

# 可扩展性卫星任务规划系统的设计与实现

陈浩 景宁 唐宇 李军 杨剑

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要** 针对现有卫星任务规划系统可扩展性差的特点,设计并实现了一种类似于 HLA (High Level Architecture) 框架的可扩展性卫星任务规划系统 HES3 (High-Extensible Satellite Scheduling System)。为保证 HES3 的可扩展性,提出了基于专家系统和约束分离的卫星任务规划算法的两阶段规划处理机制。设计了基于类甘特图和 GIS (Geographic Information System) 视图的规划结果可视化人机交互接口。最后,通过一个应用实例说明了 HES3 的运行过程。

**关键词** 卫星任务规划,规划系统,可扩展性

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Design and Implementation of a High-extensible Satellite Scheduling System

CHEN Hao JING Ning TANG Yu LI Jun YANG Jian

(School of Electronics Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** For the poor extensible characteristics of existing satellites scheduling systems, a high-extensible satellite scheduling system named HES3 (High-Extensible Satellite Scheduling System) was designed and implemented based on the framework similar to High Level Architecture (HLA). A two-stage scheduling process which is composed of expert system and scheduling algorithm with constraints independence was proposed to promise the high-extensible character of HES3. Then a Graphical User Interface (GUI) was designed to illustrate the scheduling result in the form of a view similar to Gantt and a view based on Geographic Information System (GIS). Finally, a demonstration was conducted to show how HES3 works.

**Keywords** Satellites scheduling, Scheduling system, High-extensible

随着我国航天事业的发展,在轨对地观测卫星数量不断增多,需要对这些卫星资源进行统筹安排与规划。卫星任务规划就是在目标特性、卫星有效载荷特点、跟踪接收资源(地面站)等多种约束条件下,依据一定的优化准则,确定卫星工作模式和工作序列,实现星地资源的优化分配和均衡调整,达到满足用户需求最大化的目的。卫星任务规划具有信息种类多、信息量大、约束条件复杂等特点,为了减轻规划人员的工作量,提供辅助决策功能,需要建立智能化的卫星任务规划系统<sup>[1]</sup>。

卫星任务规划系统作为各种卫星规划方法的验证与应用平台,得到了美国航空航天管理局(NASA)、欧洲空间局(ESA)等国外权威机构的高度重视,已经建立了多个卫星任务规划系统,包括 ASPEN<sup>[2]</sup>, ADSNS<sup>[3]</sup>, ASTER<sup>[4]</sup>, SpaceCAPS<sup>[5]</sup>, AGATA<sup>[6]</sup>等。但上述各系统均是针对某一类特定型号的对地观测卫星进行任务规划,系统可扩展性、可移植性不强。对地观测卫星的发展通常是一个长期的过程,这就要求卫星任务规划系统既能兼容早期发射的卫星,也能适应未来卫星的载荷特性和约束条件,即要求卫星任务规划系统具有一定的可扩展性。

本文的主要工作在于:1) 提出了一种类似于 HLA 的可扩展性卫星任务规划系统体系框架;2) 设计了一种通用的卫星任务规划流程,包括引入专家系统进行数据分析与预处理,提出了基于精英解保留遗传算法的约束分离卫星任务规划方法;3) 设计了一种基于类甘特图和 GIS 视图的规划结果可视化表现方式,为规划人员提供更加友好的人机交互接口。最后通过一个应用实例演示了本文设计的可扩展性卫星任务规划系统原型系统。

## 1 系统框架体系设计

针对不同对地观测卫星载荷特性及约束条件存在一定差异的特点,为了兼容多种类型对地观测卫星任务规划特点,设计了类似于 HLA (High Level Architecture)<sup>[7]</sup> 资源松散耦合组织方式的可扩展性卫星任务规划系统 (High-Extensible Satellite Scheduling System, HES3)。

高层体系结构 HLA 是美国国防部为了解决美军在各个领域开发出来的各种仿真模型及各类仿真系统的互联和互操作问题而提出的一种新型分布式仿真协议。按照 HLA 接口规范实现的软件则称之为运行支撑平台 RTI (Run Time In-

