

巨型感知星座星地一体化智能化资源管控体系架构

柴英特¹, 王 港¹, 张超^{1,2}, 朱光熙¹, 付 伟^{1,2}, 郭争强¹

(1.中国电子科技集团有限公司航天信息应用技术重点实验室, 河北 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团有限公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘 要: 巨型感知星座将具备星上自动处理、星上自主规划、多载荷多模式自动切换等能力, 传统的单纯依赖地面系统进行天基资源管控的模式已不能满足巨型感知星座的要求。针对巨型感知星座智能化和网络化资源管控的要求, 提出一种星地一体化智能化资源管控体系架构, 具体设计星上部分、地面部分的工作内容以及星上与地面的交互机制, 能很好地适用于巨型感知星座的自主资源管控, 实现巨型感知星座观测系统的“网络化、自主化、智能化”, 可在国家安全重大应急响应等任务方面发挥重要作用。

关键词: 巨型感知星座; 资源管控; 星地一体; 智能化; 星地交互

中图分类号: V19

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022027

Satellite-Earth Integration Intelligent Resource Management and Control Architecture of Giant Sensing Constellation

CHAI Yingte¹, WANG Gang¹, ZHANG Chao^{1,2}, ZHU Guangxi¹, FU Wei^{1,2}, GUO Zhengqiang¹

1. CETC Key Laboratory of Aerospace Information Applications, Shijiazhuang 050081, China

2. The 54th Research Institution of CETC, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: The giant sensing constellation will have the capabilities of on-board automatic processing, on-board independent planning, multisensors and multi-mode automatic switching. The traditional control mode of relying solely on the ground system can no longer meet the requirements of the giant sensing constellation. According to the requirements of intelligent and networked control, an integrated intelligent resource management and control architecture was proposed. It was based on the integration of satellite and earth. The work contents of satellite and earth were specifically designed. The interaction mechanism between satellite and earth was designed. The architecture it proposed could be well applied to the independent resource management and controlled of giant sensing constellation. The architecture realized the "networking, autonomy and intelligence" of the giant sensing constellation and it could played an important role in major national security emergency response and other tasks.

Keywords: giant sensing constellation, resource management and control, integration of satellite and earth, intellectualization, satellite earth interaction

0 引言

巨型感知星座通常指遥感卫星数量不少于1万颗的卫星星座。随着全球巨型低轨感知星座^[1-4]建设的兴起和商业应用推广, 其批量研制、快速部署、大容量、低时

延、全球覆盖等特点为天基观测系统建设及能力提升提供了新思路、新方法。未来低轨巨型感知星座将具备星上自动处理、星上自主规划、多载荷多模式自动切换、数据广播分发、星间链路通信等能力, 相比已有卫星,

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U20B2064)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.U20B2064)

巨型感知星座提高了持续观测时间、增加了观测范围，可通过多星组网接力实现持续观测，成像能力大幅提升，在溢油监测、海上搜救、核应急救援与监管、地震应急救援等国家安全重大应急响应等任务中发挥重要作用。未来低轨高密度综合态势感知星座必将是一个发展趋势，是未来卫星网络的主要形式，同时巨型感知星座资源管控技术将成为支持国家安全重大应急响应应用模式研究的重要技术手段。巨型感知星座观测系统示意图1所示。

国家安全重大应急响应的应用中，用户观测需求与任务模式的复杂化，以及成像覆盖范围大、重访周期短的需求，对巨型感知星座观测系统的“网络化、自主化、智能化”提出了更高的要求。

现有“地面决策，星上执行”的资源管控模式^[5-7]灵活性不足、时效性较差，且不能实时掌握星上资源状态，无法最大化卫星观测效能，无法对动态的环境变化做出迅速响应，难以有效发挥星上处理^[8]、星间链路等技术变革带来的多星协同的潜力。传统的资源管控模式已经越来越不适应未来航天任务快速响应的需要，单纯依赖地面系统进行天基资源管控的模式需要匹配性发展，亟须开展星地一体智能化资源管控技术研究。

目前在巨型感知星座资源管控方面的主要研究如下。

参考文献[9]从星座维持控制、备份与阶段部署、自主导航和太空“交通”实时监测等方面论述了卫星星座运行管理的策略和技术方法。该方法在星座资源管控方

面有着一定的先进性，但是该方法面向的场景较单一，不具备面向具体任务的星座资源管控能力。

参考文献[10]提出了一种新的星地一体化导航星座管理模式。此模式只需一个地面站与可见卫星进行通信，星座状态信息通过星间链路传递至可见卫星，再下传给地面站，地面指令通过同样路径反方向传送至整个网络。另外在地面布设若干个位置已知的信号发射源，为星座的自主导航提供基准，星座的星历更新由星上计算机自主实现，采用这种模式极大减轻了地面站的任务负担和布局限制。同时，可以抑制星座的整体旋转，提高卫星星历的精度。该方法使得星座具备了一定的自主性，但是该方法不适用于遥感卫星星座。

