2 多系统任务预调度顶层系统逻辑示意图

该预调度顶层系统的主要功能是建立各任务规划系统的通信、反馈、协同机制，主要功能包括两部分。首先，将所有多星联合观测任务进行分解，并生成满足各规划系统要求的元任务（图 2 下行箭头方向）。其次，接收各任务规划系统的规划结果反馈（图 2 上行箭头方向），确定多星联合观测任务是否规划成功，并决定是否需要规划迭代。

多系统协同任务规划面向已有的任务规划系统完成多星协同观测任务，因此预调度顶层系统更着重于系统架构设计的研究。通信、反馈与协同机制也需要从多个层面进行设计，如系统界面交互、数据库数据交互、通信格式设计、典型协同模式都是需要研究的内容。此外，如果多星协同观测任务优先级较高，而某个子系统在任务规划并无优先级的设计，也需要进一步研究如何保证该联合任务的成功规划。

总体而言，多系统协同任务规划的成功应用有赖于理论研究和工程实践的共同推进。理论研究包括现有卫星规划系统建模、预调度顶层系统的架构设计、多系统的通信与协同机制等。工程实践则根据特定的应用需求，借鉴理论研究的有效成果，完成预调度顶层系统的工程方案设计、研制与应用。

3.3 高低轨卫星联合任务规划技术

高低轨卫星联合观测是多星联合观测的一种典型模式，鉴于其特殊性，本小节单独展开讨论与分析。

高轨卫星具有大幅宽视角（FOV）、可连续跟踪观测的优点，但观测数据质量受分辨率、信号强度等距离相关因素的影响；低轨卫星具有高精度观测、全球观测的优点，但受观测持续时间较短、重访周期较长的限制。因此，高低轨卫星联合观测可以扬长避短、充分发挥协同优势，形成独特的对地观测优势和能力。

高低轨卫星联合任务规划是高低轨卫星联合观测的必然要求，其主要挑战在于高轨卫星与低轨卫星的任务规划架构难以统一。高轨卫星具有指令即时上注、数据即时回

传的特点，星上能源也较充裕，因此高轨卫星任务规划通常无需考虑测控、观测、数传的时间窗口约束和星上能源约束，而这些约束对于低轨卫星任务规划则是至关重要的。这些差异导致了高轨卫星与低轨卫星在任务规划架构设计、数据库系统设计的显著不同。

由于上述技术因素以及我国高低轨观测卫星独立发展的历史原因，我国目前高低轨联合任务规划尚处于较为初级的水平，需要大量的人工干预。因此，有必要进一步推进高低轨联合任务规划研究，特别是规划算法融合和规划架构融合的研究，开展高低轨联合观测的数学模型、高低轨联合规划的标准化设计等研究，同时在新卫星任务规划系统设计和研制时充分考虑高低轨联合的接口设计。

在已有高轨卫星和低轨卫星任务规划系统的基础上开展联合任务规划研究，需要建立一个与图 2 类似的预调度顶层系统。考虑到高轨卫星任务规划的特殊性，高低轨卫星的预调度顶层系统流程设计也可如图 3 所示。在该联合规划系统中，预调度顶层系统首先将高低轨卫星联合观测任务分解成高轨卫星与低轨卫星的元任务；然后进行低轨卫星任务规划，若规划成功则将高轨卫星元任务交由高轨卫星任务规划系统。若高轨卫星任务规划成功，则联合任务规划成功；否则若其中一个规划失败，则联合任务规划失败。对于涉及多个高轨为卫星和多个低轨卫星、更为复杂的任务联合规划，需要将图 2 和图 3 的架构结合起来。

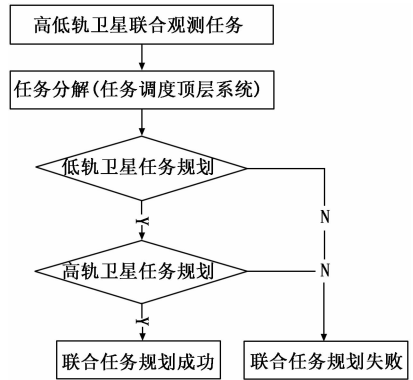


图 3 高低轨卫星联合任务规划系统示意图

3.4 低轨组网卫星任务规划一体化技术

低轨多星组网是对地观测卫星的主要发展趋势之一。低轨卫星组网的方式灵活多变，其任务规划的研究范围也非常广泛。在本小节，我们重点分析搭载异构载荷的卫星组网和具有星间链路的卫星组网的任务规划一体化技术。

