

面向 SDGSAT-1 卫星任务规划与指令生成 的一体化软件设计及实现*

蔡济济 虞业砾 羊书杰
陈玉君 李 伟 周 达

(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

摘 要 面向 SDGSAT-1 卫星载荷包括热红外成像仪、城镇微光及近海多光谱成像仪, 3 类载荷开机模式可选择单载荷开机和双载荷组合开机, 各类载荷观测时间根据载荷数据速率、光照条件、工作区域、数传时间及下传速率等约束确定, 实现了一种面向 SDGSAT-1 卫星多载荷、多约束条件下集任务规划与指令生成于一体的技术, 该技术成功应用于 SDGSAT-1 卫星满足任务规划需求, 规划生成满足卫星及载荷使用约束的有效载荷控制计划和数据接收计划, 针对生成的有效载荷控制计划编制有效载荷控制指令, 生成的数据接收计划编制数传接收指令, 最终通过指令发送模块发送给测控系统, 完成载荷在轨管理。同时, 任务规划指令系统综合评估数传数据下传的各情形, 系统引入双站接力模式, 最大程度地提高卫星数传数据下传量。

关键词 卫星任务规划, 多载荷, 需求校验, 数传接力, 指令反演

中图分类号 TP273

Integrated Software Design and Implementation for SDGSAT-1 Satellite Mission Planning and Command Generation

CAI Jiji YU Yeluo YANG Shujie
CHEN Yujun LI Wei ZHOU Da

(Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304)

Abstract The SDGSAT-1 satellite was launched at 10:19 Beijing time on 5 November 2021, using the Long March 6 carrier rocket at the Taiyuan Satellite Launch Center in China. The satellite carries three payloads: thermal infrared, low-light and multi-spectral imagers. Through the coordinated observation of the three payloads all day, it aims to achieve a detailed portrayal of the “traces of human activities”,

* 中国科学院重点部署项目资助 (KGFZD-145-23-16)

2024-04-16 收到原稿, 2024-09-07 收到修定稿

which will provide data support for the study of indicators that characterize the interaction between humans and nature and the monitoring, evaluation and scientific research of the realization of global sustainable development goals. This paper aims to provide an efficient mission planning and instruction generation technology for the multi-payload system of the SDGSAT-1 satellite. First, the three payloads of the SDGSAT-1 satellite are analyzed in detail to determine their power-on options in different working modes. These modes include single-payload independent operation and dual-payload combined operation to adapt to different observation needs and task priorities. In order to ensure the efficient execution of the observation task, a set of algorithms is designed to optimize the observation time of the payload. The algorithm takes into account a variety of constraints, including but not limited to: payload data rate, lighting conditions, working area, data transmission time, downlink rate, *etc.* Based on these constraints, an integrated mission planning and command generation system is implemented. The system can automatically generate payload control plans and data reception plans that meet the usage constraints of the satellite and its payload. Through precise mission planning, we can ensure that the observation mission of the satellite during its orbit is efficiently executed while maximizing the efficiency of payload usage. In order to further improve the efficiency of data transmission, the satellite's data transmission process is deeply analyzed, and an innovative dual-station relay transmission mode is introduced. This mode allows satellites to transmit data between different ground stations, and effectively increases the amount of satellite data transmitted through relay, especially when the communication between the satellite and the ground station is restricted. This paper develops an efficient, flexible and reliable mission planning and command generation technology by comprehensively considering the multi-payload characteristics and multiple constraints of the SDGSAT-1 satellite. The successful implementation of this technology not only improves the efficiency of satellite data acquisition and transmission, but also provides strong data support for achieving sustainable development goals.

Key words Satellite mission planning, Multiple payloads, Requirement verification, Payload data transmission relay, Command inversion

0 引言

为满足日益增长的数据需求并改善可持续发展目标应用的全球数据覆盖^[1], 由可持续发展目标大数据国际研究中心 (CBAS) 开发和运营的可持续发展目标科学卫星 1 号 (SDGSAT-1) 于 2021 年 11 月 5 日发射, 该卫星配备的有效载荷包括热红外成像仪、城镇微光成像仪和近海多谱段成像仪^[2]. 由于卫星平台和载荷设备在成像任务上受到姿态指向、工作时长等条件的约束, 通常需要合理规划多载荷成像卫星任务^[3,4], 满足多个领域的需求, 提高卫星资源利用率、卫星任务执行效率, 实现卫星任务的优化.