参考文献[11]分析了星座规模、资源动态性、资源故障等因素对巨型星座系统面向性能管理的网络运维与资源管控带来的挑战，从业务预测、资源感知与维护及动态资源切片方面探讨面向巨型星座系统的网络运维与资源管控关键技术；并提出智能的网络管控架构来实现巨型星座系统的轻量级运维与资源管控，但是该方法只具备地面管控的能力，星座的自主性较差。

基于以上参考文献所提方法的不足，本文提出一种巨型感知星座星地一体智能化资源管控体系架构，具体设计了星上、地面的工作内容以及星上与地面的交互机制，实现了巨型感知星座观测系统的“网络化、自主化、智能化”。

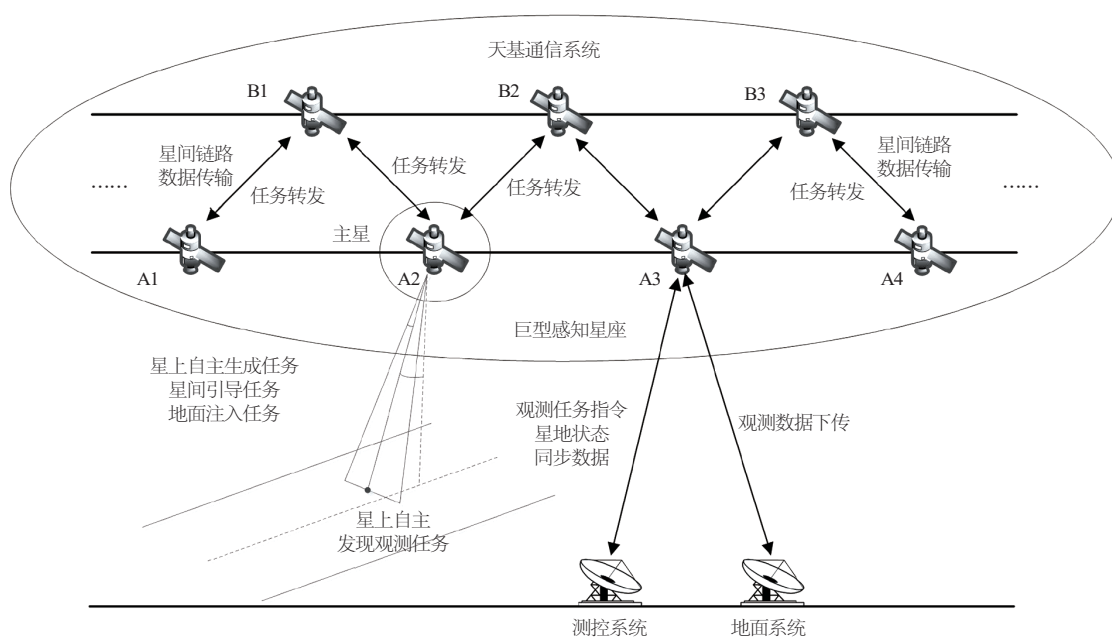


图1 巨型感知星座观测系统示意

1 架构设计

传统以地面为主的资源管控模式, 受限于卫星的处理能力, 均是被动接收地面系统的指令进行观测活动。在巨型感知星座中, 卫星星群可看作多个分布式处理节点, 使得卫星具备了星上自动处理、星上自主规划^[12-17]、多载荷多模式自动切换、数据广播分发、星间链路通信^[18-20]等能力, 星间通信能力、星载处理能力^[21-25]、存储能力、管理能力、决策能力^[26-27]的提升, 使得卫星具备了智能化可编程的条件。为了实现对卫星的高效利用, 使其能更好地服务于国家安全重大应急响应的需求, 需要设计新的资源管控模式。星上具备任务自主决策的能力, 不仅可以从地面接收观测需求, 也能接收星间引导需求, 通过星上在线决策自主生成高价值的观测任务; 同时卫星可以自主对任务进行规划, 产生合理的观测方案, 进行基于星间链路的多星协同观测; 最后卫星具备在轨处理的能力, 可自主完成遥感影像的智能解译, 实现任务的快速响应。星地一体智能化资源管控示意如图2所示。

由于星上具备自主规划能力, 地面测控系统可以上注更少的指令, 在有限时间内, 卫星可以接收更多的观测任务, 通过星上任务自主规划进行相应观测任务的执行。星上接收到观测任务后, 通过实时分析、判读云层遮挡等气象环境影响因素, 灵活自主地规划选择观测时机和观测角度, 提高应急任务的观测成功率, 并且能够

将获取的天基信息处理后再下传, 减少无用信息占用下传通道, 进而提升对应急响应需求的快速响应能力。另外, 地面可以按照一定规则设置某些固定模式上注给卫星, 并为星上提供一些先验知识, 不仅可以提升卫星执行的效率, 也可以提升卫星获取天基信息的准确性。

