



贺仁杰 李菊芳 姚 锋 邢立宁 著

成像卫星任务规划技术



科学出版社

成像卫星任务规划技术

贺仁杰 李菊芳 姚 锋 邢立宁 著

国防科技大学学术专著出版基金资助

科学出版社

北京

内 容 简 介

随着我国成像卫星数量及其应用需求的快速增长,成像卫星任务规划技术受到了日益广泛的重视。本书系统阐述了作者近年来在卫星任务规划技术方面的研究成果,主要内容包括成像卫星任务规划问题、任务规划理论基础、预处理技术、多星一体化任务规划技术、动态任务规划技术、自主任务规划技术和多星联合任务规划系统等,具有实际应用价值和一定的前瞻性。

本书可作为相关领域管理人员、工程技术人员及广大科技工作者研究学习的参考,也可作为卫星应用工程实践的依据。

图书在版编目(CIP)数据

成像卫星任务规划技术/贺仁杰等著. —北京:科学出版社,2011
ISBN 978-7-03-029777-8

I. ①成… II. ①贺… III. ①卫星图象-研究 IV. ①TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 247406 号

责任编辑:任 静 王志欣 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

深海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2011 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/2

印数:1—2 500 字数:276 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序


自1970年我国成功发射第一颗人造卫星“东方红1号”后,就把研制、发展、应用卫星作为空间技术发展的主要方针。目前空间技术在国防、经济等领域的应用面逐步扩大,并取得了重大效益,在增强国防实力,提高中国国际地位方面,正发挥着越来越大的作用。

成像卫星主要是通过星载光学、电子等遥感设备获取地面目标图像信息的卫星,具有侦察面积大、范围广、速度快,可定期或连续观测一个地区而不受国界和地理条件限制等优点。因此,成像卫星已成为现代作战指挥系统和战略武器系统的重要组成部分,并在海湾战争等现代战争中,显示出了巨大的作用和潜力。与此同时,成像卫星作为遥感卫星的主要种类,在土地森林和水资源调查、农作物估产、矿产和石油勘探、海岸勘察、地质与测绘、自然灾害监视、农业区划以及对环境的动态监测等方面也发挥了巨大作用。

成像卫星任务规划是成像卫星管理控制的核心内容,是提高卫星系统使用效益的关键,也是管理科学与工程领域的重要研究和应用方向之一。在未来多星组网实施对地观测的条件下,通过任务规划和优化调度,能够更好地利用成像卫星遥感器资源,对及时、准确获取尽量多有价值的图像信息具有至关重要的作用。

国防科技大学的贺仁杰等同志在多年研究工作的基础上,撰写了《成像卫星任务规划技术》一书,它是作者多年研究成果的提炼和结晶,是目前国内第一部系统、深入论述成像卫星任务管理技术研究成果的著作。该书将理论和实践有机地融合在一起,其研究成果已应用于卫星应用工程实践,所提出的卫星自主任务规划技术等则与我国航天事业的快速发展相适应,具有前瞻性和实际应用价值,可作为相关领域广大科技工作者研究学习的参考,也可作为卫星应用工程实践的依据。

该书在写作上结构严谨,文笔流畅,逻辑性强,具有很好的可读性和适用性。我相信,该书的出版必将会对卫星任务规划技术的发展及相关研究工作起到积极的推动作用。



2010年9月于北京

前 言

对地观测卫星是利用星载光电传感器或无线电设备等有效载荷,从飞行轨道上对地面、海上或空中目标实施观测并获取目标信息的人造地球卫星,具有运行时间长、观测范围广、不受空域国界限制、无须考虑驾驶人员生命安全问题等优势。成像卫星是对地观测卫星中发展最早、发射数量最多的一种,星上有效载荷主要是可见光相机、红外相机或合成孔径雷达(SAR)等成像设备,其任务是根据业务用户的需求来获取地面感兴趣目标的图像。

随着成像精度的不断提高,成像卫星正逐渐成为军事侦察、防灾减灾、资源勘察、反恐维稳、地区冲突等行动中获取情报信息的主要手段,相应的用户对成像卫星的需求也日益增多,这就要求能对卫星资源进行合理分配,以实现在有限的时间内最大限度地满足不同用户、不同优先级的图像需求。与此同时,现代小卫星技术的不断发展使得多星组网逐渐成为卫星应用的主要方式,这也使得卫星成像计划编制的难度大大增加,以往那种手工或单星计划模式不能很好地满足未来成像卫星应用的需要,必须借助于适当的数学模型和软件工具才能较好地管理和分配卫星资源。