对地观测卫星任务规划是地面管控的核心, 同时也是驱使卫星高效工作、最大化提高卫星效能的关键环节^[5-7]. 当前任务规划的研究主要面向短期内对单次观测需求的任务调度. 该研究是一个复杂的组合优化问题, 通常需要考虑载荷使用约束、卫星的能源、卫星固存等. 针对卫星任务规划问题, 目前国内外已

存在许多成熟高效的算法及多种类型软件系统, 算法包括动态规划^[8]、启发式算法^[9,10]、搜索算法^[11,12]等; 软件系统包括美国航空航天局在其天文卫星观测项目中研发的 SPIKE 任务规划系统, 用于处理天文望远镜长期规划问题^[13], 德国航空航天中心为 EnMAP 科学计划研制的一套任务规划系统, 为日常操作 (总线和有效载荷) 编制活动调度策略^[14]. 中国人民解放军国防科技大学研究了面向点目标和区域目标的成像卫星任务规划问题, 建立了卫星成像数学模型, 形成了多种任务规划算法^[15]. 中国电子科技集团公司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, 不考虑传感器姿态调整, 也不考虑区域目标的成像需求, 卫星成像计划的编制工作主要依靠调度人员手工进行^[16,17].

以上所述系统通常具有明确的模块划分和完整的业务流程, 缺乏一体化设计融入, 即对多载荷运行场景下约束校验、任务工况下卫星指令正确性反演验证能力, 数据接收时往往采用独立接收方式. 针对以

上问题, 结合 SDGSAT-1 卫星多地面站接收情况, 本文从多载荷约束和实际在轨运行场景出发, 设计了一套多载荷、多目标组合成像、多地面站接力数传接收的任务规划技术, 主要特点如下.

- (1) 针对不同任务类型, 对观测模式、载荷组合等多种约束条件进行校验, 优化任务规划过程, 生成载荷控制指令, 确保观测任务在特定场景下的可靠性.
- (2) 综合考虑地面站接力时间约束、卫星轨道、数据接收模式等信息, 灵活规划数传接力星历表, 提升数据接收效率.
- (3) 遥控指令序列反演, 从生成的指令序列中解析基本操作单元对应的具体参数值, 供操作人员查阅判断生成的指令序列是否正确, 有助于任务的安全顺利执行.

1 多载荷约束校验

面向 SDGSAT-1 卫星搭载三类载荷, 载荷工作约束复杂, 为保证卫星任务在特定环境下的可靠性和稳定性, 降低任务的风险和成本, 需要对卫星任务的场景约束进行校验, 排除不适合特定场景的方案^[18]. SDGSAT-1 卫星不同观测模式下, 约束条件列于表 1. SDGSAT-1 卫星任务观测模式包括普查观测、拓展观测和应急观测、黑体定标、冷空定标等^[19]. 在不同的观测模式下, 受光照条件、载荷数据速率、数

据下传等条件约束, 所使用载荷组合不同, 卫星指向, 卫星姿态约束, 以及太阳高度角、单轨工作限制、载荷工作时长等观测约束条件也不相同.

在任务规划前, 首先根据表 1 中约束要求, 建立约束校验模型, 约束校验模型的运行流程如图 1 所示. 从观测需求中提取任务关键信息, 判断观测任务的类型, 包括短期、中期、长期、定标, 再根据不同观测模式进行载荷校验、观测约束条件校验. 同时, 允许人工动态配置载荷观测约束、数据接收约束等信息, 为后续的需求校验计算和分析提供数据支撑, 提高任务的适应性和灵活性.

2 数传接力规划

SDGSAT-1 卫星允许其三类载荷每天 24 h 协同工作, 数据采集量大, 对数传接收要求高, 支持三亚、喀什、密云等多个地面站进行数据接收, 因此在进行数据接收规划时, 考虑引入地面站接力接收模式, 以提升数据接收效率.

在任务规划中, 通过对地面站信息、卫星轨道参数、天线模型进行仿真, 综合分析卫星对地面站可见性、卫星天线导引率等仿真结果, 构建了地面站接力模型, 如图 2 所示.

