



引文格式: 仵倩玉, 王密, 陈俊博. 语义描述驱动的启明星一号自主任务规划方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1264-1272. DOI:10.13203/j.whugis20220732

Citation: WU Qianyu, WANG Mi, CHEN Junbo. Semantic Description Driven Autonomous Mission Planning Method for QMX-1[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8):1264-1272. DOI:10.13203/j.whugis20220732

语义描述驱动的启明星一号自主任务规划方法

仵倩玉¹ 王密¹ 陈俊博¹

¹ 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

摘要: 卫星任务规划是合理配置卫星资源, 获取有效数据的重要途径。针对启明星一号卫星在无用户观测需求时存在的资源浪费问题, 提出一种语义描述驱动的启明星一号自主任务规划方法。首先通过分析对地观测目标的特征及其对遥感数据的需求特点, 构建了全球任务语义描述模型, 为卫星的自主任务规划提供了基础数据库。然后基于该描述模型, 设计了一种卫星自主任务规划方法, 通过构建任务规划模型, 能够实现对高价值目标的自主规划, 提高卫星数据获取效率, 最大程度地发挥卫星的在轨应用价值。最后基于启明星一号对该模型进行了方案验证, 证明了该方法的可行性, 可适用于不同类型遥感卫星, 在未来遥感星群实时智能服务应用中能够发挥一定的价值。

关键词: 语义描述; 启明星一号; 自主任务规划; 全球任务统筹管理

中图分类号: P228; V474

文献标识码: A

收稿日期: 2022-11-14

DOI: 10.13203/j.whugis20220732

文章编号: 1671-8860(2023)08-1264-09

Semantic Description Driven Autonomous Mission Planning Method for QMX-1

WU Qianyu¹ WANG Mi¹ CHEN Junbo¹

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Satellite mission planning is an important way to rationally allocate satellite resources and obtain effective data. In order to solve the problem of resource waste in the absence of user demand for Qimingxing-1(QMX-1), we proposed a semantic description driven autonomous mission planning method for QMX-1. **Methods:** By analyzing the characteristics of earth observation targets and their requirements for remote sensing data, we have construct a semantic description model for global tasks and form a global earth observation target database. Based on the description model, we design a satellite autonomous mission planning method. By building a mission planning model, we can achieve autonomous planning for high-value targets and maximize the value of satellite in orbit applications. **Results and Conclusions:** We verified the proposed model based on the QMX-1 and proved the feasibility of the method in this paper. The model is applicable to different types of remote sensing satellites and can play a certain value in the future remote sensing constellation real-time intelligent service applications.

Key words: semantic description; QMX-1; autonomous mission planning; global targets integration management

随着卫星产业的发展, 国内近几年来小卫星的发射数量逐渐增多^[1-3], 截至 2022 年 1 月 1 日, 中国在轨遥感卫星数量达 264 颗^[4]。卫星数量逐渐增多, 但是卫星应用还未实现大众化扩展, 一些高校、

私企等部门发射的卫星主要应用对象仍是研发部门等单位。遥感卫星的造价高且在轨寿命有限, 现有的遥感应用模式还未实现跨域式发展。

启明星一号是由武汉大学自主研发的中国

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3902804); 中央高校基本科研业务费(2042023kf1004)。

第一作者: 仵倩玉, 博士生, 研究方向为卫星任务规划与遥感影像实时智能服务。wuqianyu@whu.edu.cn

通讯作者: 王密, 博士, 教授。wangmi@whu.edu.cn

首颗可见光高光谱和夜光多光谱多模式在轨可编程微纳卫星^[5]。卫星整星重量不超过 20 kg, 装备可见光相机和红外相机, 能够获取 32 谱段高光谱图像、8 谱段地球表面夜光图像和地表红外遥感图像, 其主要用途是为国内外遥感相关专业学者提供开放式的太空教学实验平台。启明星一号卫星设计寿命有限, 应用服务还未实现大众化运行, 仅仅依靠有限的用户应用无法全面发挥卫星在轨应用价值。传统卫星任务规划方法虽然能依据用户需求对卫星进行合理规划^[6-10], 但自主性差, 无法解决无用户需求时卫星存在的“空转”和“获取无效数据”的问题^[4]。因此, 亟需开展卫星自主任务规划方法研究, 提高卫星使用率, 最大程度地发挥卫星的在轨应用价值。

本文以启明星一号卫星为基础, 提出一种语义描述驱动的卫星自主任务规划架构, 通过构建全球对地观测目标库, 使卫星在无用户目标需求时, 能够依据目标库中目标自主进行任务规划, 从而提高卫星的数据获取效率, 解决卫星资源浪费的问题。通过对全球不同地物目标的特征及其对遥感数据的需求特点进行分析, 构建了全球任务语义描述模型, 实现了对地观测目标的统筹管理。基于该模型, 本文设计了语义描述驱动的卫星自主任务规划方法, 通过模型任务合并与属性计算、卫星自主任务规划模型构建, 能够使卫星在无用户需求时进行自主规划, 获取更多有价值的目标, 实现对卫星资源最大程度的利用。