本书正是在这样一种背景下,重点针对前述问题,系统阐述了作者多年来在成像卫星任务规划技术方面积累的研究成果。本书主要面向管理科学与工程及遥感应用领域相关专业的研究生、科研工作者和工程技术人员,在编写过程中力求从应用实践出发,结合当前技术现状和未来的发展,扩展读者的视野和知识面,并为相关领域科研技术人员提供有实用价值的参考。

本书共分9章,主要内容有绪论、成像卫星任务规划问题、成像卫星任务规划理论基础、成像卫星任务规划预处理技术、多星一体化任务规划技术、卫星动态任务规划技术、卫星自主任务规划技术、多星联合任务规划系统、新的研究领域等,其中既包括了当前卫星应用的工程实践,也包括了部分前瞻性研究成果。第1章~第3章由贺仁杰编写,第5章、第6章由李菊芳编写,第4章、第8章由姚锋编写,第7章、第9章由邢立宁编写,贺仁杰负责全书的主编和统稿工作。

本书的撰写离不开阮启明博士、白保存博士、王军民博士、张正强博士等的无私奉献,他们为本书提供了很多素材,书中也包含了他们的一些研究成果。此外,龙运军博士协助完成了初稿的统稿工作。在此向他们表示衷心的感谢!

在撰写本书的过程中,我们参阅了大量的文献,书中所附的主要参考文献仅为其中的一部分,在此向所有列入和未列入参考文献的作者们表示衷心感谢!

本书在撰写过程中还得到了谭跃进教授、陈英武教授的关心和支持。徐雪仁高工和白鹤峰高工审阅了全书,并提出了中肯的修改意见。此外,本书的出版还受到了国家自然科学基金项目(编号 70601035、70801062)的支持和国防科技大学学术专著出版基金的资助,在此一并表示感谢!

限于作者的水平,书中难免有不妥与疏漏之处,敬请读者不吝赐教。

作者

2010年9月于长沙

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 成像卫星任务规划问题研究的背景和意义	1
1.2 成像卫星任务规划问题研究现状	2
1.2.1 单星任务规划	3
1.2.2 多星任务规划	5
1.2.3 动态任务规划	7
1.2.4 自主任务规划	8
1.2.5 任务规划算法	10
1.2.6 研究现状总结	12
1.3 本书的主要内容和安排.....	14
参考文献	15
第 2 章 成像卫星任务规划问题	19
2.1 成像卫星工作过程.....	19
2.1.1 对地成像覆盖	19
2.1.2 成像卫星地面业务应用系统任务处理流程.....	20
2.2 影响成像卫星任务规划的主要因素.....	22
2.2.1 用户对成像任务的需求	22
2.2.2 卫星成像资源的可获得性.....	23
2.3 成像卫星任务规划的基本输入要素.....	23
2.3.1 成像任务需求	23
2.3.2 卫星及有效载荷	24
2.3.3 其他输入条件	24
2.4 成像卫星任务规划的基本约束条件.....	25
2.4.1 资源约束.....	25

2.4.2 任务约束·····	26
2.5 成像卫星任务规划的基本输出要素·····	26
2.6 成像卫星任务规划问题研究的假设与过程·····	27
2.6.1 问题假设与简化·····	27
2.6.2 问题求解过程·····	28
参考文献·····	29
第3章 成像卫星任务规划理论基础 ·····	30
3.1 机器调度问题的基本分类·····	30
3.1.1 机器调度问题概述·····	30
3.1.2 资源、活动和调度目标·····	31
3.1.3 机器调度问题分类·····	31
3.2 智能优化算法·····	32
3.2.1 遗传算法·····	33
3.2.2 禁忌搜索算法·····	37
3.2.3 模拟退火算法·····	40
参考文献·····	41
第4章 成像卫星任务规划预处理技术 ·····	43
4.1 成像卫星任务规划预处理的一般过程·····	43
4.1.1 常见的成像任务类型·····	43
4.1.2 任务规划预处理的一般流程·····	44
4.1.3 任务规划预处理结果示例·····	45
4.2 周期性任务分解技术·····	47
4.2.1 时间特征的周期性任务分解·····	47
4.2.2 事件特征的周期性任务分解·····	48
4.3 区域目标静态分解技术·····	49
4.3.1 依据单景分解·····	49
4.3.2 采用预定义的参考系统分解·····	49
4.3.3 采用固定宽度的条带进行分解·····	50
4.3.4 静态区域目标分解技术的不足·····	51
4.4 基于高斯投影的区域目标动态分解技术·····	52
4.4.1 区域目标投影策略·····	52