在该接力模式下, 存在二种接力情形: 情形一为接力时间有重叠, 情形二为接力时间没有重叠. T_0 为

表 1 SDGSAT-1 不同卫星观测模式下约束条件
Table 1 Constraint of different SDGSAT-1 satellite observation modes

观测模式	载荷组合	观测约束条件
普查观测	热红外+微光 热红外+多谱段 微光 热红外 多谱段	单轨工作限制: 小于12 min 太阳高度角限制 热红外: 无限制 微光: 不大于0° 多谱段: 不小于30° 满足观测条件前提下, 依据观测区域优先级进行观测; 每天合计热红外不大于2.4 h, 微光不大于1.2 h, 多谱段不小于1.2 h
拓展观测 极夜观测	热红外+微光	满月且月亮高度角大于24°条件下冬季观测北极, 夏季观测南极. 每次观测1~2 d
拓展观测 极昼观测	热红外+多谱段	太阳角20°以上进行观测, 冬季观测南极, 夏季观测北极. 每次观测1~2 d
应急观测	多谱段或热红外	单轨观测时间不大于10 min; 观测频率不大于每天2次. 当圈不执行其他观测模式, 入境后进行数传任务
黑体定标	热红外	黑体测温稳定在250 K. 每次任务温控点依次设置为 260, 270, 280, 290, 300, 250 K. 任务的执行时间 $[T_0-10\text{ min}, T_0+20\text{ min}]$ 需在全影区且不在SAA区, 300 K降低到温度点250 K的时间约为12 h
冷空定标	热红外	任务的执行时间 $[T_0-10\text{ min}, T_0+20\text{ min}]$ 需在全影区且不在SAA区