1 语义描述驱动的卫星自主任务规划处理架构

启明星一号卫星的任务规划对象主要是遥感相关专业的学者的任务需求, 在无用户需求时存在“空转”和“获取无效数据”的问题。针对这一问题, 本文提出一种语义描述驱动的卫星自主任务规划处理方法, 通过构建对地观测任务语义描述模型, 为卫星任务规划提供常规目标观测对象, 使卫星在无用户需求时, 能够结合语义描述模型中目标为卫星选取最佳的观测方案, 从而提高卫星使用率, 发挥卫星最大应用价值。

语义描述驱动的卫星自主任务规划处理架构如图 1 所示。依据对地观测目标特点构建全球区域语义描述模型; 当无用户需求时, 采用语义描述模型目标任务规划方法对模型目标进行自主任务规划; 通过计算卫星对语义描述模型目标的可见时间窗口, 初选出卫星能够观测的目标集

合, 再结合目标的任务优先级、目标区域含云量等条件, 计算目标的综合效益值; 结合卫星存储、卫星观测时间等约束条件, 筛选出符合卫星观测条件的多个综合效益较高的观测目标形成语义描述模型规划方案。

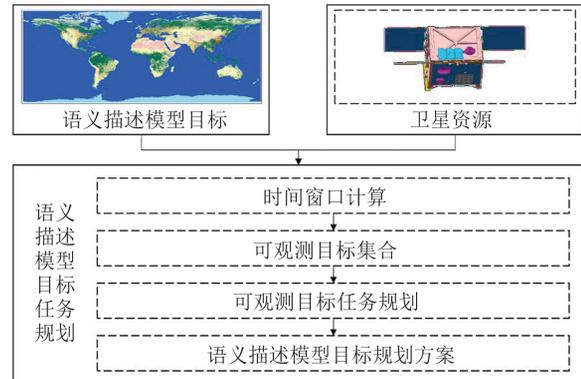


图 1 语义描述驱动的卫星自主任务规划处理架构

Fig. 1 Semantic Description-Driven Processing Architecture for Autonomous Satellite Mission Planning

2 全球任务语义描述模型构建

对地观测卫星面向的对象是地球, 通过对全球目标进行分析, 为不同类型地物目标赋予不同的语义描述信息, 即可实现对全球目标的统筹管理。在无用户需求时, 使卫星能够依据模型目标优先级的高低, 自主规划出高价值的目标进行观测。

2.1 不同类型对地观测目标获取

全球任务语义描述模型主要包括全球静态目标、局部动态目标和时间变化因素目标。本文所用基础数据来源于公开分享的不同类型全球区域数据, 通过对数据进行处理得到全球任务语义描述模型的基础数据。

1) 静态地物目标库

全球静态地物是全球任务语义描述模型的基础层, 其包含了全球区域不同类型的地物, 是卫星对地观测的基础。采用 2021 年哨兵 2 号 (Sentinel-2) 10 m 全球土地利用/土地覆盖数据作为研究基础, 构建全球区域静态地物目标库。图 2 展示了从 ArcGIS 网站获取的土地利用/土地覆盖数据经投影转换、拼接等处理后得到的结果。为了便于后续对目标进行规划, 采用点目标矢量格式对目标进行管理。依据目标类型对数据进行提取, 形成不同类别的栅格数据, 经数据转换形成不同类型的点目标矢量数据。同时剔除云目标类型, 选取其余 8 种地物类型作为全球任务语义描述模型的基础目标数据。

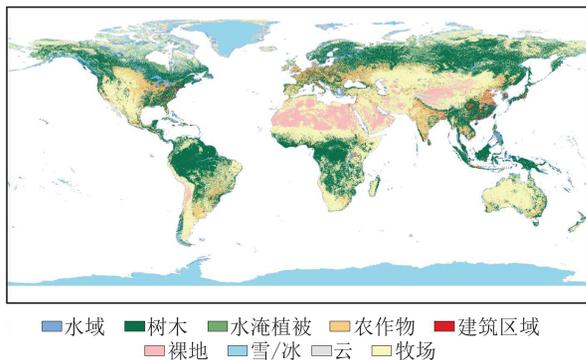


图2 Sentinel-2 10 m 土地利用/土地覆盖数据处理结果
Fig. 2 Data Processing Results of 10 m Sentinel-2 Land Use/Land Cover Data

2) 局部动态地物目标库

局部动态地物目标主要包括常见动目标和历史应急目标。变化检测和动目标检测是遥感应用的重要组成部分,其在交通、灾害、应急等方面具有重要意义。为了对动态目标进行自主规划,选取易发生动态变化的重点区域作为常见动目标基础数据库,主要包括飞机、船只等运动目标可能出现的场所如机场、港口等区域。通过统计公开数据集,共获得72 723个全球机场数据,14 036个全球主要港口数据。此外,从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站中统计了1939-11—2022-06共计18 395个地震数据,作为历史应急目标基础数据库。

3) 时间变化因素目标库

在对地观测目标中,部分类型目标会受时间变化因素影响,因此在构建全球任务语义描述模型时还需考虑时间变化因素。常见的时间变化因素目标主要包括两种类型:(1)受时间变化影响对卫星传感器需求发生变化的目标;(2)随着季节变化而产生的目标。时间变化因素目标选取静态地物目标库中的树木和农作物,局部动态地物目标库中的洪涝目标作为研究基础,通过在属性设置中添加时间因素来对其进行管理。