4.4.2 基于高斯投影的区域目标动态分解过程	52
4.5 基于 MapX 的区域目标动态分解技术	57
4.5.1 卫星对地面覆盖区域的计算	57
4.5.2 基于 MapX 的区域目标动态分解方法	61
参考文献	62
第 5 章 多星一体化任务规划技术	64
5.1 问题分析	64
5.1.1 点目标和区域目标的综合调度	64
5.1.2 成像卫星调度中的任务合成	66
5.2 多星一体化调度问题建模	69
5.2.1 元任务构造	69
5.2.2 合成任务定义及分析	70
5.2.3 收益函数构造	73
5.2.4 多星一体化调度模型	75
5.2.5 多星一体化调度模型分析	79
5.3 基于整体优化策略的问题求解	82
5.3.1 基于整体优化策略算法的基础组件	82
5.3.2 任务动态合成启发式算法	91
5.3.3 快速模拟退火算法	94
5.4 实例分析	101
5.4.1 测试问题实例构造	101
5.4.2 对点和区域目标的综合调度与分阶段调度的比较	102
5.4.3 任务动态合成与预先合成的比较	103
5.4.4 快速模拟退火算法与动态合成启发式算法的比较	104
5.4.5 目标分布特性对调度结果的影响分析	106
5.4.6 各种机制对快速模拟退火算法性能的影响分析	108
参考文献	109
第 6 章 卫星动态任务规划技术	112
6.1 成像卫星调度问题的动态特性	112
6.2 动态环境下成像卫星的鲁棒性调度	113
6.2.1 调度方案的鲁棒性概念	113

6.2.2	成像卫星鲁棒性调度的要求	114
6.2.3	成像卫星鲁棒性调度策略	115
6.3	成像卫星鲁棒性调度模型	115
6.3.1	成像卫星调度方案的评价指标	116
6.3.2	成像卫星鲁棒性调度模型	118
6.4	成像卫星鲁棒性调度模型求解	121
6.4.1	基于偏好的分层多目标遗传算法	121
6.4.2	PHMOGA 算法设计	123
6.4.3	遗传操作的可行性分析	133
6.4.4	计算实例	135
6.5	成像卫星动态调度方法	140
6.5.1	成像卫星动态调度问题	140
6.5.2	成像卫星动态调度模型	142
6.5.3	动态插入任务启发式算法	143
6.5.4	计算实例	151
	参考文献	156
第 7 章	卫星自主任务规划技术	158
7.1	分布式卫星系统自主规划问题	158
7.1.1	分布式卫星系统自主规划问题定义	158
7.1.2	星群任务规划问题及其特点	159
7.1.3	卫星自主控制问题及其特点	160
7.2	分布式卫星系统任务规划框架	161
7.2.1	分布式卫星系统 MAS 模型	161
7.2.2	成像卫星 Agent 的分层混合结构模型	166
7.2.3	基于 MAS 的任务规划框架	167
7.3	基于多 Agent 协商的星群任务规划	172
7.3.1	基于 MAS 的星群任务规划问题形式化描述	172
7.3.2	协商协议	173
7.3.3	招标任务选择策略	177
7.3.4	投标方投标方法	178
7.3.5	招标方评标策略	178