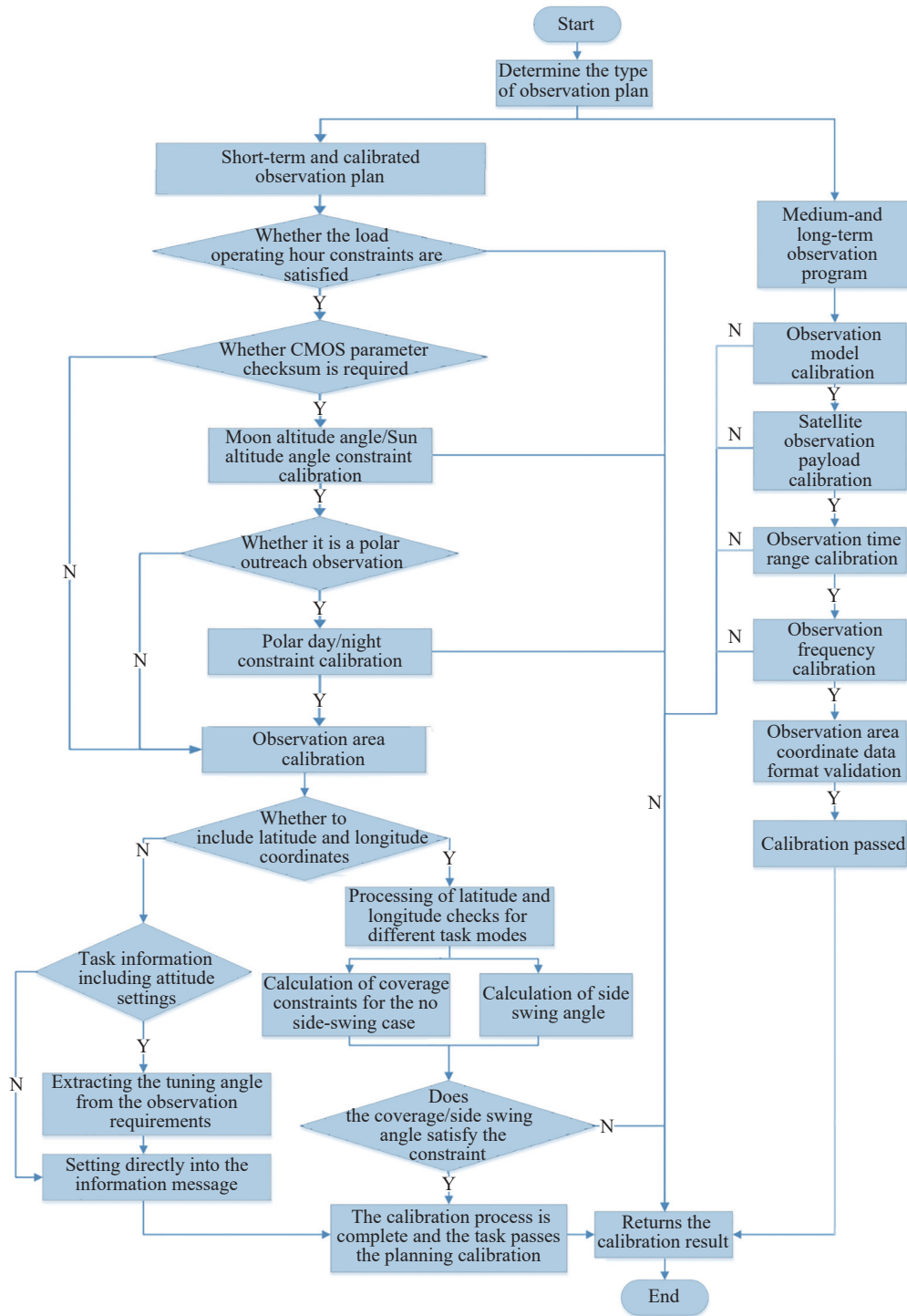


图 1 约束校验运行流程
Fig. 1 Constraint verification process

前序站的入境时间, T_1 为前序站的出境时间, T_2 为后序站的入境时间, T_3 为后序站的出境时间, Δt_1 为接力重叠时间, Δt_2 为天线由前序站指向后序站的时间, Δt_3 为保护功放设置的时间, 其中 $\Delta t_2 \geq 150$ s, $\Delta t_3 \leq$

19.5 min.
接力接收规划具体实现细节如下.
(1) 筛选出每个站点接收的时间段大于 2 min 且小于 19.5 min 的地面站资源.

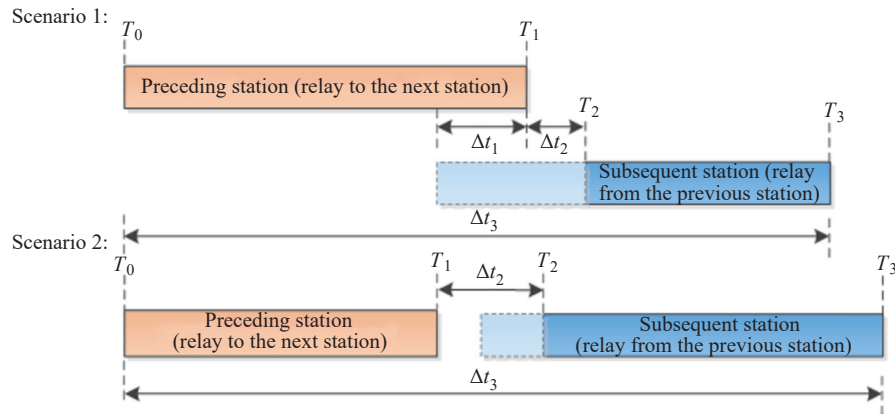


图2 数传接力模型

Fig. 2 Payload data relay receiving model diagram

(2) 当两站接收时间段间隔大于 150 s 时, 则不接力.

(3) 当两站接收时间段间隔小于 150 s 时, 需两站接力, 并截掉一部分使两站的时间段间隔等于 150 s (用于调整天线), 可以截前一段也可以截后一段, 但是要保证截完后依然大于 2 min, 否则删掉最短的一段, 并不进行两站接力.

(4) 当连续三站都满足双站接力的条件时, 计算每一段与另外两段的间隔, 保留间隔最大的两段, 去掉最小的一段.

3 指令反演

为对多种载荷进行有效运行管理, 在任务规划中设计并实现了任务规划与指令生成一体化技术, 其主要过程为任务规划完成后关联工况, 自动生成操作指令. 在 SDGSAT-1 卫星执行任务过程中, 涉及多个载荷及不同的载荷组合模式, 根据不同任务制定了 26 种工况, 每种工况中指令较为复杂, 为验证自动生成的指令正确性, 确保卫星系统安全运行和任务顺利执行, 采用了指令反演技术, 执行框架如图 3 所示.

从指令生成模块获取生成的指令块序列, 根据指令打包协议, 从指令序列中提取指令类型相关的参数字段值, 根据指令类型与工况模板自动关联, 从工况中获取指令操作和指令参数, 并将指令数据映射到工况模板, 生成反演结果, 导出到本地文件中, 辅助操作人员判断指令序列块中基本操作单元的执行步骤、执行参数、间隔时间是否符合卫星逆向指令参数项模板库中的约束要求.