2.2 不同类型任务语义描述指标定义

对地观测任务涉及多个指标,一般通过若干描述参数来表示。这些参数体现了数据应用的需求,在后续的任务规划、获取、下传、处理和分发过程中发挥着重要作用。通过分析不同类型对地观测目标的处理流程,总结了不同类型任务在数据获取和处理过程中所涉及的必要描述信息,通过合并分析,形成了不同类型目标一体化的对地观测任务描述要素,并将其划分为基本属性、约束条件和产品需求3种类型,具体分类如图3所示。

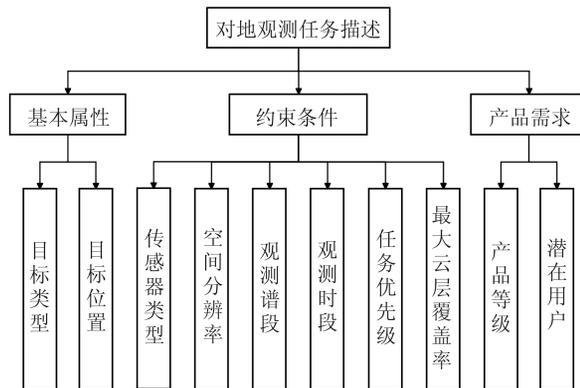


图3 不同类型目标一体化的对地观测任务描述要素
Fig. 3 Elements of Integrated Earth Observation Task Description for Different Types of Targets

基本属性要素包括目标类型和目标位置。目标类型是依据土地利用数据分类标准对地物类型进行的划分结果;目标位置指观测目标的地理位置范围。约束条件要素包括传感器类型、空间分辨率、观测谱段、观测时段、任务优先级和最大云层覆盖率。传感器类型指不同类型目标所适合的传感器的类型,用于后续对卫星传感器类型进行约束;空间分辨率指不同类型目标所适合的空间分辨率大小,用于后续对卫星传感器性能进行约束;观测谱段指不同类型目标对观测谱段的要求;观测时段指观测目标适合被观测的时间段;任务优先级是对任务重要程度的描述,便于在规划过程中对高价值目标进去优先规划,重要程度越高,对应的数值越大;最大云层覆盖率指不同类型目标所能接受的云层覆盖的最大范围,主要用于对光学卫星进行规划约束。产品需求要素包括产品等级和潜在用户。本文依据GB/T32453—2015卫星对地观测数据产品分类分级,将产品等级划分为0~6级;潜在用户指对遥感数据产品有应用需求的用户,可以在数据获取后通过将数据推送给潜在用户的方式来扩大数据应用范围。

2.3 全球任务语义描述模型指标设定

遥感卫星的观测对象是地球,服务对象是用户。在构建全球任务语义描述模型时,需依据用户需求特征为不同类型目标配置不同程度的任务优先级等描述信息,从而使卫星在自主规划时能够依据模型中目标语义描述信息,选取价值较高的目标进行观测,避免获取过多无用数据,造成卫星、计算、存储等资源的浪费。

依据目标类型为语义描述模型目标设置相关属性信息。优先级是卫星自主任务规划的重要依据,为了选择高价值的目标优先进行规划,

将模型目标优先级设为 1~5 级。在模型静态目标中,依据任务应用服务的重要程度,对不同类型目标优先级进行划分,其中建筑区域优先级设为 5;农作物、树木和水域优先级设为 4;其他类型地物相对来说应用较少,赋予其较低的优先级。

动态地物主要包括常见动目标和常见历史应急目标,具有较高的研究价值,将其优先级设为 5。除此之外,本文通过对地物目标进行分析,为不同类型地物添加了其他类型属性信息,从而实现对全球不同地物的统一管理,结果见表 1。

表 1 不同类型目标主要属性信息表
Tab. 1 Main Attribute Information of Different Types of Targets

序号	基本属性			约束条件				产品需求		用途定义	
	目标类型	目标位置	传感器类型	空间分辨率	观测谱段	观测时段	任务优先级	最大云覆盖率/%	产品等级		潜在用户
1	建筑区域		V、M、H、T、S	高	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	5	10	1、2、3 级	国土、建筑、交通等部门	工程建设、道路修建、城市规划、城市环境监测、路域环境监测、数字城市等
2	农作物		V、M、H	高/中/低	VL、IR、MS	08:00:00—18:00:00	4	20	1、2、3 级	农业、灾害监测等部门	农作物估产与监测、病虫害防治、农情监测等
3	树木		V、M、H、T、S	高/中/低	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	4	20	1、2、3 级	林业、环境监测、灾害监测等部门	森林火灾、农林病、植被变化等
4	水域		V、M、H、T、S	高/中/低	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	4	20	1、2、3 级	渔业、旅游、环境监测、灾害监测等部门	水体污染、水资源调查等
5	水淹植被		V、M、H	高/中/低	VL、IR、MS	08:00:00—18:00:00	3	20	1、2、3 级	农业、林业、灾害监测等部门	水培农作物估产与监测、水灾等
6	牧场		V、M、H	高/中/低	VL、IR、MS	08:00:00—18:00:00	3	20	1、2、3 级	林业、环境监测等部门	牧场植被变化、土地荒漠化等
7	雪/冰		V、M、H、T、S	高/中/低	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	2	20	1、2、3 级	环境监测、灾害监测等部门	海上冰山漂流、全球气候变化及其影响、冰雪监测等
8	裸地		V、M、H	高/中/低	VL、IR、MS	08:00:00—18:00:00	1	20	1、2、3 级	环境监测国土、灾害监测等部门	荒漠化、土壤盐渍化、地质环境与地质灾害监测等
9	动目标区域		V、M、H、T、S	高	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	5	10	5 级	国防、安全等部门及机场、港口、高校等单位	军事侦察、机场/港口变化监测等
10	应急目标区域		V、M、H、T、S	高	VL、IR、MS、MW	00:00:00—24:00:00	5	10	5 级	灾害监测部门	水灾、滑坡、泥石流、地震等