到稿日期:2008-12-31 返修日期:2009-03-02 本文受国家自然科学基金(60604035)和国家 863 高技术资助项目(2007AA12Z229)资助。

陈浩(1982-),男,博士生,主要研究方向为智能控制技术、卫星规划调度技术,E-mail:chq118@126.com;景宁(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为空间信息系统与数据库技术、遥感与地理信息集成。

frastructure)。HLA 定义了一个通用的、灵活的、可伸缩的、可重用的仿真软件体系结构,实现了基于组件“即插即用”的分布式仿真思想。任何一个新成员的加入,只要在 RTI 架构中进行注册,就成为了 HLA 系统的一部分。RTI 的作用就是实现各个成员之间的无缝连接与资源共享。

HES3 采用 HLA 的架构组织思想,实现了类似 RTI 的星地资源组织网状体系架构。系统将所有参与规划的星地资源看成是 HLA 成员,在系统星地资源 XML 文档中对其进行分层次描述。描述项包括资源名称、资源类型、资源工况、资源约束、约束检测与修正方法等。系统启动初始化时,读取星地资源 XML 文档,并对所有星地资源逐一注册,形成星地资源网。HES3 星地资源网体系结构如图 1 所示。

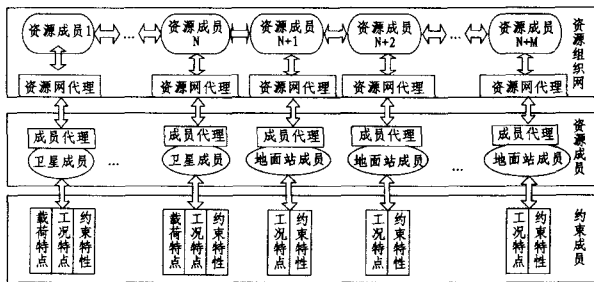


图 1 HES3 星地资源网体系结构

如图 1 所示, HES3 体系结构中采用分层的网状结构组织星地资源。资源成员层(包括卫星成员和地面站成员)描述所有卫星和地面站成员的元组信息,并通过成员代理与资源组织网层关联。资源组织网层类似于 HLA 系统中的 RTI 总线结构,采用网状关联模式将各个注册成功的卫星成员和地面站成员的各种信息组织关联起来。同时资源成员层通过各个卫星和地面站与约束成员层关联。约束成员层描述各卫星及地面站成员的工况特点及约束特性等。

如果有新的对地观测卫星或地面站需要加入到 HES3 系统,只需修改星地资源 XML 描述文件,加入新资源相应的工况特点及约束特性描述文件即可。系统将自动解析 XML 文件,并对新的星地资源进行注册,将其添加到星地资源网中,为后续卫星任务规划过程提供载荷信息、工况信息查询和约束信息检测与修正服务。

## 2 规划流程设计

HES3 任务规划流程设计如图 2 所示。规划过程中,首先获取卫星任务数据,然后进行任务规划计算,最后通过可视化的方式输出规划结果,为规划人员提供辅助决策支持。用户也可通过图形化的人机交互接口对规划结果进行调整,使之更加符合规划人员的预期目标。

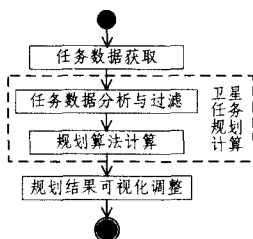


图 2 HES3 系统运行流程

为了保证 HES3 系统的可扩展性,卫星任务规划计算过

程采用两阶段任务规划处理机制(如图 2 所示)。第一阶段为任务数据分析与过滤阶段,第二阶段为规划算法计算阶段。下面将分别说明卫星任务两阶段规划计算过程中的关键技术。

### 2.1 任务数据分析与过滤

任务数据分析与过滤阶段是卫星任务数据预处理过程,引入了基于规则推理的专家系统来进行处理。为保证 HES3 的可扩展性,专家系统中使用的推理规则采用动态加载机制。HES3 星地资源网自动将卫星资源和地面站资源的载荷特点、工况特点与约束特性转化为专家系统可识别的推理规则,加载到专家系统规则库中;将卫星任务数据加载到专家系统事实库中。然后 HES3 以基于专家系统的推理过程完成任务数据的预处理工作,具体包括:

#### (1) 过滤无法完成的卫星任务

由于卫星载荷特点和约束条件的限制,某些任务是无法完成的。专家系统通过相应过滤规则删除这些无法完成的任务。一条典型的过滤规则如“[卫星类型]=可见光 & [太阳高度角]≤10 →过滤”。这条规则的含义是如果卫星载荷是可见光相机,且太阳高度角不大于 10 度,则过滤当前任务。太阳高度角低说明该任务的执行时间处于夜间,可见光卫星无法在夜间对目标成像,所以过滤该任务。这类规则由 HES3 星地资源网中描述的卫星约束特性自动生成。

#### (2) 分配必须完成的卫星任务

对于某些非常重要的任务,专家系统将依据分配规则直接进行任务分配。分配规则通常由规划人员预先设定。

#### (3) 确定卫星可使用的备选工作模式集合

对于某些载荷特性比较复杂的卫星(如 SAR 卫星、高光谱卫星或电磁探测卫星等),专家系统将根据工作模式推理规则推导出该任务的备选工作模式集合。不同类型的卫星使用的工作模式差别较大,这类规则根据 HES3 星地资源网中描述的卫星载荷特点自动生成。

关于上述工作的更加详细的讨论请参见文献[8]。针对上述业务需求,设计了基于 CLIPS 的卫星任务规划专家系统。CLIPS 是由美国航空航天管理局(NASA)开发的一种基于规则的通用专家系统开发工具,具有推理效率高、通用性强和可移植性好的特点,在航天领域中得到广泛应用<sup>[9]</sup>。基于 CLIPS 的卫星任务规划专家系统框架如图 3 所示,其核心部分是知识库、数据库、专家系统内核(推理机),其外围部分是知识获取、推理解释、数据处理和语法转换。其中知识库存放任务规划的求解知识包括任务规划的规则和相关事实;数据库主要存放初始任务信息、资源信息和由专家系统内核推理过程中自动产生的中间断言;专家系统内核基于 CLIPS 推理引擎实现其推理功能,负责知识的运用。

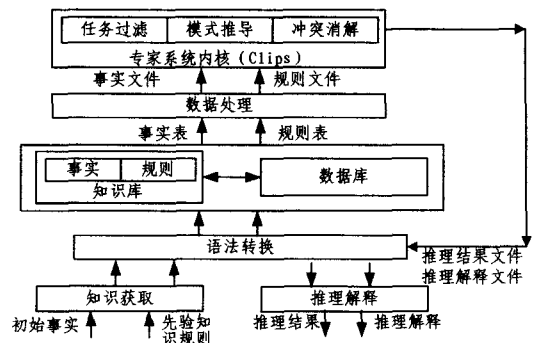


图 3 卫星任务规划专家系统框架

如图 3 所示,卫星任务规划专家系统推理的流程为:首先知识获取部分获取初始任务信息、资源信息及各种规则信息,经语法转换部分进行 CLIPS 语法转换后送入知识库存储。然后,数据处理部分从知识库中获取相应的事实表和规则表,生成专家系统内核所需的事实和规则 CLP 文件。最后,专家系统内核根据事实和规则文件,加载对应的事实和规则,依次进行任务检测过滤、卫星载荷工作模式决策和任务检测分配等推理,并对推理结果进行解释。

## 2.2 卫星任务规划算法

规划算法计算阶段为各卫星分配合适的任务,并为地面站和卫星安排合适的数传时段,使得综合收益最大。由于对地观测卫星规划问题是一个复杂的组合优化问题,因此调度算法多采用启发式方法<sup>[10]</sup>。遗传算法是模拟自然界生物繁衍、进化过程的启发式算法,已经广泛运用于复杂的函数极值问题、组合优化问题、规划调度问题等问题的求解。王钧<sup>[1]</sup>、Globus<sup>[11]</sup>等将进化计算运用到可见光卫星规划领域,取得了较好的效果。设计了基于精英解保留遗传算法的卫星任务规划算法来完成上述计算工作。算法框架伪码表示如图 4 所示。