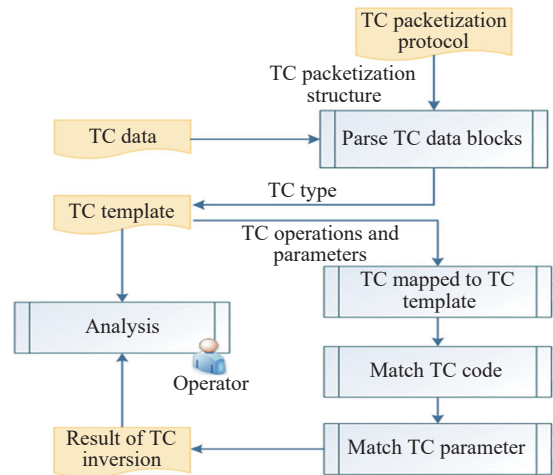


图3 指令反演框架

Fig. 3 Instruction inversion framework diagram

4 技术实现与分析

针对 SDGSAT-1 卫星多载荷工作场景, 依据提交的任务需求, 综合卫星运行状态、轨道数据、数传资源及载荷使用约束等, 集合卫星运行管理设计进行卫星自主任务规划, 实现了面向卫星运控人员的卫星任务规划与指令一体化的软件平台, 该平台采用面向多载荷运行管理、多任务约束的需求校验技术, 数传接力规划技术及确保指令正确性的指令反演技术.

4.1 软件组成

卫星任务规划与指令生成一体化软件, 其主要组成如图 4 所示. 具体功能如下.

(1) 卫星上行运行管理: 完成对轨道数据以及中

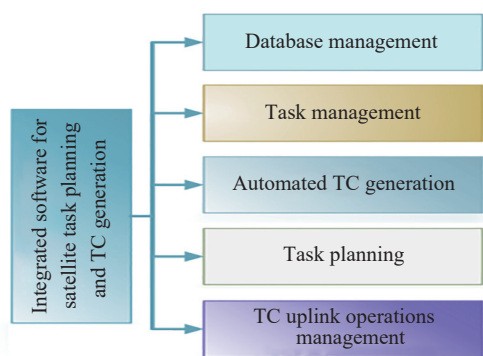


图 4 软件组成

Fig. 4 Technical composition diagram

长期观测需求、短期观测计划等关键信息的提取, 为保证任务正确执行, 在提取需求信息后, 综合卫星、载荷及其他约束条件, 对观测需求、观测计划进行校验, 完成校验后推送给任务规划功能, 同时实现上行指令数据的入库管理, 对整个运行状态进行综合管理。

(2) 任务规划: 针对不同观测计划需求 (包括中长期观测需求、短期观测计划和定标观测计划) 以及不同观测计划需求下对应的需求信息, 如观测任务模式、目标区域、载荷类型等, 同时结合卫星轨道参数等约束进行综合任务规划调度, 关联卫星的工况指令模板, 包含卫星执行观测动作的信息, 如载荷的选择及何时开始观测、何时结束观测、采用什么角度观测及观测活动覆盖的任务等。同时, 综合卫星数传接力模式 (包括跨站接力) 制定有效载荷控制计划、数传星历表及数据接收计划, 提高数据接收效率。

(3) 自主化指令生成: 完成指令序列信息的生成及发送。为保证指令正确性, 对生成的指令进行反演, 供操作人员确认指令正确性。

(4) 任务管理: 对卫星目前任务运行状态、任务执行进度等进行管理, 同时支持用户手动对某任务的取消操作, 更新任务执行进度。

(5) 数据库管理平台访问: 提供数据访问接口, 为系统运行提供数据支撑, 并进行日志记录。

4.2 多载荷约束校验技术

为满足对多载荷运行管理, 提高任务的适应性和灵活性, 系统支持通过界面进行约束设置, 可人工配置载荷观测约束及数据接收约束, 包括拓展观测约束信息、应急观测约束信息、载荷观测约束管理、数传接收约束管理、新增地面站信息管理等。在进行观测

约束校验时, 读取配置的约束信息进行约束校验, 校验完成后, 进行日志记录。整个多载荷约束校验技术采用图 1 所示约束校验运行流程, 并最终通过界面友好的方式反馈校验结果。当校验通过后, 将任务信息推送至任务规划模块进行观测任务规划。