注:传感器类型中,V表示可见光(visible light),M表示多光谱(multispectral),H表示高光谱(hyperspectral),T表示热红外(thermal infrared),S表示合成孔径雷达(synthetic aperture radar);观测谱段中,VL表示可见光(visible light),IR表示红外(infrared),MS表示多谱段(multispectral),MW表示微波(microwave)。

3 语义描述模型驱动的卫星自主任务规划方法

语义描述驱动的卫星自主任务规划是以语义描述模型任务为基础,通过对语义描述模型任务进行规划,解决卫星在无用户需求时存在的资源浪费的问题,从而最大程度地发挥卫星在轨应用价值。

3.1 语义描述模型任务合并与属性计算

卫星对任务进行观测的前提是卫星在规定时间内对观测任务具有可见时间窗口。传统的任务规划方法是从卫星对目标的所有可见时间窗口中选出最佳的时间窗口。语义描述驱动的任务规划方法与传统方法相反,其主要是根据卫星所有的观测范围选出卫星能够观测的模型目标,再依据模型目标的属性信息选择高价值的目

标进行观测。语义描述模型的基础对象是分辨率为1 km的不同地物类型的点矢量数据。启明星一号卫星幅宽约为107 km,其在对语义描述模型目标观测时单景影像会获取到多个不同类型的语义描述模型目标。卫星在任务规划过程中需满足相同时间仅对一个目标进行观测的约束,利用单个语义描述模型目标的价值去代表卫星单次拍摄整幅影像的价值,会导致最终获取影像的价值不是最优。因此,需结合卫星幅宽大小,对语义描述模型点目标进行合并,并重新定义合并后的目标属性,以保证最终获取影像的价值最优。

1) 语义描述模型任务合并

在任务合并方面,本文提出基于卫星幅宽尺度的空模型对目标进行重组,具体流程如图4所示。首先以卫星1/2幅宽为半径画圆形,以 $\sqrt{2}/2$

倍幅宽为边长形成该圆的内切正方形,以该正方形为基准对全球区域进行分割形成空模型;计算卫星在1 d内的星下点轨迹,同时增加左右两边最大侧摆角度,形成卫星星下点轨迹的最大覆盖范围,并将卫星的星下点轨迹覆盖范围与空模型和全球语义描述模型叠加;以空模型的中心点坐标为基准,筛选出中心点位于星下点轨迹覆盖范围内的空模型目标,作为初始观测空目标集;以初始观测空目标集中每个空目标覆盖范围为基准,对全球语义描述模型进行叠加,统计落入每个空目标区域内的语义描述模型目标的种类、数量和优先级;依据每个空目标与星下点轨迹的位置关系,计算每个初始观测目标的开始时间、结束时间、观测时长、卫星侧摆角度等属性信息;通过将相关属性赋值给空模型,即可得到卫星的初始观测目标集合及目标观测时间窗口信息。

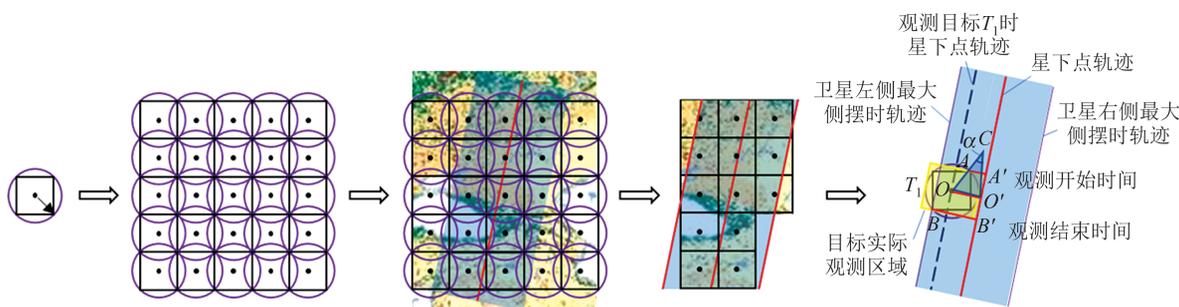


图4 基于卫星幅宽尺度的空模型思路图

Fig. 4 Space Model Idea Diagram Based on Satellite Width Scale

2) 初始观测目标属性定义

初始观测目标是基于卫星幅宽尺度构建的面目标,其属性信息仅包含面积、4个顶点坐标和中心点坐标。当面目标的中心点落于卫星最大侧摆角时星下点的覆盖范围内时,就能确保该面目标能够被完全观测到,将该面目标与全球语义描述模型相叠加,则面目标中会存在多个语义描述点目标,通过分析点目标的类型、数量等信息即可对面目标进行其他属性定义。基于全球任务语义描述模型的规划方法包括两种类型:(1)仅对语义描述模型中的单一类型目标进行规划;(2)对语义描述模型中的多个类型目标进行规划。由于单颗卫星的观测时间和范围有限,因此可以基于单一类型目标规划方法提前选择高优先级的目标类型进行规划。