算法输入: JOB

算法输出: JOB\_DO

begin

- ①问题编码,种群初始化,第二种群初始化为空集
  - ②从种群中选出 father1 和 father2, 执行交叉操作,将得到的 offspring1 和 offspring2 加入到第二种群。
  - ③如果第二种群染色体数量与种群染色体数量比值尚未达到交叉概率,则 goto ②
  - ④从第二种群中选择染色体执行变异操作。
  - ⑤如果第二种群变异染色体数量与第二种群染色体数量比值尚未达到变异概率,则 goto ④
  - ⑥利用选择算子将第二种群中染色体选出并替换掉种群中染色体,并进行精英解保持。
  - ⑦第二种群初始化为空集。
  - ⑧约束处理。
  - ⑨如果尚未达到算法结束条件, goto ②
  - ⑩解码,形成 JOB\_DO 序列。
- end

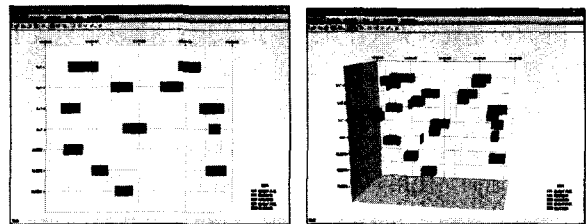
图 4 卫星任务规划算法框架伪码表示

图 4 中, JOB 表示卫星和地面站待规划的任务序列, JOB\_DO 是卫星对地观测工作序列、数传工作序列以及地面站接收工作序列,是卫星任务规划结果。遗传算法通过迭代方式搜索问题最优解,算法中个体适应值可由规划人员根据实际情况选择。在 HES3 卫星任务规划算法中,采用了 Globus<sup>[11]</sup>工作中使用的个体适应值选择方式。对于遗传算法迭代过程中产生的不可行解,采用解修正的方式将其转化为可行解。遗传算法将调用 HES3 星地资源网中各资源(包括卫星资源和地面站资源)约束特性中描述的约束检测及修正方法来实现该资源的解修正过程。卫星任务规划算法中的约束检测与修正机制采用了约束分离思想,将解修正过程与算法主流程分开。约束分离的设计思想保证了 HES3 系统的高扩展性和低耦合性。当新的资源加入到 HES3 中或某资源的约束特性发生了变化,只需修改资源描述文件,并重新注册该资源即可,而不必修改 HES3 卫星任务规划算法。

## 3 人机交互机制设计

卫星任务规划算法计算完毕后,将生成卫星对地观测工作序列、卫星数传工作序列和地面站接收工作序列。卫星对地观测工作序列定义了卫星观测传感器开关机时段、对地观测开始/结束时间及传感器工作模式等信息。卫星数传工作序列定义了卫星数传载荷开机时间、关机时间以及下传数据等信息,相对应的地面站接收工作序列包含卫星进站时间、出站时间、数据接收起始时间、数据接收结束时间等信息。设计了基于类甘特图和基于 GIS 的规划方案可视化表现方式来显示上述各工作序列,以便通过更加友好的人机交互接口为规划人员提供辅助决策支持。

甘特图以图形化的方式通过活动列表和时间刻度形象地表示出任何特定项目的活动顺序与持续时间。针对卫星对地观测工作序列、卫星数传工作序列和地面站接收工作序列设计了类似甘特图的可视化表现方式。一个典型的基于类甘特图表示的规划方案如图 5 所示。图 5 表示了 4 颗卫星和 3 个地面站的工作序列。图 5(a)是规划方案二维类甘特图显示,图 5(b)是规划方案三维类甘特图显示。