异构载荷包括光学、雷达、通信等观测载荷，这些载荷既可能搭载于不同的卫星平台，也可能搭载于同一卫星平台，并可执行联动模式的观测任务（如通信观测引导光学观测、低分辨率光学观测引导高分辨率光学观测等）。异构载荷卫星组网任务规划技术需重点解决以下 3 个问题：联动观测任务约束，多资源候选集合以及异构载荷任务规划一体化。

联动观测任务约束主要包括载荷观测约束和时序约束。载荷观测约束在 1.1 节的载荷观测模型中已有详述; 时序约束是指联动任务的时序关系, 包括任务间隔时长约束、任务时长约束等。在某些情况下, 联动任务须以元任务形式进行任务规划。多资源候选集合是指在多星协同情况下, 存在多个不同的资源组合完成某个任务需求。因此, 需要在最优化目标函数、减少对其他任务影响的约束下, 从候选集合中选择合适的资源完成该任务。异构载荷任务规划一体化是指设计统一的任务规划架构及算法, 以满足多源异构载荷的一体化任务规划要求。一体化任务规划的关键在于对异构载荷的任务规划算法和约束模型进行合理的数学抽象, 并在软件架构上针对异构载荷的共性及特性进行合理设计。

任务规划本质上是特定模型约束下的时间资源规划问题, 合理的数学抽象是解决上述问题的关键。对于联动观测任务约束问题, 可引入统一的联动任务标识, 把具有相同联动标识的任务作为不可分割的元任务进行规划算法处理。多资源候选集合是一个计算复杂度较高的组合优化问题, 可综合采用禁忌搜索思想及相关优化算法(如遗传算法)进行求解。对于一体化任务规划问题, 可把所有元任务(包括联合观测任务)的时间窗口作为任务规划算法的统一输入, 把任务观测计划、卫星数传计划、地面接收计划等的时间窗口作为统一输出, 把各卫星平台及载荷的约束模型以具有统一接口的插件形式实现, 从而完成任务规划算法的一体化设计与实现。

具有星间链路的卫星组网任务规划技术主要指将星间通信链路的作用纳入任务规划。星间通信链路对于拓展灵活机动的观测模式、提升多星协同观测效率具有重要意义, 同时也对多星组网任务规划带来新挑战。星间链路对任务规划的影响主要有两个方面。首先, 某些组网卫星的星间链路通信与对地数传通信是互斥的。这通常是由于星间数传和对地数传共享天线或数据调制器等卫星设计约束导致的, 因此任务规划研究需要对这种新类型约束进行数学建模, 避免星间数传与对地数传(或中继数传)的冲突。对于某些需要使用星间链路的观测任务, 在数传优先的条件下应避免该任务与对地数传窗口的冲突, 在任务优先的条件下则需要调整数传窗口, 在综合效益最大化的条件下则需要根据优化目标和约束条件进行统筹优化。其次, 星间链路允许观测计划指令传输。即卫星 B 的观测计划指令可以先由地面测控站先上注至 A 星, 然后 A 星在某个时间点将计划指令通过星间链路传送给 B 星。这种灵活的观测计划指令传输模式可有效解决单星测控窗口受限的约束, 也使任务规划变得更为复杂。总而言之, 星间链路对任务上注、任务观测计划、数传计划、地面接收计划都有影响, 在不同的实际应用中影响也不尽相同。

低轨组网卫星任务规划及优化是极具挑战性的问题, 尤其是在异构载荷与星间链路的数学模型不尽相同的条件

下。一般可以考虑先采用贪婪算法、局部搜索或动态规划的方法获得一个初始的可行规划结果, 然后采用复杂度更高的算法跳出局部最优, 从而获得全局最优或近似最优。复杂优化方法例如模拟退火算法、禁忌搜索算法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法(Particle Swarm Optimization)、分散搜索算法(Scatter Search Algorithm)等。在实际应用中, 算法的稳健性和鲁棒性同样重要, 需要根据不同的应用条件合理选择优化算法。

3.5 星地协同任务规划

星地协同是航天资源统管统建的必然要求。星地协同任务规划综合调度优化测控站资源、数传接收站资源、卫星资源(有时也包括中继通信卫星资源)、地面观测资源等, 以提升星地资源的协同运用效率。本小节重点分析星地协同任务规划研究的两个方面: 测控运控资源预分配研究和任务驱动的星地协同任务规划研究。