在单一类型目标选择前,需要判断卫星的传感器类型、空间分辨率、观测谱段是否符合该类型目标的要求。在单一类型目标规划方法的属性定义方面,可直接将该点目标类型的属性信息

赋值给面目标,形成面目标的目标类型 y_j 、观测谱段 b_j 、观测时段 t_j (包含开始时间 s_j 、结束时间 e_j)、最大云层覆盖率 c_j 、产品等级 l_j 、潜在用户 u_j 等信息(j 为面目标编号)。同时需要统计落入面目标中该类型点目标的数量,并通过目标数量与该类型目标优先值相乘得到单一类型面目标的总体优先级值,计算如下:

$$P_j = n_j \times p_j \quad (1)$$

式中, P_j 为面目标的优先级值; n_j 为面目标中落入的单一类型点目标数量; p_j 为面目标中单一点目标的任务优先级。

多类型目标规划方法属性定义时,需要考虑卫星属性是否能够满足落入面目标中的点目标对传感器类型、空间分辨率和观测谱段的要求。统计满足该要求的不同类型点目标的数量,并将点目标数量最大的目标类型作为第 j 个面目标的目标类型,将该类型的属性信息赋值给面目标,形成面目标的目标类型 y_j 、观测谱段 b_j 、观测时段 t_j (包含开始时间 s_j 、结束时间 e_j)、最大云层覆盖率

c_j 、产品等级 l_j 、潜在用户 u_j 等信息。同时计算所有满足卫星要求的点目标优先级的总和,作为面目标的优先级 P_j , 计算公式如下:

$$P_j = \sum_{i=1}^n (n_j^i \times p_i) \quad (2)$$

式中, n 为面目标中落入的点目标的类型数; n_j^i 为第 j 个面目标中落入的第 i 种类型点目标的数量; p_i 为第 i 种类型点目标的任务优先级。

3.2 任务规划模型构建

卫星任务规划模型主要包括约束条件和目标函数两部分,其目的是从多个有效时间窗口中选出满足约束条件并使目标函数综合效益最优的规划方案。

1) 约束条件建立

约束条件建立的目的是在卫星最大观测时长范围内对多个目标/时间窗口进行选择,其存在的主要冲突包括相同时间内卫星能以不同侧摆角度对不同目标进行观测、相邻任务的时间间隔不能支持卫星侧摆角度调整、卫星的总工作时间有限,仅能支持少量任务进行观测。为了减少资源的浪费,提高任务的规划效率,在任务规划过程中需要满足一些约束条件,以保证规划有序的进行。约束条件的建立是对卫星任务规划问题的描述,不同的约束条件对任务规划过程有着不同的限制。

卫星资源唯一性约束主要对卫星在相同时间内的观测目标数量进行约束。语义描述模型驱动的任务规划方法是将卫星在不同侧摆角度下能够观测到的所有目标作为初始观测目标,因此会出现相同时间内卫星在不同的侧摆角度下能够观测不同目标的情况,造成任务观测时间冲突,需要设置此约束条件对相同时间观测目标数量进行限制。卫星资源唯一性约束定义为同一卫星在同一时间内仅能对一个目标进行观测,卫星所观测的第 j 个目标的开始时间必须大于第 $j-1$ 个目标的结束时间,即

$$\forall 1 \leq j \leq m, s_j > e_{j-1} \quad (3)$$

式中, m 为初始观测目标集合中面目标总数量; s_j 为目标 j 的观测开始时间; e_{j-1} 为目标 $j-1$ 的观测结束时间。

机动时间约束主要用于对卫星执行两次观测的最小时间间隔进行约束。当卫星的两次观测时间间隔较小时,容易使卫星发生复位,无法正常获取数据,因此需要设置此约束条件对观测最小时间间隔进行限制。机动时间约束定义为

卫星对两个目标的观测时间间隔不能小于卫星的机动调整时间,即

$$\forall 1 \leq j \leq m, s_j - e_{j-1} \geq T \quad (4)$$

式中, T 为卫星最小机动调整时间。

云层覆盖率约束主要用于对观测区域的含云量进行约束,需要结合观测区域在规划时间段的区域云层覆盖信息判断观测区域是否符合观测条件,若观测区域的云覆盖过多,则将该任务排除,否则获取的光学影像会因含云量过高而导致获取的影像质量较低,造成资源的浪费,因此需要设置此约束条件对观测区域含云量进行约束。云层覆盖率约束定义为任务所在区域云层覆盖率不能大于该任务主要观测类型的最大云层覆盖率要求,即

$$\forall 1 \leq j \leq m, C_j \leq c_j \quad (5)$$

式中, C_j 为第 j 个目标在观测时间窗口内的实际含云量; c_j 为第 j 个目标所要求的最大云层覆盖率。

观测总时长约束主要用于对卫星最终要执行观测目标的总体观测时间进行约束。启明星一号是一颗重量约 20 kg 的微纳卫星,卫星电池容量和存储容量相对较小,每天能够获取的数据量有限,若提交的观测任务超出卫星观测能力,会导致任务观测不成功,因此需要设置此约束条件对卫星总体工作时长进行约束。观测总时长约束定义为最终规划方案中所有待观测任务的观测时间总和不能大于卫星每天的观测总时长要求,即