考虑卫星能够通过自身感知能力, 基于星间链路进行多星任务引导规划、星上任务在线决策、星上任务自主规划, 并能够根据卫星当前情况进行自主调整任务。地面系统职责的转变主要体现在两个方面: 其一是地面从单一的控制模式向地面监测仿真和控制的综合模式进行转变; 其二是从地面和卫星资源分离到地面和星上一体化使用, 即地面作为星上的扩展, 地面给卫星提供支持。

考虑到卫星的高度自主规划能力不可能一蹴而就, 采用星地一体智能化资源管控模式, 并非是完全取代传统的地面管控系统, 而是要将星地一体任务规划融入现有卫星管控体系。在新型星地一体智能化资源管控模式下, 以任务为中心、任务触发管控流程启动的特点更加明显。研究卫星观测需求特征、分析卫星可以执行的观测任务类型, 进行复杂任务分解; 将抽象观测任务分解为目标发现、目标识别与确认、目标跟踪等活动, 对多样用户需求进行综合统筹, 将各类任务需求高效转化为卫星系统可理解和可执行的任务模板; 然后通过多星协

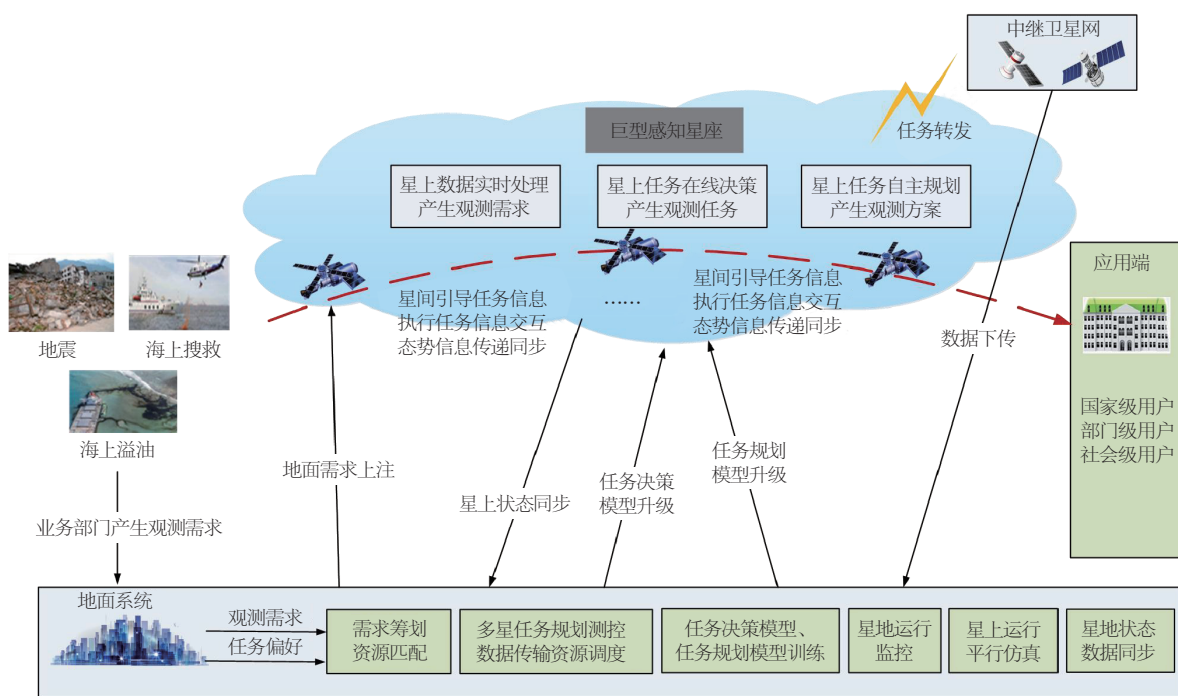


图2 星地一体智能化资源管控示意

同规划,完成星地一体化任务筹划。除了地面统筹规划的动作序列外,地面部分还要将热点搜索目标库上注巨型感知星座卫星。智能卫星基于星上的数据自主处理能力进行星上目标识别,待目标识别确认后,根据情况将目标数据下载到地面站,必要时通过广播分发将目标信息发送给各级应急响应部门。

因此,为满足天基资源支持国家安全重大应急响应的应用需求,适应星上多星自主协同和星上智能在线决策技术需求,本文采用领域工程方法,设计了包含星上与地面系统在内的功能完备、技术先进、体系健全、体制统一、功能可扩展的多层体系架构,包括星上分系统、地面分系统和星地交互分系统,如图3所示。