7.3.6 面向动态环境的任务处理	179
7.3.7 计算实例分析	185
7.4 基于 HTN 规划的成像卫星自主控制	189
7.4.1 成像卫星自主控制问题求解框架	189
7.4.2 成像卫星自主规划模型	191
7.4.3 基于 HTN 规划的模型求解	197
7.4.4 计算实例分析	202
参考文献	205
第 8 章 多星联合任务规划系统	207
8.1 系统总体框架设计	207
8.1.1 多星联合任务规划系统总体框架	207
8.1.2 多星联合任务规划系统整体流程	208
8.2 系统实现	210
8.2.1 采集任务单接收与处理子系统	210
8.2.2 卫星及地面站资源管理子系统	210
8.2.3 多星任务规划子系统	212
8.2.4 单星计划编排子系统	213
8.2.5 计划仿真推演子系统	213
8.2.6 任务规划方案评估子系统	213
第 9 章 新的研究领域	215
9.1 灵巧卫星成像任务规划	215
9.2 成像卫星在线调度问题	217

第 1 章 绪 论

1.1 成像卫星任务规划问题研究的背景和意义

成像卫星是利用星载传感器从太空中获取地面图像信息的对地观测卫星^[1],具有覆盖范围广、运行时间长、不受国界和空域限制、无须考虑人员安全等独特优势。成像卫星主要分为光学成像卫星和雷达(微波)成像卫星两大类,光学成像卫星采用可见光、红外、多光谱相机成像,而雷达成像卫星采用 SAR 传感器进行成像。可见光成像卫星具有空间分辨率高等优点,但不能全天候、全天时工作;雷达成像卫星不受白天、黑夜及云雾的影响,具有一定的穿透能力^[2]。目前,成像卫星在灾害防治、环境保护、城市规划及农业、气象等许多领域都发挥了重要作用,也得到了世界各国的高度重视^[1~6]。

1960 年 8 月,美国成功地发射了世界上第一颗用于军事侦察的成像卫星,使得战争中的侦察手段发生了质的变化。锁眼系列照相侦察卫星就是美国 60 年代开始使用的侦察卫星,主要有 KH-1、4、5、6、7、8、9、11、12 等 9 种型号,分辨率由 3~5m 发展到 0.1m。美国也在大力发展雷达成像卫星,“长曲棍球”雷达成像卫星可全天候、全天时进行观测,图像分辨率达到 0.3~1m。

法国自 1986 年至 2002 年发射了 5 颗 SPOT 系列的卫星,并与欧盟其他国家共同发射了 2 颗高分辨率光学成像卫星,即 Pleiades 卫星计划。德国国防部研制了 5 颗 SAR-Lupe 小型雷达卫星,其分辨率估计可达到 0.5m。此外,印度、以色列、日本、韩国等国家也在大力发展军事及民用的成像卫星。

我国已经发射了多颗成像卫星,如与巴西合作的 CBERS 系列卫星,最高分辨率能够达到 4m;另外,还有用于环境监测的 HJ 系列卫星等。这些成像卫星在军事、民用方面发挥了重要作用,其观测能力越来越强,地面分辨率也越来越高。

在实际应用中,对卫星实施成像的管控流程大致如下:首先由用户提出成像任务请求,成像卫星地面任务管理系统根据成像任务属性信息(目标位置、分辨率和优先级等)、卫星属性信息(卫星轨道预报、卫星有效载荷状态等)和约束条件(能量约束、侧视角约束、太阳高度角约束、云量约束、相机开关机时间约束、侧视次数约束、星载存储器容量约束等)进行任务规划;然后依据任务规划结果生成载荷控制指令,在确认无误后,经由地面测控设备将载荷指令发送至成像卫星,由成像卫星执行指令;再将获得的影像数据发送给地面接收设备,由其他地面应用系统进行处

理,最后将处理后的数据发送给用户。对卫星实施成像的管控过程通常都具有周期性。

从以上卫星实施成像过程中可以看出,任务规划在整个成像卫星业务应用过程中起着关键的作用,主要解决如何对多颗卫星资源进行有效的分配与调度,制定卫星的观测计划,以最大限度地完成用户提交的任务,其结果直接影响到成像卫星系统的任务执行效果。

在成像卫星技术发展之初,由于卫星载荷能力有限,用户任务也相对较少,任务的成像时间和成像角度都相对固定,卫星管理控制比较简单,任务规划问题也不突出。随着成像卫星技术的发展和地面影像数据需求的增加,卫星开始需要调整遥感设备的侧视角度选择地面目标进行成像,在安排成像过程中必须考虑多种成像约束以保证卫星安全可靠地运行和成像计划的顺利实施。由于成像卫星高速运行于近地轨道,所以对地面实施成像都受到卫星同目标的可见时间窗限制,又由于卫星成像设备在一定时间内姿态调整的能力有限,在成像任务之间进行动作转换需要满足多种约束条件。一般而言,不能对一次任务规划时间范围内所有的任务请求进行成像,卫星每次执行的任务是任务数据集合的一个子集,不能满足用户提出的所有任务请求。