$$\sum_{j=1}^m x_j \times (e_j - s_j) \leq T_0 \quad (6)$$

式中, x_j 为决策变量,表示目标 j 是否被卫星所规划,若目标 j 被规划,则 $x_j=1$, 否则, $x_j=0$; T_0 为卫星最大观测总时长。

2) 目标函数建立

目标函数是对观测目标执行情况 and 资源利用情况的综合评述,卫星任务规划就是在满足各种约束限制的情况下,求解出使目标函数值尽可能最优的规划方案。语义描述模型任务规划的目标是在无用户需求的情况下,使卫星重点面向人类活动区域进行自主任务规划,尽可能获取具有潜在应用价值的的数据。在语义描述模型属性定义阶段,采用任务优先级值来对目标的重要程度进行定义,因此目标函数采用任务优先级作为评价指标,通过设置规划方案中待观测目标的任务优先级总和最大化,来求解效益较高的观测方案,即

$$B = \max \sum_{j=1}^m x_j \times P_j \quad (7)$$

式中, B 为观测方案的效益值; P_j 为第 j 个目标的任务优先级, 计算方法参考式(1)和式(2)。

3.3 任务规划计算框架

语义描述模型驱动卫星自主任务规划是一种复杂的多目标优化问题, 其本质是对多个任务按照时间先后顺序进行优化组合的问题, 在规划过程中要求不同任务选择的时间段不能存在重叠, 同时最终的优化组合要使得所获得的利益较大化。基于这种思想, 本文将卫星自主任务规划问题转化为对最优任务的选择问题, 通过优化求解为卫星自主安排高价值的任务进行观测。基于语义描述模型的卫星任务规划主要包括语义描述模型构建、卫星覆盖范围计算和卫星规划方案求解3个步骤, 计算框架如图5所示。

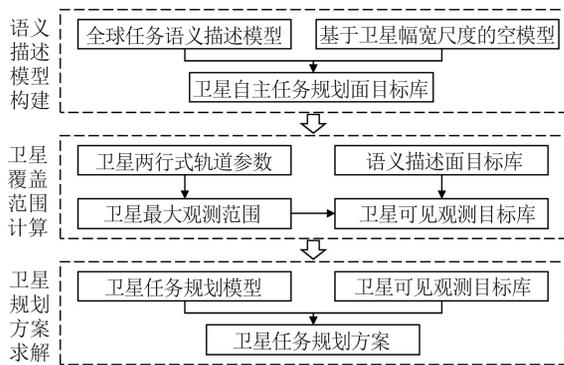


图5 语义描述模型驱动卫星自主任务规划计算框架
Fig. 5 Semantic Description Model-Driven Computing Framework for Satellite Autonomous Mission Planning

语义描述模型构建的目的是为卫星提供自主任务规划目标库, 其处理思路是以卫星幅宽为尺度构建空模型, 对语义描述模型中的离散点目标进行聚合, 形成卫星单次观测能够完全覆盖的面目标; 通过计算每个面目标中点目标的优先级总和, 作为面目标的优先级, 为后续目标的选择提供决策依据。

卫星覆盖范围计算的目的是获取卫星对全球区域的可见观测范围, 其处理思路是基于卫星两行式轨道参数计算一定观测时间范围内卫星的星下点轨迹, 获取每个轨迹点的坐标和观测时间; 依据卫星左右最大侧摆角度, 计算卫星在观测时间内的最大观测范围; 通过将卫星最大观测范围与语义描述面目标进行叠加分析, 获取卫星在观测时间范围内的可见面目标, 形成卫星可见观测目标库。

卫星规划方案求解的目的是获取卫星最终的观测方案, 其处理思路是结合各类约束条件和模型目标函数, 对卫星可见观测目标库中目标进行优化选择, 排除不符合约束条件的目标, 选取满足卫星观测时长且使得目标函数较优的目标,

形成最终的卫星任务规划方案, 使卫星在无用户需求时能够依据该方案进行数据获取, 从而提高卫星利用率, 获取更多高价值的信息。

4 实验和结果分析

为了验证全球任务语义描述模型的可行性, 采用启明星一号卫星进行了实验分析。在观测时间方面, 以 2022-11-16T00:00:00 作为观测开始时间, 2022-11-16T24:00:00 作为观测结束时间, 采用基于开普勒根数的两行根数及相应的简化普适摄动算法(一般用于近地卫星, 轨道周期小于 225 min)来预测卫星的轨道数据^[11-12]。从网上下载启明星一号最新的两行根数, 结合简化普适摄动模型, 以 20 s 为时间步长, 计算卫星在观测时间范围的星下点轨迹位置坐标。在观测目标方面, 基于全球任务语义描述模型的单一任务规划方法, 从模型中选取建筑区域目标作为主要观测目标类型。