通过载荷约束条件校验, 卫星在执行任务时, 其轨道和行为最大程度地符合任务设计的要求, 确保任务目标精准实现。

4.3 数传接力规划技术

该技术通过软件系统界面支持设置卫星地面站资源, 支持对地面站的新增、删除、修改等, 地面站配置界面列于表 2。

根据配置好的地面站资源计算卫星过站时间, 自动规划数据接收计划, 并生成数传星历表。整个自动化接力接收规划流程参考第 2 节, 操作人员可根据规划接力标识进一步核实修改, 最终确定的数传接收计划将进行入库发送给数传地面接收站进行跟踪, 同时将自动生成的数传星历表指令发送给测控中心进行上注 (见表 3)。用户可综合地面站运行情况, 手动选择某一时间段地面站是否进行数据接收、是否进行两站接力, 使得数据接收方案更加灵活。SDGSAT-1 卫星旨在提高地球观测作为可持续发展目标的数字解决方案的能力, 构建地面站接力模型, 实现数传接力规划技术, 可提高数据接收效率, 实现最大化上传数据。

4.4 指令反演技术

在指令生成后, 软件系统依据指令帧、指令包以及指令参数 XML 文件自动进行指令反演, 将反演结果显示在界面, 并保存在本地文件中, 供操作人员查看。表 4 为 D145 数传星历表上注指令反演界面显示结果, 表 5 为指令协议 XML 文件。

操作人员可将工况模板与指令反演结果信息进行对比分析, 判断自动生成的指令是否满足任务需求, 从而减少误操作的可能性, 使得地面操作员更容易管理卫星运行系统, 提高卫星运行的安全性。对工况中 D142 复接调制器载荷通道选择指令模板与对应指令反演部分结果进行对比, 对比结果分别如表 6 和表 7 所示。

5 结论

重点分析设计并实现了面向多载荷运行管理、多任务约束的需求校验技术, 数传接力规划技术及确保

表 2 地面站资源配置界面
Table 2 Ground station configuration interface

序号	站名称	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	最低跟踪角/(°)	最低接收仰角/(°)
1	密云站	116.8567	40.4508	109	3	5
2	三亚站	109.3099	18.3121	22	5	7
3	喀什站	75.99287	39.5051	1307	5	5

表 3 接力规划界面
Table 3 Payload data relay receiving planning interface

序号	站名称	进站时间	出站时间	接收开始时间	接收结束时间	轨道圈号	接收时长/s	下传模式	接力标识
1	密云站	2021-10-29 09:57:05	2021-10-29 10:07:11	2021-10-29 09:57:31	2021-10-29 10:01:32	182	241	常规	与下序站 接力
2	三亚站	2021-10-29 10:03:38	2021-10-29 10:12:38	2021-10-29 10:04:02	2021-10-29 10:12:14	182	492	常规	与下序站 接力
3	喀什站	2021-10-29 11:34:04	2021-10-29 11:41:03	2021-10-29 11:34:46	2021-10-29 11:40:22	183	336	常规	不接力
4	喀什站	2021-10-29 13:06:43	2021-10-29 13:16:36	2021-10-29 13:07:10	2021-10-29 13:16:10	184	540	常规	不接力
5	密云站	2021-10-29 20:35:29	2021-10-29 20:45:00	2021-10-29 20:35:57	2021-10-29 20:44:32	189	515	常规	不接力
6	三亚站	2021-10-29 22:03:57	2021-10-29 22:18:26	2021-10-29 22:04:20	2021-10-29 22:07:51	190	211	常规	与下序站 接力
7	密云站	2021-10-29 22:09:49	2021-10-29 22:09:49	2021-10-29 22:10:21	2021-10-29 22:17:54	190	453	常规	与下序站 接力
8	喀什站	2021-10-29 23:44:11	2021-10-29 23:54:16	2021-10-29 23:44:37	2021-10-29 23:53:50	191	553	常规	不接力

注 时刻均为北京时间 (BLT).

表 4 指令反演结果显示界面
Table 4 Instruction inversion result display interface

序号	指令码	指令名称	数据长度	校验和	开始时间	结束时间	数据量	指令内容
1	D145	数传星历表上注	66	9E89	2021-06-16 09:22:16	2021-06-16 22:44:20	8	EB9020FAB863...
序号		入境时间	入境时长/s	入境地面站代号		下传模式	接力标识	
1		2021-06-16 09:22:16	169	0x4		01b	10b	
2		2021-06-16 22:31:03	245	0x1		01b	10b	
3		2021-06-16 22:37:39	400	0x4		01b	01b	
4		2021-06-17 00:06:15	550	0x2		01b	11b	
5		2021-06-17 01:41:26	121	0x2		01b	11b	
6		2021-06-17 01:44:31	139	0x2		01b	11b	
7		2021-06-17 07:39:24	175	0x1		01b	11b	

注 时刻均为北京时间 (BLT).