为了缓解这种供求矛盾,越来越多的成像卫星出现在空间中执行对地观测的任务。但是尽管在轨运行的卫星数量不断增加,相对于迅速增长的影像数据需求,有限的成像卫星资源仍然显得异常宝贵。为了充分利用成像卫星资源,需要针对用户成像需求,对多颗成像卫星进行统一管理,均衡考虑各种因素,传统的手工或简单的推理计算已不能满足卫星日常管理和指挥控制的需求,必须借助于适当的数学模型和软件工具才能较好管理和分配卫星资源,以最大化满足用户日益增长的成像需求。

虽然目前已有一些有关卫星任务规划问题的研究和相关软件系统(有关这些研究在下节将详细介绍),但这些研究都缺乏问题分析、模型、算法以及最终软件系统的完整分析,并且大多数研究都同具体卫星系统及任务密切相关,不能很好地满足我们的实际需要。随着用户成像需求的日益增加、卫星数量的增加、不同类型的成像卫星的出现(如自主卫星),成像卫星任务规划技术显得更加重要。基于此,本书针对不同任务情形下的成像卫星任务规划问题进行研究,力求形成一系列有效的成像卫星任务规划技术。

1.2 成像卫星任务规划问题研究现状

随着成像卫星的发展,成像卫星任务规划问题也逐渐引起重视。目前,国内外已经开展了很多成像卫星任务规划问题的研究。

1.2.1 单星任务规划

国内外关于单星任务规划的研究比较多,本节将从国外研究现状和国内研究现状两个方面来综述单星任务规划技术的研究现状。

1. 国外研究现状

按照任务类型分类,可分为面向点目标的成像卫星任务规划与面向区域目标的成像卫星任务规划问题。点目标相对较小,通常是一个较小的圆形或矩形区域,能够被成像卫星单次观测完成。区域目标通常是一个较大的区域,需要卫星多次观测才能完全覆盖。

1) 面向点目标的单星任务规划

成像卫星任务规划问题涉及计算机科学、运筹学及人工智能等多个学科,不同领域的研究人员分别从不同角度提出了各自的建模方案。主要有数学规划模型、约束满足模型、序列决策模型、基于图论的模型及将问题映射为车间调度问题、多维背包问题而建立的模型等^[7~12]。

Bensana 等^[13]和 Gabrel^[14]在研究 SPOT 5 卫星日常任务规划时,通过简化某些约束,建立了整数规划模型。Song 等^[12]研究了单颗成像卫星在一个地区内有多个相互冲突的任务需求时如何选择一个合适的场景,使每个可见时间窗的收益最大,建立了非线性规划模型。

Wolfe 等^[15]研究了每个任务只有一个时间窗的成像卫星任务规划问题,将成像卫星任务规划问题映射为带时间窗约束的背包问题,建立了相应的整数规划模型。Vasquez 等^[16]将 SPOT 5 卫星的日常规划映射为背包问题,建立了约束满足问题模型。Pemberton 等^[17,18]建立了约束满足问题模型,使用 ILOG Solver/Scheduler 执行基于约束传播的求解机制,开发了商业化卫星任务规划系统 GREAS。Nicholas 等^[19]将单星任务规划问题看作单机调度问题,建立了相应的整数规划模型。

以上研究大多基于一些简化模型,忽略了卫星的某些实际运行约束。例如, Wolfe 等^[15]和 Nicholas 等^[19]的研究中均没有考虑存储容量的限制和数据传输任务。Bensana 等^[13]和 Vasquez 等^[16]考虑了存储容量的限制,但没有考虑数据传输任务。

此外,还出现了一些针对具体卫星的专用任务规划系统,如美国国家航空航天局(NASA)针对 Landsat 7 卫星设计的规划系统^[20]、EO-1 卫星的 ASPEN 系统^[21]、ASTER 调度系统^[22]以及美国 Orbit Logic 公司为 OrbView-3 卫星开发的 OrbView Tasking System 等^[23]。这些专用系统都是同具体的应用卫星相关联的,模型设计同具体星载设备密切相关,不具有—般性和通用性,不能直接应用于