测控运控资源预分配研究是指给定测控站、数传接收站、卫星的全资源集合, 根据一定的优化原则, 将测控站、数传接收站的资源组合预分配给卫星。优化原则包括时间均衡原则、目标驱动的重访最优原则、综合效益最大化原则等。测控运控资源预分配研究在应用实践占有十分重要的位置, 它通常是卫星控管中心制定周计划乃至月计划的主要依据之一, 对于提升航天统管统建的效率具有非常重要的意义。

测控运控资源预分配的难点在于测控站、数传接收站、卫星等所有资源的空间拓扑关系是非先验的, 新增和删减资源节点会改变空间拓扑关系, 可见性计算所需的资源模型不全相同。因此, 预分配研究须具备对不同资源的建模能力, 以及对不同优化目标、不同资源集合、不同拓扑关系的普适通用的资源分配最优化能力。在资源建模的基础上, 可采用计算复杂度较高的优化算法对预分配进行优化求解。测控运控资源预分配研究与星上异构载荷的耦合性较弱, 具有较强的理论性, 较适于学术探讨和仿真计算。

任务驱动的星地协同任务规划研究是指根据待规划的任务集合, 将测控资源、数传接收资源、卫星资源、地面观测资源等纳入任务规划优化过程。任务驱动的星地协同任务规划把测控资源和数传接收资源作为任务规划变量, 改变了给定测控资源和数传资源约束下的传统任务规划模式, 因此能够更充分协同规划星地资源, 从而获得更高的航天资源使用效率。

任务驱动的星地协同任务规划研究的难点在于测控资源、数传资源与观测任务的强耦合性。特别是后两者的耦合性, 即数传资源与观测任务互为约束: 数传资源规划受任务规划目标约束, 任务规划受数传资源条件约束。对于多星、多地面站的协同规划研究, 考虑到对地数传冲突以及任务一数传组合的指数增长, 数传资源和观测任务的耦合性将更为复杂。因此, 任务规划算法需采用某种策略解耦数传资源和观测任务。此外, 星地协同任务规划也需要

对地面资源和卫星资源的联合观测模型及约束进行建模。

3.6 基于机器学习的任务规划应用技术

在当前大部分地面系统 and 应用系统中,上行系统和下行系统的业务流程(见图 1)基本是单向的,下行流程的数据处理结果优劣往往无法自动反馈至上行流程,或者即使有反馈也是通过人工操作完成的,缺乏必要的系统设计和技术支撑。这种非闭环、不完整的系统结构也是航天资源使用效率低下的一个重要原因。

闭环结构是一个良好的卫星地面及应用系统设计中所必需的。下行系统的数据处理结果和评价应能够通过某种机制和形式存储在系统数据库中,并传递给终端用户,以提高任务申请和任务规划的效率。丰富的对地观测数据及处理结果,使得基于机器学习的方法有望在卫星任务规划获得广泛应用。

文献 [1] 讨论了用户任务需求的智能化理解,本文在此仅列举两种可能的机器学习应用。一个是面向目标的任务智能申请,即面向静态区域或动态目标,根据该目标的历史观测数据处理结果及评价,采用机器学习的方法,自动推荐针对该目标的任务申请参数(如时间、载荷类型、频率等)或智能生成任务申请,从而达到任务规划输入端优化的目标。该应用技术的关键在于对任务参数空间的合理表征以及机器学习算法选择。另一个应用是根据特定目标的历史观测数据处理结果,采用机器学习的方法建立该目标的属性特征库。目标属性特征库在目标融合识别、任务申请以及任务规划具有十分重要的应用。例如,任务规划可以属性特征库为依据,自动匹配和选择最优的卫星平台和轨道资源,从而获得目标的最优观测方案,获取高质量的观测数据,对于提高地面系统的整体效能具有重要作用。

3.7 新型卫星任务规划技术

卫星应用的一个重要发展方向是经济化、微型化、组网化和智能化。敏捷卫星(包括微纳卫星、皮纳卫星等)、软件定义卫星^[34]、具备在轨自主任务规划能力的卫星等受到国内外广泛关注,有望在未来航天应用中发挥重要作用。