表 5 指令协议 XML 文件
Table 5 Command protocol XML file

<FrameItem name="帧同步字" ID="1" sequence="1" bitsNum="16" role="Other" value="EB90" />
<FrameItem name="帧版本号" ID="2" sequence="2" bitsNum="4" role="Other" value="1100" />
<FrameItem name="通过标识" ID="3" sequence="3" bitsNum="1" role="Choose">
<Option name="A类帧">0</Option>
<Option name="B类帧">1</Option>
</FrameItem>
<FrameItem name="内务命令标识" ID="4" sequence="4" bitsNum="1" role="Choose">
<Option name="遥控应用数据">0</Option>
<Option name="内务命令">1</Option>
</FrameItem>
<FrameItem name="空闲位" ID="5" sequence="5" bitsNum="2" role="Other" value="00" />
<FrameItem name="航天器识别字" ID="6" sequence="6" bitsNum="16" role="Other" value="0033" />
<FrameItem name="虚拟信道识别字" ID="7" sequence="7" bitsNum="6" role="VirtualChannel">
<Option name="直接指令">18</Option>
<Option name="地测间接指令">12</Option>
<Option name="遥控间接指令">2 E</Option>
<Option name="UHF间接指令">1 A</Option>
<Option name="中继转发指令">13</Option>
</FrameItem>
<FrameItem name="帧长" ID="8" sequence="8" bitsNum="10" role="Length" addPara="-1">2-12,49</FrameItem>
<FrameItem name="帧序列号" ID="9" sequence="9" bitsNum="8" role="Sequence" />
<FrameItem name="段头" ID="10" sequence="10" bitsNum="2" role="Other" value="03" />
<FrameItem name="多路接收地址指针" ID="11" sequence="11" bitsNum="6" role="Other" value="00" />
<FrameItem name="段" ID="12" sequence="12" bitsNum="-1" role="Paragraph">
<FrameItem name="段版本号" ID="13" sequence="13" bitsNum="3" role="Other" value="00" />
<FrameItem name="段类型" ID="14" sequence="14" bitsNum="1" role="Other" value="01" />
<FrameItem name="段副导头标识" ID="15" sequence="15" bitsNum="1" role="Other" value="01" />
<FrameItem name="段TID" ID="16" sequence="16" bitsNum="1" role="Delay">
<Option name="实时">00</Option>
<Option name="延时">01</Option>
</FrameItem>

表 6 工况指令详情
Table 6 Working condition instruction details

序号	间隔/s	执行时间 (BLT)	指令类型	指令码	指令名称	参数
1	t_0 -250 s	2021-10-17 11:54:23	地支工况指令	D142	复接调制器载荷 通道选择	十六进制参数B0B1:0x0A68; 红外相机主 备份选择: 主份; 微光及多谱段主备份选 择: 主份; 二进制参数: 0x0; 固定参数: 0x6868686868

表 7 指令反演部分结果
Table 7 Instruction inversion partial results

数据块内容	反演结果
0351F0A68	十六进制参数B0B1: 0A68 (0x0A68)
E06868686	红外相机主备份选择 (b): 主份 (1b)
868AAAA0	微光及多谱段主备份选择 (b): 主份 (11b)
722247918	二进制参数 (b): 00000 (0x0)
A0D555001	固定参数 (B): 6868686868 (0x6868686868)
31F55AA00	包校验 (B): AAAA (1010101010101010)

指令正确性的指令反演技术. 经实践验证, 设计实现的技术可确保卫星任务的稳定性和可靠性, 实现最大化接收效益, 提高了卫星系统整体效能.

针对 SDGSAT-1 卫星多载荷、数据传输要求高等任务特点, 设计并实现了一套面向 SDGSAT-1 卫星任务规划与指令自动生成一体化的软件, 相关成果

已应用于卫星日常在轨业务化运行, 为卫星任务规划的发展和实际应用提供了一种高效的解决方案, 可为与具有相似任务特点的卫星任务规划系统设计提供借鉴.