其他的卫星系统。例如,在 ASTER 调度系统中,星上各观测设备是独立考虑的,每个设备被分配固定存储空间,如果某个设备不使用其存储资源,该资源也不能为其他设备利用,从而不能实现最优规划结果。

2) 面向区域目标的单星任务规划

区域目标通常是一个较大的区域,需要卫星多次观测才能完全覆盖。面向区域目标的成像卫星任务规划问题的研究工作起步较晚,目前国外仅有美国麻省理工大学的 Walton^[24]、美国 NASA 喷气推进实验室(JPL)的 Cohen^[25]、法国欧空局的 Lemaître 等^[26,27] 和澳大利亚国防部的 Rivett 等^[28] 进行了一定研究。

Walton^[24] 研究了面向单个区域目标的成像卫星任务规划问题,将问题分解成区域目标分解和观测活动排序两个子问题,将区域目标分解映射为集合覆盖问题(set covering problem, SCP),以最小化场景数为原则,将区域目标分解为互不重叠且大小相等的场景。将观测活动排序子问题映射为旅行商问题,并构造了整数规划模型。Walton^[24] 分别采用最近邻点法(nearest neighbor)、多片断(multiple fragment)、最小生成树(minimum spanning tree)以及基于 2-Opt 和 2-H-Opt 型邻域的局部搜索算法求解面向单个区域目标的单星规划问题。其区域目标分解方法不适合推扫式遥感器,任务规划模型与算法只能处理范围较小的区域目标。另外,其模型和算法都比较简化,没有考虑多星、多区域目标以及星载遥感器与区域目标有多个可见时间窗的情况。

Cohen^[25] 研究了单星对多个区域目标的任务规划问题,但是没有给出区域目标分解、数学模型及求解算法的详细内容。其在文献中指出下一步研究方向将是多星对区域目标的联合调度。

Lemaître 等^[26,27] 研究了灵巧卫星(agile earth observing satellite, AEOS)对区域目标的观测调度问题:首先将区域目标分解成为一系列相互紧邻、互不重叠的条带;然后以对区域目标的最大覆盖为优化目标建立了约束满足问题模型。Lemaître 等^[26,27] 比较了贪婪、动态规划、约束规划及局部搜索等四种算法,研究表明,仅考虑线性约束的情况下,动态规划算法效果较好,贪婪算法速度快但得到的结果较差,而局部搜索算法在考虑所有约束的情况下性能最好。Lemaître 等只考虑了卫星单次过境的情况,没有考虑卫星多次过境以及多星协同的情况。

除了以上理论研究外,目前许多卫星的调度系统也能在一定程度上满足对区域目标的观测需求。这些系统采用预先定义的参考系统对区域目标进行分解,将区域目标分解为多个单景,然后将这些分解结果看作点目标进行调度。例如,美国 Space Imaging 公司依据全球参考系统(worldwide reference system, WRS)规划 Landsat 卫星的观测活动。该参考系统以 Path/Row 坐标系表示,观测某个区域目标时,需要根据 WRS 选择与区域目标相关的场景进行调度。法国 SPOT 卫星采取的是网格参考系统(grid reference system, GRS),该参考系统以 K/J 坐标系

表示。2003年发射的印度 ResourceSat-1(IRS-P6)卫星也采用了类似的区域目标分解方法。预定义的参考系统没有依据不同卫星的参数特点对区域分解,不能充分发挥遥感资源的性能,因此,也会影响卫星对区域目标的观测效率。

由上可知,将区域目标分解为互不相交的点或条带,能够简化问题,并采用卫星对点目标的调度模型与算法求解,但出于提高卫星对区域目标观测效率的考虑,特别是多颗卫星对区域目标联合观测时,必须采取更加有效的分解方法。

2. 国内研究现状

国内在成像卫星任务规划领域从事研究的单位主要有:中国电子科技集团公司第五十四研究所^[29,30]和中国人民解放军国防科学技术大学^[31~39](以下简称国防科技大学)等。