以 $50\sqrt{2}$ km 为基准构建渔网形成启明星的空模型, 图 6(a) 为空模型与建筑目标点叠加图, 含有建筑目标点的空模型称为建筑模型, 每个模型中落入的建筑点数作为计算叠加模型任务优先级的依据。卫星轨道高度为 536 km, 按照 $\pm 6^\circ$ 侧摆计算, 星下点轨迹可向两边各偏移约 $536\tan 6^\circ$ km, 对空模型、星下点轨迹偏移后的区域和全球任务语义描述模型中的建筑区域目标进行叠加分析, 初步确定任务目标。图 6(b) 为叠加效果图, 其中蓝色区域为初步确定的目标。依据建筑模型目标优先级输出优先级较高的观测目标, 图 6(c) 红色区域为从初选目标中筛选的建筑点数大于 100 的白天观测目标。结合目标区域含云量信息确定合适的观测目标区域, 图 6(d) 红框区域为满足目标含云量约束的区域。依据目标优先级值和卫星观测能力, 从云量较少的区域中选择最终的观测目标, 即可形成卫星最终规划方案, 如图 6(e) 和图 6(f) 所示, 图中红色区域代表建筑区域, 白色网格为图 6(d) 中选取的满足条件的观测目标。结合启明星一号卫星每天的最大观测时长, 依据优先级最大原则从满足条件的两个观测区域中选取了 3 个目标作为最终观测结果。图 6(e) 中的黄框部分的 2 个目标为巴特那区域, 2 个目标位置相邻, 可由卫星进行连续观测。图 6(f) 中的黄框部分的 1 个目标为大阪区域。启明星一号卫星在两个区域上方的飞行方向是自北向南, 依据目标中心点与卫星星下点轨迹间的位置关

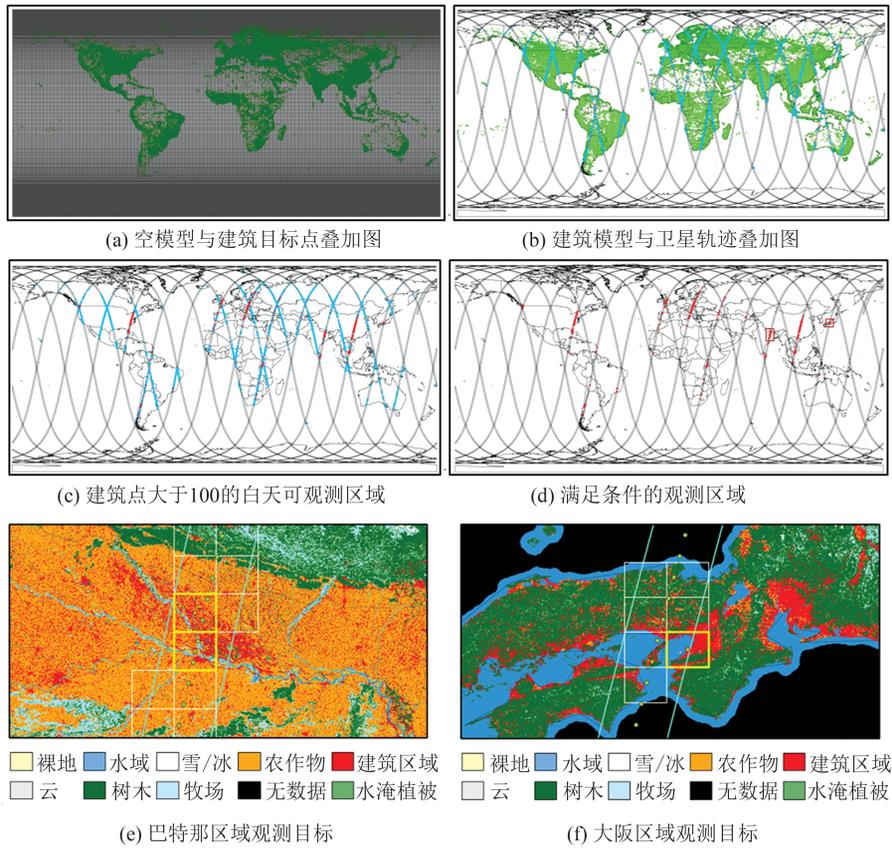


图 6 启明星一号卫星实验数据

Fig. 6 Test Data of Qimingxing-1 Satellite

系,得出卫星对巴特那区域观测时需要卫星向右侧摆 1° ,对大阪区域观测时需要卫星向左侧摆 5° 。

本文结合观测区域属性信息,生成卫星任务规划方案,如表 2 所示。依据卫星属性信息生成指令码,并通过武汉地面站上传至启明星一号卫星进行成像,经下传处理后得到 2 级产品数据。图 7 为启明星一号卫星结合指令信息获取的 2022-11-16 的巴特那区域和大阪区域影像数据。

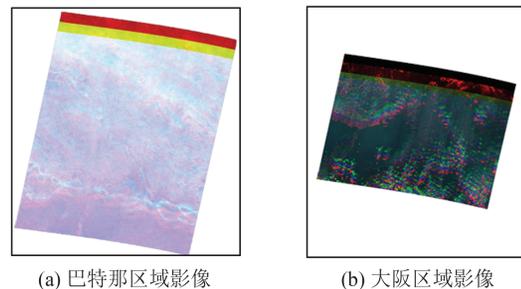
表 2 任务规划方案

Tab. 2 Mission Planning Scheme

序号	地点	起始时间	结束时间	拍摄时长/s	侧摆角度
1	巴特那	2022-11-16 04:59:41	2022-11-16 05:00:02	21	向右偏移 1°
2	大阪市	2022-11-16 01:46:44	2022-11-16 01:46:55	11	向左偏移 5°