(a) 二维类甘特图规划方案显示

(b) 三维类甘特图规划方案显示

图 5 类甘特图规划方案显示

基于类甘特图的规划结果可视化表现方式的优点在于能非常直观地表现不同卫星及地面站工作序列与时间的关系。基于不同层次的二维、三维类甘特图规划结果表现方式可以为规划人员提供多视图、多角度的图形化决策支持界面。规划人员可在类甘特图界面上对卫星及地面站工作序列进行调整,包括增加(删除)卫星对地观测开关机时段、调整卫星现有对地观测开关机时段长度、变更卫星工作模式、增加(删除)卫星数传开关机时段、调整卫星现有数传开关机时段长度等。卫星数传工作序列发生变化后,地面站接收工作序列会发生相应的变化。规划人员进行调整后, HES3 将自动对调整后的规划结果进行约束检测。对违反约束的调整, HES3 将显示约束违反提示信息,并进一步给出可行的调整建议。

类甘特图可视化方式的弱点是难以有效表现卫星及地面站工作序列与观测目标空间位置的关系。于是设计了基于 GIS 的规划结果可视化表现方式作为类甘特图可视化表现方式的必要补充。

基于 GIS 的规划结果可视化表现方式采用商用电子地图控件 MapXtreme,生成卫星对地观测工作序列、卫星数传工作序列及地面站接收工作序列视图,以显示卫星对地观测过程相关信息<sup>[12]</sup>。电子地图背景选用高精度墨卡托投影的世界地图。规划人员也可在电子地图上调整规划方案,调整的过程与类甘特图可视化调整过程类似。一个典型的基于 GIS 可视化方式表现的规划方案如图 6 所示。图 6 显示了卫星 SAT-3 的轨道及对地观测目标信息。其中与 SAT-3 轨道

颜色相同的目标是 SAT-3 对地观测工作序列中包含的目标。SAT-3 卫星轨道中红色加粗的弧段表示卫星在该弧段将执行数传动作,地面站 1 和地面站 3 将执行相应的数据接收任务。

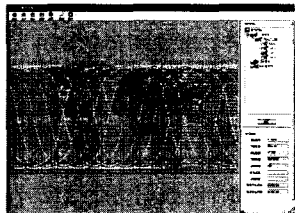


图 6 GIS 规划结果图形化显示

#### 4 应用实例

在本节中,将通过一个应用实例说明 HES3 系统的运行流程。假定有 4 颗卫星和 3 个地面站参与规划。系统运行过程如图 7 所示。图 7(a)是 HES3 数据获取界面。获取的任务规划批号为 92,任务规划时段为 2008-12-22 8:00 至 2008-12-22 22:00。该批任务包含 4 颗卫星的 100 条对地观测任务和 3 个地面站的 18 条数传任务。图 7(b)和图 7(c)分别是对地观测任务和数传任务经过专家系统数据分析及过滤后的结果。图 7(d)是规划算法计算结果显示。规划算法共生成了 3 组备选方案,并给出了各组方案的评价值,包括执行的的对地观测任务数、方案综合评价、对地观测任务规划评价、数传任务规划评价、卫星任务完成度、地面站任务完成度、卫星使用时长、地面站使用时长等指标。同时以多视图(包括数据视图、类甘特图视图和 GIS 可视化视图)的方式给出每一组规划方案的详细评价信息以及观测任务执行信息和数传任务方案信息等。规划人员可根据实际情况选定一组规划方案,并可对其进行人工调整(详见第 3 节),以确定为最终的规划结果。规划人员可通过“系统参数维护”和“约束管理”调整 HES3 系统运行参数,管理并维护 HES3 星地资源网。