第五十四研究所针对单颗卫星的日常规划开发了卫星照相规划管理软件,综合用户需求、轨道特性、有效载荷特性、信息传输机制等条件,利用可视化的分析决策设计思路规划卫星成像活动。该软件依靠规则进行决策分析,为计划编制人员提供决策辅助支持。该软件同具体卫星相关,卫星只执行星下点照相,不考虑遥感器姿态调整,也不考虑区域目标的成像需求,而且卫星成像计划的编制工作主要是依靠调度人员手工进行。

国防科技大学贺仁杰^[34]研究了面向点目标的成像卫星任务规划问题,将其看作具有时间窗约束的多机调度问题,建立了混合整数规划和约束满足两种模型,并设计了相应的求解算法,模型中忽略了与数据存储和数据下传相关的约束。李菊芳^[35]进一步考虑了数据存储和下传的情况,采用约束规划混合建模思想,建立了混合约束规划模型。王均^[36]研究了全局优化模式下成像卫星综合任务规划问题,建立了数学规划模型,对基于阶段优化模式下的调度问题建立了有向图模型。张帆^[37]对面向点目标的单星任务规划问题进行分析,采用图论思想建立了卫星成像多目标最短路径模型。

1.2.2 多星任务规划

本节也从国外研究现状和国内研究现状两个方面来综述多星任务规划技术的研究现状。

1. 国外研究现状

在多星任务规划方面,NASA及欧洲航天局ESA分别对此进行了一些研究。Globus等^[40]建立了多星任务规划的约束满足问题模型,并考虑了任务需求的优先级及每颗卫星具有多个遥感设备的约束条件;但没考虑卫星的存储容量限制,也没给出求解的具体算法。

Morris 等^[41]提出了一种基于模型的多星任务规划方法,并开发了 DESOPS (distributed earth science observation planning and scheduling)的原型系统,文献表明其模型和算法尚未实现,研究正在进行之中。

欧空局针对“宇宙-星团”(Cosmo-Pleiades)计划,开展了卫星星座的任务规划研究。其中,Cosmo-Skymed 星座包含 4 颗 SAR 卫星,Pleiades 星座包括 2 颗光学成像卫星。文献[42]~[44]针对两个星座分别建立了规划模型,并采用禁忌搜索、启发式等算法进行求解。

美国的一份 AD 报告在关于情报侦察任务规划问题的研究中,不仅考虑了多颗成像卫星,还试图同时考虑来自海、陆、空的无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)等多种侦察设备,建立了多种侦察资源进行联合侦察的数学模型,并给出了三种优化目标,即未完成的侦察任务数量最小化、侦察设备的空闲时间最小化以及未达到任务要求的最低分辨率的差值最小化。

目前还有一些成像卫星任务规划的商用软件,主要有美国 Veridian 公司的通用资源、事件和活动的调度系统(generic resource event and activity scheduler, GREAS)和美国 AGI (Analytical Graphics Inc)公司的卫星工具包(satellite tool kit, STK)的调度模块 STK/Scheduler。这些软件具有一定的多星任务规划能力,但扩展性较差,定义并处理新约束困难,难以适应其他卫星系统,必须由其所属公司进行再次开发。

在多星任务应用需求的推动下,还出现了一些功能更强大的多星任务规划原型系统,如美国 Space Imaging 和 Orbit Logic 联合开发的多星采集规划系统(collection planning system, CPS)^[45],ESA 的多任务分析规划工具(multi-mission analysis and planning tool, MAT)^[46]。CPS 软件的设计及调度算法都采用了和 STK Scheduler 类似的方法,从软件的说明文档来看,尽管其能针对多颗卫星进行任务规划,但其只能处理点目标的任务需求,不能处理区域目标等复杂的观测目标。MAT 软件能够处理用户灵活定制的任务需求,并采用了启发式算法及随机进化的贪婪算法求解,文献[46]中并未透露对任务的处理细节,问题模型和算法的效率也不清楚。

2. 国内研究现状

国内方面,李曦等^[47,48]研究了多星对单个区域的任务规划问题,将区域目标按照经纬度划分网格,然后分别针对时间覆盖率优先和空间覆盖率优先建立了基于网格的数学模型。区域目标分解方式也只能提供几种遥感器固定姿态下的候选观测场景,没有考虑按照用户需求细分遥感器姿态,该划分方式的合理性及精确性都有待提高。

阮启明等^[49,50]研究了多星对区域目标的观测调度问题,对区域目标的分解进