这些新型卫星目前仍处于探索阶段,尚缺乏统一的工业标准,其市场价值、社会价值和军事价值也有待明晰。对于卫星任务规划而言,需要对新型卫星的平台能力(如卫星变轨)、载荷类型、观测模式、数传链路、安全使用约束等进行有效的数学建模,需要对星上规划和地面规划进行有效的功能分离与耦合设计。新型卫星的异构组网特点也将更要求从系统整体优化的角度出发,开展任务规划的算法与技术研究。

4 结束语

卫星任务规划作为卫星地面系统的一个组成部分,具有显著的航天特色。本文立足于卫星工程应用实践,对对地观测卫星的任务规划研究现状进行了综述,并着重阐述与分析了任务规划技术的发展和应⽤挑战。

结合卫星任务规划的航天应用特点,本文突出了可靠性、可控性、可理解性及架构设计在卫星任务规划研究与实践中的重要性。在航天统管统建的新形势下,本文重点从技术层面对卫星任务规划实践面临的新挑战进行了较为全面的阐述,包括应急任务规划、多系统协同任务规划、高低轨卫星联合任务规划、低轨组网卫星任务规划一体化、星地协同任务规划、基于机器学习的任务规划应用和新型卫星任务规划等技术挑战,同时也探讨了技术挑战中的理论问题和可能解决技术途径。

对这些技术挑战及其理论问题进行有效的数学建模和优化求解,可有助于推进卫星规划的相关研究和应用进展。同时,我们也希望本文的研究对于弥合卫星任务规划在理论研究和工程实践的分歧与差异、促进理论与实践的相互融合能起到积极作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Frank J, Jonsson A, Morris R, et al. Planning and Scheduling for Fleets of Earth Observing Satellites [A]. Proc. of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation and Space [C]. Montreal, 2002.
- [3] Barbulescu L, Howe A, Whitley D. AFSCN scheduling: How the problem and solution have evolved [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2006, 43 (9-10): 1023-1037.
- [4] Maurer E, Mrowka F, Braun A, et al. TerraSAR-X mission planning system: Automated command generation for spacecraft operations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48 (2): 642-648.
- [5] 贺仁杰, 高 鹏, 白保存, 等. 成像卫星任务规划模型、算法及其应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31 (3): 411-422.
- [6] Wu G, Wang H, Pedrycz W, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 113: 576-588.
- [7] Peng S, Chen H, Li J, et al. Approximate Path Searching Method for Single-Satellite Observation and Transmission Task Planning Problem [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017.
- [8] Bianchessi N, Righini G. Planning and scheduling algorithms for the COSMO-SkyMed constellation [J]. Aerospace Science and Technology, 2008, 12 (7): 535-544.
- [9] 李 军, 郭玉华, 王 钧, 等. 基于贪婪随机自适应过程的多类型卫星联合任务规划技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32 (10): 2162-2165.
- [10] Jung-Hyun L, Wang S M, Chung D, et al. Multi-satellite control system architecture and mission scheduling optimization [A]. Aerospace Conference [C]. IEEE, 2012: 1-13.