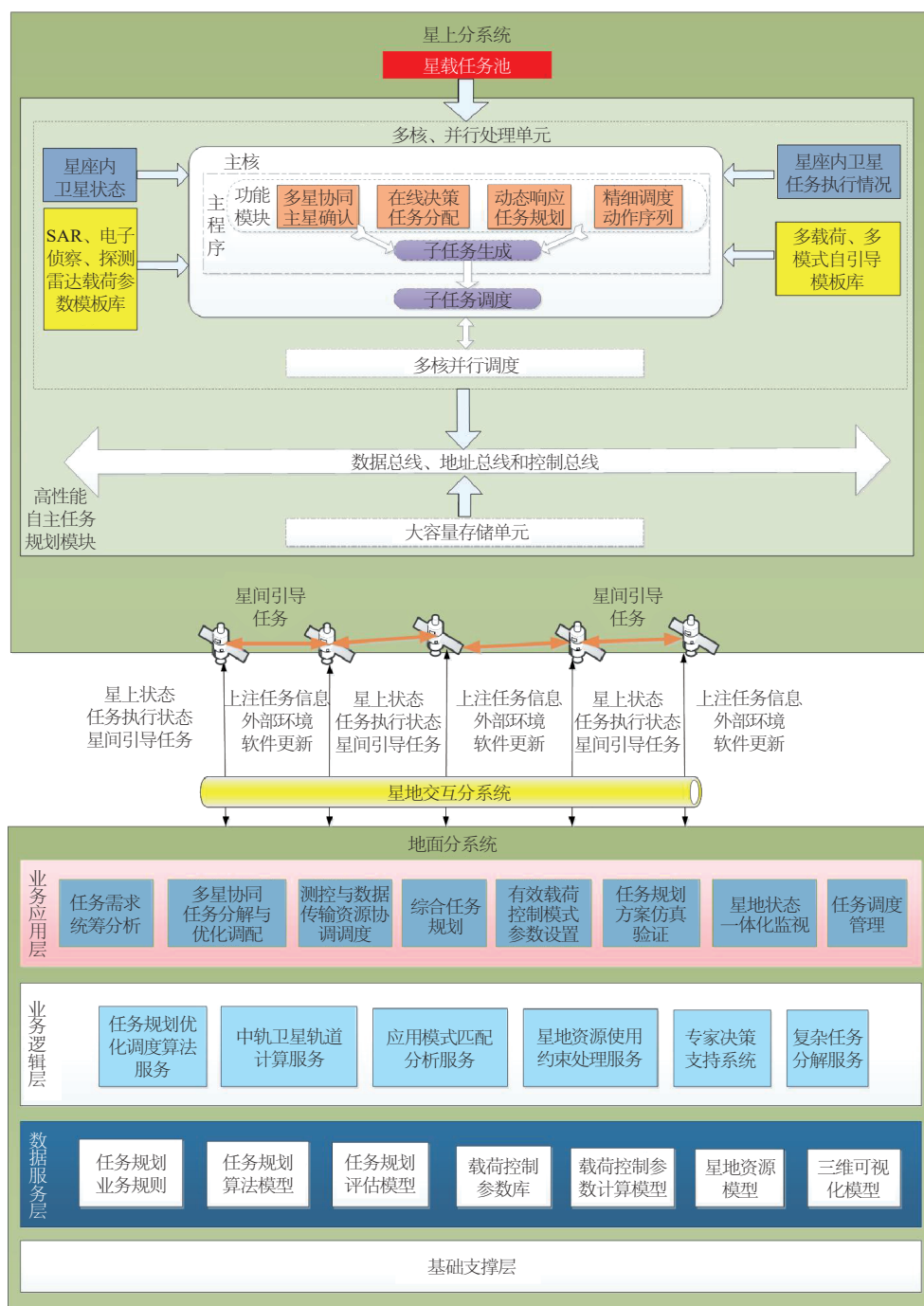


图3 巨型感知星座星地一体化智能化资源管控体系架构

1.1 星上分系统

1.1.1 星上分系统组成

针对巨型感知星座星地一体智能化资源管控体系，星上分系统设计了具有分级、并行、高速总线、大容量存储特点的高性能自主任务规划模块的实现方案，包含主星、从星、大容量存储单元3部分，如图4所示。

(1) 主星：执行星上自主任务规划主应用程序，包括星间协同任务分配计算、基于星上实时数据的在线决策、星上自主任务规划计算、星上精细化智能调度计算。综合多源任务输入的观测需求，收集星座内各个成员星的卫星状态和任务执行情况，生成星座内的任务分配方案以及星间的协同策略；在响应事件中中断的同时，执行星上自主任务规划主应用程序运行过程中产生的基于模块配置的子任务计算。

(2) 从星：执行星上自主任务规划主应用程序运行过程中产生的基于模块配置的子任务计算，子任务分解来源于星上实时数据的在线决策策略、单星或多星任务规划算法以及星上智能精细化调度方案。根据星上实时数据的处理结果，产生子任务的优先级、子任务申请调

度的先后排序，以及从星之间的计算资源进行子任务分配调度。

其中，“SAR载荷参数调节”根据任务规划输出的成像模式，基于星载全球特征目标库中对应目标的位置和高程信息、季节信息、目标特征信息（如建筑、沙漠、海洋等），在星载SAR载荷参数模板库中优化选择最为匹配的参数配置模板，实现SAR载荷参数设置。