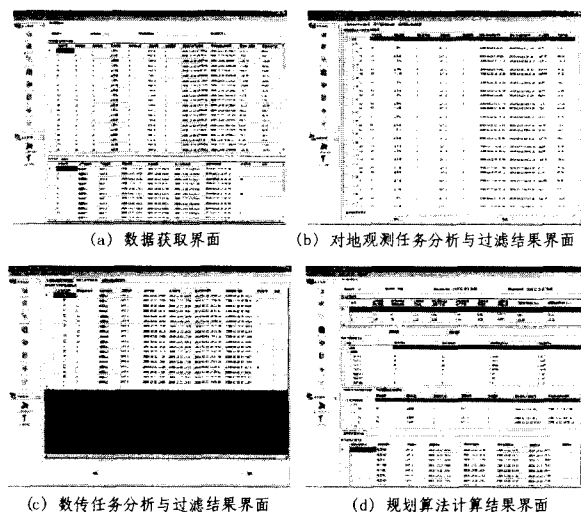


图 7 系统运行界面显示

**结束语** 本文针对现有卫星任务规划系统可扩展性、可移植性不强的特点,提出了一种类似于 HLA 的可扩展性卫星任务规划系统体系框架。依据此框架,设计并实现了可扩展性卫星任务规划系统 HES3。详细讨论了 HES3 系统卫星任务规划流程中的关键技术和图形化的人机交互接口。最后,通过一个应用实例说明了 HES3 的运行过程。下一步的

工作在于:

(1)可将 HES3 扩展到计算机集群上,研究相应的并行规划计算及协调机制,提高 HES3 的计算性能。

(2)可将卫星任务规划算法模块扩展成卫星任务规划算法库。算法库中可包含多种算法,如贪婪规划算法<sup>[13]</sup>、禁忌搜索规划算法<sup>[14]</sup>、拉格朗日松弛规划算法<sup>[15]</sup>等。HES3 可依据规划人员要求(计算时间要求、规划效果要求)以及问题规模等因素自主从算法库中选择相应算法,完成规划计算。

#### 参考文献

- [1] 王钧. 成像卫星能够综合任务调度模型与优化方法研究 [D]. 长沙:国防科技大学,2007
- [2] Chien S, Rabideau G, et al. ASPEN-Automated Planning and Scheduling for Space Mission Operations [C]// Proceeding of the SpaceOps 2000. Toulouse, France, 2000
- [3] Johnston M, Clement B. Automating Deep Space Network Scheduling and Conflict Resolution [C]// Proceeding of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Hokkaido, Japan, 2006
- [4] Muraoka H, Cohen R, et al. Aster Observing Scheduling Algorithms [C]// Proceeding of the SpaceOps 98. Tokyo, Japan, 1998
- [5] Mohammed J. SpaceCAPs: Automated Mission Planning for the Techsat-21 Formation-Flying Cluster Experiment [C]// Proceeding of the 15th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference. Florida, USA, 2002
- [6] Verfaillie G, Charneau M. A Generic Modular Architecture for the Control of an Autonomous Spacecraft [C]// Proceeding of the 5th International Workshop on Planning and Scheduling for Space. Baltimore, USA, 2006
- [7] Kuhl F, Weatherly R, et al. Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture [M]. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2000
- [8] 刘晓娣, 李军, 陈浩, 等. 多卫星综合任务规划中的冲突消解 [J]. 电光与控制, 2008, 15(10): 10-15
- [9] 郑永煌, 等. 基于 CLIPS 的航天发射决策支持系统 [J]. 宇航学报, 2006, 27(1): 117-120
- [10] Verfaillie G, Lemaitre M. Tutorial on Planning Activities for Earth Watching and Observation Satellites and Constellations: from Off-line Ground Planning to On-line On-board Planning [C]// Proceeding of the 16th International Conference on Automated Planning and Scheduling. Cumbria, UK, 2006
- [11] Globus A, Crawford J, et al. A Comparison of Techniques for Scheduling Earth Observing Satellites [C]// Proceeding of the 16th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. San Jose, USA, 2004
- [12] 李军, 何川东, 郭玉华, 等. 成像卫星任务规划可视化仿真系统实现技术 [J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(6): 39-41
- [13] DeFlorio S, et al. Optimal Operations Planning for SAR Satellite Constellations in Low Earth Orbit [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations. Darmstadt, Germany, 2005
- [14] Bianchessi N. Planning and Scheduling Problems for Earth Observation Satellites: Models and Algorithms [D]. 2006
- [15] Lin W C, et al. Daily Imaging Scheduling of an Earth Observation Satellite [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: system and humans, 2005, 35(2): 213-223