参考文献

- [1] GUO Huadong, WANG Lizhe, CHEN Fang, *et al.* Scientific big data and digital earth[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(35): 5066-5073 (郭华东, 王力哲, 陈方, 等. 科学大数据与数字地球 [J]. *科学通报*, 2014, **59**(12): 1047-1054)
- [2] GUO H D, DOU C Y, CHEN H Y, *et al.* SDGSAT-1: the world's first scientific satellite for sustainable development goals[J]. *Science Bulletin*, 2023, **68**(1): 34-38
- [3] LEVINSON R, NAG S, RAVINDRA V. Agile satellite planning for multi-payload observations for earth science[OL]. arXiv preprint arXiv: 2111.07042, 2021
- [4] QI L T, LI L Y, NI X Y, *et al.* On-orbit spatial quality evaluation of SDGSAT-1 thermal infrared spectrometer[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 7507505
- [5] ZHANG G H, LI X H, HU G X, *et al.* Mission planning issues of imaging satellites: summary, discussion, and prospects[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, **2020**: 7819105
- [6] FAN Kai, CUI Benjie, CHEN Zhansheng, *et al.* Autonomous mission planning design and application of a fast responsive small satellite[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2021, **38**(4): 31-37 (范凯, 崔本杰, 陈占胜, 等. 一种快速响应型小卫星的自主任务规划设计与应用 [J]. *上海航天 (中英文)*, 2021, **38**(4): 31-37)
- [7] ZHANG Jiawei, XING Lining, ZHANG Wei, *et al.* A united mission planning algorithm framework based on uniform resource encoding for imaging satellites[J]. *Control and Decision*, 2022, **37**(6): 1497-1504 (张佳唯, 邢立宁, 张玮, 等. 基于统一资源编码的成像卫星联合任务规划算法框架 [J]. *控制与决策*, 2022, **37**(6): 1497-1504)
- [8] PENG G S, SONG G P, XING L N, *et al.* An exact algorithm for agile earth observation satellite scheduling with time-dependent profits[J]. *Computers & Operations Research*, 2020, **120**: 104946
- [9] LI Jufang, BAI Baocun, CHEN Yingwu, *et al.* Optimization algorithm based on decomposition for satellites observation scheduling problem[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2009, **29**(8): 134-143 (李菊芳, 白保存, 陈英武, 等. 多星成像调度问题基于分解的优化算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2009, **29**(8): 134-143)
- [10] ZHANG Lining, HUANG Xiaojun, QIU Dishan, *et al.* Heuristic dynamic adjust of task scheduling for earth observing satellite[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, **47**(30): 241-245 (张利宁, 黄小军, 邱涤珊, 等. 对地观测卫星任务规划的启发式动态调整算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, **47**(30): 241-245)
- [11] WU G H, WANG H L, 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
- [12] ZHANG J W, XING L N. An improved genetic algorithm for the integrated satellite imaging and data transmission scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, **139**: 105626
- [13] AGHEVLI A, BENCOMO A, MC CURDY M. Scheduling and Planning Interface for Exploration (SPIFe) [C]//Proceedings of International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS2011). Freiburg: ICAPS, 2011
- [14] FRUTH T, LENZEN C, GROSS E, *et al.* The EnMAP mission planning system[M]//PASQUIER H, CRUZEN C A, SCHMIDHUBER M, *et al.* Space Operations: Inspiring Humankind's Future. Cham: Springer, 2019: 455-473
- [15] LIU X L, FANG Y, CHEN J M, *et al.* Effective approaches to solve p-center problem via set covering and SAT[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 161232-161244
- [16] HE Renjie, GAO Peng, BAI Baocun, *et al.* Models, algorithms and applications to the mission planning system of imaging satellites[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2011, **31**(3): 411-422 (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)
- [17] REN Wang. Design and Implementation of Imaging Satellite Mission Planning Subsystem[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012 (任望. 成像卫星任务规划子系统的设计与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012)
- [18] XU Yudong, ZHOU Jingbo, YIN Jiazhao, *et al.* Review of mission planning strategies and applications of earth observation satellites[J]. *Radio Engineering*, 2021, **51**(8): 681-690 (许宇栋, 周敬博, 尹嘉昭, 等. 对地观测卫星任务规划策略及应用研究综述 [J]. *无线电工程*, 2021, **51**(8): 681-690)
- [19] GUO Huadong, LIANG Dong, CHEN Fang, *et al.* Big earth data facilitates sustainable development goals[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(8): 874-884 (郭华东, 梁栋, 陈方, 等. 地球大数据促进联合国可持续发展目标实现 [J]. *中国科学院院刊*, 2021, **36**(8): 874-884)

作者简介



蔡济济 男, 1988 年 12 月出生于江西省南昌市, 现为中国科学院微小卫星创新研究院仿真与运控中心系统工程室主任, 副高级工程师, 主要研究方向为卫星地面遥测遥控处理研究、健康管理、大数据、任务规划与轨道预报等.

E-mail: caijj@microsat.com