“电子侦察载荷参数调节”根据特征目标信息，基于星载全球特征目标库中的特征频率，在星载电子侦察载荷参数模板库中优化选择最为匹配的参数配置模板，实现电子侦察雷达频率参数设置。

“探测雷达参数调节”根据特征目标信息，基于星载全球特征目标库中的特征频率、表面特征，在星载电子侦察载荷参数模板库中优化选择最为匹配的参数配置模板，实现探测雷达参数设置。

(3) 大容量存储单元：为实现对于星上自主任务规划各个功能与环节的有效支撑，在高性能自主任务规划模块中构建星载全球特征目标库（光学、SAR），星座待规划任务池（全体成员星），星座已规划未执行任务列表，星座已执行任务列表，星座卫星状态，多载荷、多模式自引导模板库，SAR载荷参数模板库，探测雷达参数模板库，电子侦察参数模板库。

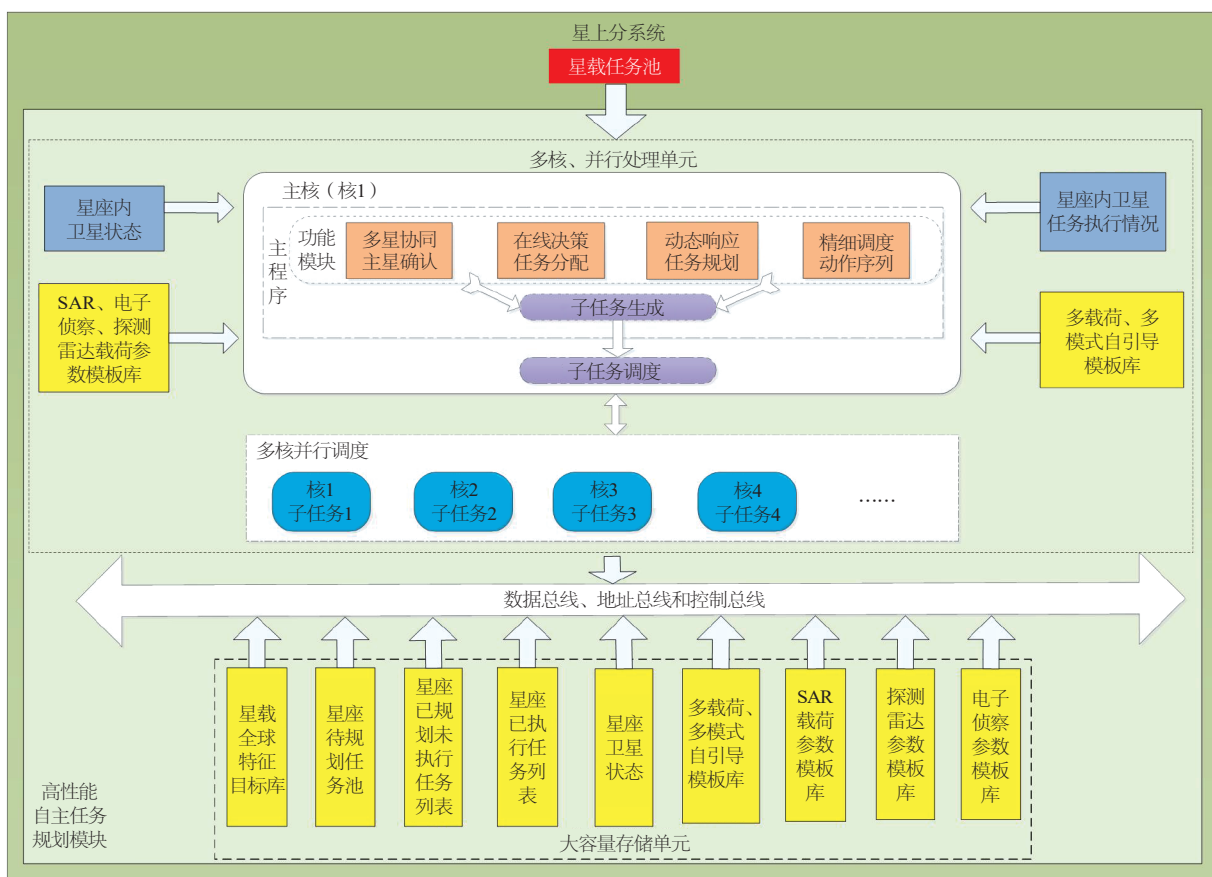


图4 星上分系统组成

列表（全体成员星），星座已执行任务列表（全体成员星），星座卫星状态（星座内各成员星的轨道、控制、固存、电源、载荷等），多载荷、多模式自引导模板库，SAR载荷参数模板库，探测雷达参数模板库，电子侦察参数模板库。