- [11] 姜 维, 庞秀丽, 郝会成. 成像卫星协同任务规划模型与算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (10): 2093-2101.
- [12] Iacopino C, Harrison S, Brewer A. Mission Planning Systems for Commercial Small-Sat Earth Observation Constellations [A]. Proceedings of the 9th International Workshop on Planning and Scheduling for Space (IWPS) [C]. 2015: 45-52.
- [13] Perea F, Vazquez R, Galan-Viogue J. Swath-acquisition planning in multiple-satellite missions: an exact and heuristic approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51 (3): 1717-1725.
- [14] Zhu X, Wang J, Qin X, et al. Fault-tolerant scheduling for real-time tasks on multiple earth-observation satellites [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26 (11): 3012-3026.
- [15] 杨正磊, 张海威, 王瑞花, 等. 应急条件下星地资源综合运用模式研究 [J]. 航天器工程, 2017, 26 (1): 6-11.
- [16] Lee J, Kim H, Chung H, et al. Genetic algorithm-based scheduling for ground support of multiple satellites and antennae considering operation modes [J]. Aeronautical & Space Sciences, 2016, 17 (1): 89-100.
- [17] Lee J, Kim H, Chung H, et al. Schedule Optimization of Imaging Missions for Multiple Satellites and Ground Stations Using Genetic Algorithm [J]. Aeronautical & Space Sciences, 2018, 19 (1): 139-152.
- [18] 祝江汉, 黄 维, 李建军, 等. 面向新任务插入的电子侦察卫星任务规划方法 [J]. 火力与指挥控制, 2011, 36 (7): 174-177.
- [19] 薛志家, 杨 忠, 李 晶, 等. 面向突发性事件的卫星自主任务规划 [J]. 指挥控制与仿真, 2015 (1): 24-30.
- [20] 郭 超, 熊 伟, 刘呈祥. 基于优先级与时间裕度的卫星应急观测任务规划 [J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56 (7).
- [21] Niu X, Tang H, Wu L. Satellite scheduling of large areal tasks for rapid response to natural disaster using a multi-objective genetic algorithm [J]. journal of disaster risk reduction, 2018, 28: 813-825.
- [22] Tangpattanakul P, Jozefowicz 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, 232 (2): 450-458.
- [23] 何 磊, 刘晓路, 陈英武, 等. 面向敏捷卫星任务规划的云层建模及处理方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38 (4): 852-858.
- [24] 刘 嵩, 陈英武, 邢立宁, 等. 敏捷成像卫星时间依赖型调度问题、模型与算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (3): 787-794.
- [25] 李志亮, 李小将, 王志恒. 敏捷卫星任务规划问题研究现状与展望 [J]. 装备学院学报, 2016 (2016 年 01): 69-75.
- [26] Chu X, Chen Y, Tan Y. An Anytime Branch and Bound Algorithm for Agile Earth Observation Satellite Onboard Scheduling [J]. Advances in Space Research, 2017, 2017 (1): 1-15.
- [27] Policella N, Oliveira H, Benzi E. Challenges in Designing an Automated System for Planning Spacecraft Activities [A]. Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), 2014 [C]. IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 1-8.
- [28] 何永明, 陈英武, 邢立宁, 等. 面向新型成像卫星自主任务规划系统设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39 (4): 806-813.
- [29] Zheng Z, Guo J, Gill E. Onboard autonomous mission re-planning for multi-satellite system [J]. Acta Astronautica, 2018, 145: 28-43.
- [30] Tipaldi M, Glielmo L. A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft [J]. IEEE Systems Journal, 2017.
- [31] Araguz C, Bou-Balust E, Alarcon E. Applying autonomy to distributed satellite systems: Trends, challenges, and future prospects [J]. Systems Engineering, 2018.
- [32] 苗 航, 林 鹏, 匡麟玲, 等. 自主运行地面站的微小卫星任务规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 522-524.
- [33] 何铭俊, 陆文高, 曾 鸿, 等. 一种卫星任务解译闭环仿真验证系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 271-274.
- [34] 赵军锁, 吴凤鸽, 刘光明, 等. 发展软件定义卫星的总体思路与技术实践 [A]. 2018 软件定义卫星高峰论坛会议摘要集 [C]. 2018.
- [5] 谢高岗. IP 网络性能测量技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2002.
- [6] 杨雅辉, 李小东. IP 网络性能指标体系的研究 [J]. 通信学报, 2002, 23 (11): 1-7.
- [7] 杨 峰. 网络性能测量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [8] 张建伟, 贾宏宏. IP 网络性能测试研究 [J]. 电信工程技术与标准化, 2003 (11): 64-66.
- [9] 戚晓晶, 胡晓宇. IP 网络性能测试综述 [J]. 中国新技术新产品, 2012 (5): 27-27.
- [10] 张业陵, 王绍棣. 网络性能测试工具浅析 [J]. 计算机工程与应用, 2002 (21): 179-180.
- [11] 吴 迪, 何兆祥, 赵小刚, 等. 想定环境中对战术互联网性
- 能评估方法的研究及实现 [J]. 兵工学报, 2008, 29 (9): 1069-1073.
- [12] 石 睿. 战术互联网的研究及其性能评估 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [13] 蒋 涛, 张 彬, 王世普. 分布式网络性能测试系统的设计与实现 [J]. 计算机应用, 2005, 25 (1): 192-195.
- [14] 赵 硕. 网络性能测试系统功能模块的 FPGA 实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [15] 张 彤, 田 辉, 高 巍. IP 网络性能测试系统的设计与实现 [J]. 西安科技大学学报, 2005, 25 (2): 216-219.
- [16] 王继龙, 吴建平. 大规模计算机网络性能监控模型的设计与实现 [J]. 计算机研究与发展, 2000, 37 (4): 443-452.

(上接第 124 页)