5 结 语

针对启明星一号卫星在无用户需求时存在“空转”和“获取无效数据”的问题,本文以启明星一号卫星为基础,提出一种语义描述驱动的卫星自主任务规划架构,使卫星在无用户目标需求



(a) 巴特那区域影像 (b) 大阪区域影像

图 7 启明星一号 2022-11-16 获取的影像数据

Fig. 7 Image Data Acquired on November 16, 2022 by Qimingxing-1 Satellite

时,能够依据语义描述模型目标自主进行任务规划,从而提高卫星的数据获取效率,解决卫星资源浪费的问题。通过分析对地观测目标的特征及其对遥感数据的需求特点,构建了全球任务语义描述模型,形成全球区域对地观测目标库,并依据地物特性为不同类型目标添加了语义描述信息,实现了对全球对地观测目标的统筹管理。基于任务语义描述模型,本文提出了卫星自主任务规划方法,通过构建任务规划模型,使卫星能够在无用户需求时对高价值目标进行自主规划,实现对卫星资源最大程度的利用。

本文所提语义描述驱动的启明星一号自主

任务规划方法,打破了当前对地观测任务的需求模式,能够提高卫星资源使用率,减少无用数据造成的存储、计算、传输等资源的浪费。基于此方法规划的任务一方面可作为历史数据进行存储,另一方面可依据数据类型将其推送给潜在用户,实现对卫星数据的应用推广。同时该模型能够实现全球目标的统筹管理,适用于不同类型遥感卫星,对面向星群任务的统筹管理和高效星群资源应用具有一定的价值。

致谢:感谢启明星研制和运营团队对本文提供的卫星和数据资源支撑。

参 考 文 献

- [1] Zhao Wenbo, Li Shuai, Li Bo, et al. Development Strategy of the New-Generation Effectiveness-Oriented Earth-Observation System [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6):128-138. (赵文波, 李帅, 李博, 等. 新一代体系效能型对地观测体系发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 128-138.)
- [2] Li Deren, Wang Mi, Yang Fang. A New Generation of Intelligent Mapping and Remote Sensing Scientific Test Satellite LuoJia-3 01 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6):789-796. (李德仁, 王密, 杨芳. 新一代智能测绘遥感科学试验卫星珞珈三号01星[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 789-796.)
- [3] Wang Mi, Wu Qianyu, Xiao Jing, et al. Key Technologies on “Cloud-Edge-End” Collaborative Intelligent Service of Low-Orbit Giant Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220767. (王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220767.)
- [4] Wang Mi, Wu Qianyu. Key Problems of Remote Sensing Images Intelligent Service for Constellation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6):1008-1016. (王密, 仵倩玉. 面向星群的遥感影像智能服务关键问题[J]. 测绘学报, 2022, 51(6):1008-1016.)
- [5] Ye Pan. Wuhan University’s First Self Developed Micro/Nano Satellite Successfully Launched [EB/OL]. [2022-02-27]. <http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/02-27/9687370.shtml>. (叶攀. 武汉大学首颗学生自研微纳卫星成功发射[EB/OL]. [2022-02-27]. <http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/02-27/9687370.shtml>.)
- [6] Li Shixue, Shen Xin, Yao Huang, et al. Optimization of Lateral Swing Angles of Lunar Satellite for Region Multiple Strip Imaging Task Planning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4):593-600. (李仕学, 沈欣, 姚璜, 等. 面向区域成像任务的环月卫星侧摆角优化方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4):593-600.)
- [7] Wang Mi, Yang Fang. Intelligent Remote Sensing Satellite and Remote Sensing Image Real-Time Service [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12):1586-1594. (王密, 杨芳. 智能遥感卫星与遥感影像实时服务[J]. 测绘学报, 2019, 48(12):1586-1594.)
- [8] Wang Jingqiao, Yang Lei, Zhuang Chaoran, et al. Emergency-Oriented Satellite Mission Planning [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2022, 43(3):105-112. (王静巧, 杨磊, 庄超然, 等. 面向应急事件的卫星任务规划技术[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(3):105-112.)
- [9] Sun Congrong, Diao Ninghui, Han Jingyu, et al. A Multi-region Task Managing Algorithm and Application for Haiyang Satellite at Arctic Area [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2022, 34(2):189-197. (孙丛容, 刁宁辉, 韩静雨, 等. 海洋卫星北极多区域遥感成像任务规划及应用评估[J]. 极地研究, 2022, 34(2):189-197.)
- [10] Yang Lifeng, Chen Xiang, Guo Haibo, et al. Research of Multi-objective Imaging Autonomous Task Planning Technology for Satellite Constellation [J]. *Radio Engineering*, 2022, 52(7):1154-1159. (杨立峰, 陈祥, 郭海波, 等. 星座多目标成像自主任务规划技术研究[J]. 无线电工程, 2022, 52(7): 1154-1159.)
- [11] Liu Guangming, Wen Yuanlan, Liao Ying. Fitting Algorithm of TLE Parameters Based on Non-singular Transformation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(5):1104-1107. (刘光明, 文援兰, 廖瑛. 基于无奇异变换的双行轨道根数生成算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 1104-1107.)
- [12] Yang Weilian. Accuracy Evaluation of Two Line Element [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(3):8-13. (杨维廉. 两行根数的精度评估[J]. 航天器工程, 2009, 18(3):8-13.)