1.1.2 星上分系统功能

星地一体智能化资源管控架构下，星上分系统的功能主要有以下几个方面。

（1）任务自主生成与管理。

①接收地面上注任务：任务以目标要素（如经纬度）和任务意图（国家重大灾害、溢油及海上搜救、核应急救援和监管、地震应急救援等）的方式描述。

②接收星间转发任务：任务描述格式同地面上注的任务。

③自主生成任务：任务描述格式与地面上注任务相同，包括基于观测结果生成新任务和基于星间引导信息生成新任务。

（2）本星执行可行性判断。首先卫星基于自身掌握的态势信息，检测卫星自身能否插入任务，或自身状态调整执行，若不能插入或受限于自身载荷资源及类型限制，无法满足该任务应满足的条件，则执行下一步。

（3）主星申请与判断。向星座内其他卫星发布成为主星的申请，若星座内无主星，则成为主星；若当前星座内无主星，且多个卫星申请成为主星则进行主星争夺；若当前星座内存在主星，并且已建链，则将任务发送到主星。

（4）从星状态信息获取。将从星的卫星状态数据、任务执行状态数据以及外部环境状态数据等态势信息通过星间链路传递给主星。

（5）主星开展多星任务规划。主星获取卫星系统运行状态以及其他任务执行状态等态势信息开展“任务—资源”匹配和可用数据传输窗口计算，进行多星协同规划，生成任务分配方案。

（6）从星开展单星任务调度。将分配给从星的任务通过星间链路传递给从星，将分配的具体观测任务插入自身观测执行序列中，针对单星执行方案进行动态重调度，更新任务解析、动作分解、相机载荷开关机时序、下传链路、数据传输分系统开关机时序、工作模式设置、执行参数设置等单星执行方案。

（7）实时响应态势变化。每颗卫星维护态势库，结合前序任务情报数据和当前执行观测数据，进行情报数据融合，得到精度更高、信息更为全面的任务情报信息，情报态势发生变化，能够实时响应，自主决策生成新的观测任务，加入单位任务调度序列中。

（8）任务执行状态反馈。执行从星在观测完毕后，对任务执行状态进行采集，并进行图像切片预处理，形成初级业务产品，通过星间链路共享业务产品。

（9）态势数据传递和同步。具备卫星系统状态数据、任务执行状态数据以及外部环境状态数据等态势数据在执行卫星群和地面系统之间按需传递、实时共享的能力。

（10）模型管理。接收地面上注的在线决策和任务规划模型，更新星上模型；根据星上态势信息，自主调整在线决策和任务规划模型的相应参数。

1.2 地面分系统

1.2.1 地面分系统组成

巨型感知星座星地一体智能化资源管控体系中地面分系统负责汇集各种外部用户需求。卫星任务从任务时间紧迫角度可分为应急性任务和常规性任务；从目标大小资源能够一次开关机完成的角度可分为点目标和区域目标任务；从目标的移动属性角度分为静止目标和移动目标任务。从用户需求到卫星任务之间，也会存在描述上的不确定性和不匹配性，需要地面系统对任务的输入形式进行规范化处理，确定具体的载荷工作参数等。同时，还要将智能卫星的星上自主生成及星间引导任务同步至地面，由地面对星上任务进行统一筹划，为其安排数据传输资源、设置数据传输设备的开关机时段，同时更新地面方案，保持星地资源与任务状态的一致性。

针对地面分系统进行分层架构设计，使得系统构建时具有良好的灵活性和可扩展性。星地一体智能化资源管控体系地面分系统以抽象、分解出的多个公共服务或独立服务作为整个系统功能的支撑，包括基础支撑层、数据服务层、业务逻辑层、业务应用层等。以层次服务的方式构建系统功能，可显著降低系统间的耦合，提高系统的可扩展性。地面分系统组成如图5所示。

（1）基础支撑层：基础支撑层是地面分系统的底层和技术支撑层，提供任务管控平台运行所需的操作系统、数据库、中间件、网络、存储、计算等基础设施，同时提供包括面向服务、插件技术、工作流技术、数据持久化技术等在内的共性基础服务。

（2）数据服务层：负责维护巨型感知星座系统可用的平台、搭载载荷资源和最终服务的用户资源模型，包括任务规划业务规则、任务规划算法模型、任务规划评估模型、载荷控制参数库、载荷控制参数计算模型、星地资源模型、三维可视化模型等。

（3）业务逻辑层：依据具体应用需求，分析、总结、抽象出巨型感知星座系统各类典型的应用模式，并

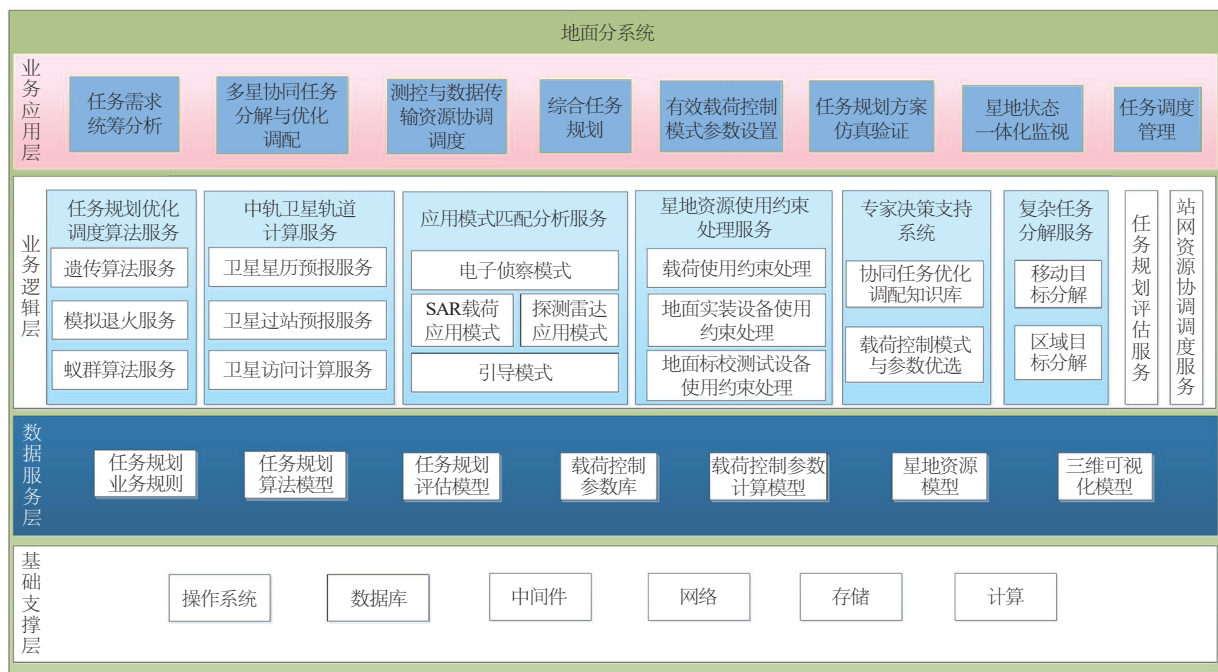


图5 地面分系统组成

针对特定任务进行应用模式匹配分析,包括SAR载荷应用模式、电子侦察模式、探测雷达应用模式、探测雷达引导SAR、电子引导SAR/探测模式等典型模式;建立专家决策支持系统,提供任务规划优化调度算法服务、中轨卫星轨道计算服务、有效载荷控制计算服务、星地资源使用约束处理服务、任务规划评估服务、站网资源协调调度服务。

(4) 业务应用层:业务应用层面向用户,是任务管控系统与用户之间实现信息交互与服务的接口;主要包括任务需求统筹分析、多星协同任务分解与优化调配、测控与数据传输资源协调调度、综合任务规划、有效载荷控制模式参数设置、任务规划方案仿真验证、星地状态一体化监视、任务调度管理等。

1.2.2 地面分系统功能

星地一体智能化资源管控架构下,地面分系统的功能主要有以下几个方面。

(1) 接收卫星自主生成的任务与星间协同任务规划、星上自主任务规划结果进行地面规划方案同步更新;建立与卫星系统完全平行的仿真平台,对卫星系统实现实时仿真;仿真任务执行过程,完成对卫星系统的实时监测。

(2) 接收各用户任务需求,进行任务分解与分析筹划,生成任务定单;结合任务需要和多星数据传输资源可见性预测,给各卫星分配数据传输窗口与测控窗口,

进行多星协同任务规划,实现星座内各卫星的任务分配,生成各卫星的任务表,生成指令数据上注卫星;若卫星与地面不可见不能及时上注指令,则通过星间路由规划,通过星间链路传输完成指令上注。

(3) 接收卫星系统的遥测信息和任务执行状态,仿真监视卫星系统的运行状态,根据卫星系统下传的遥测信息,更新地面模拟的星上资源状态,必要时更新星上资源预估模型;接收卫星系统的数据传输载荷观测数据、广播分发目标信息或通过其他通信手段下传的目标信息,更新目标态势。

(4) 跟踪监视模式下,为星上自主安排的观测任务补充分配数据传输窗口,以便实时监视目标态势。

(5) 地面分系统根据卫星下传信息与遥测数据,实时更新任务执行状态,监视星上任务执行情况,并进行任务闭环管理,接收卫星下传的目标信息进行态势更新。

(6) 模型学习。针对大量多星在轨任务执行过程数据、处理下传数据,通过各种数据处理与分析方法,提取参数配置、规划策略与方案设计等的经验信息,采用深度学习、强化学习等智能学习方法,进行在线决策与任务规划模型的学习、完善。

(7) 星地数据管理分析:能够存储星上、地面任务决策和规划的结果数据、星上遥测数据、地面仿真数据,并分析、提取、学习数据知识,为在线决策和任务规划模型学习提供学习样本。

1.3 星地交互分系统

为实现星地信息与数据的无缝互联,设计星地一体化智能化资源管控体系信息传输机制,分析星地数据传输的任务要求与特点,按照传输信息类型进行问题划分,设计星地同步数据交互模型。巨型感知星座星地一体化智能化资源管控体系数据链路示意如图6所示。

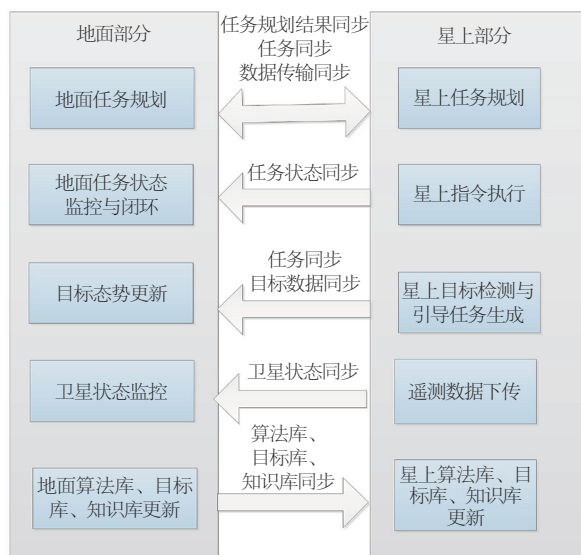


图6 巨型感知星座星地一体化智能化资源管控体系数据链路示意

地面基于用户需求触发执行动态任务规划,上注卫星,星上通过地面上注、星上自主生成任务与星间引导任务触发自主决策与规划调度,并适时通过各种通信手段下传任务状态信息,地面安排数据接收并更新任务规划方案,星上下传遥测数据与目标观测数据,地面仿真星地一体任务规划过程,保持星地同步。星地一体协同交互内容与交互流程如图7所示。

(1) 遥测数据按常规通过对地测控通道下传到地面,或通过中继测控通道传输到地面,必要时可通过星间链路中转,使遥测数据快速下传到地面,以便保持星地数据近实时同步,通过星地数据传输通道与中继数据传输通道下传平台遥测数据。

(2) 载荷观测数据按常规通过对地数据传输通道下传到地面,或通过中继数据传输通道下传到地面。

(3) 星上处理的目标数据可与载荷数据合并通过对地数据传输通道下传到地面,或通过中继数据传输通道下传到地面,也可根据用户需要通过广播分发方式下传到用户终端。

(4) 上注指令数据按常规通过星地测控通道上行注

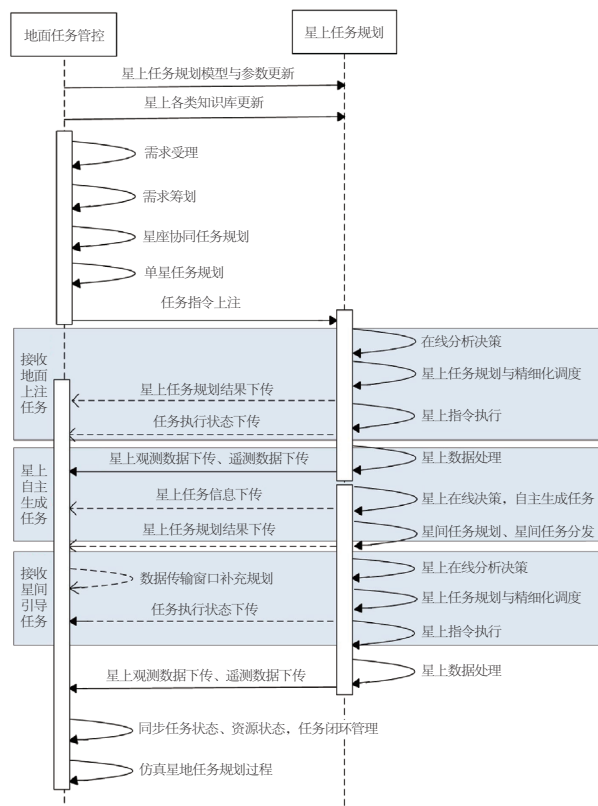


图7 星地一体协同交互内容与交互流程

入,或通过中继测控通道上行注入,也可在需要时通过星间链路中转注入。

(5) 星上任务规划模型与参数更新以及各类目标库、知识库等上注频率较低,通过星地测控通道上行注入,或通过中继测控通道上行注入。

(6) 星上任务状态信息、新任务信息、任务规划结果信息在有数据传输时,可合并数据一起下传,无数据传输时,通过广播分发方式下传地面,若相应卫星对地不可见时,可通过星间链路中转到可见的卫星下传地面。

2 结束语

本文围绕国家安全重大应急响应的应用需求,针对未来巨型感知星座的“网络化、自主化、智能化”的管控需求,为充分发挥卫星能感知、能决策、能执行和能协同的关键能力,设计了一种全新的星地一体化智能化资源管控体系架构,打破了原有地面管控系统设计和工作流程,优化了卫星管控系统对用户的服务模式,能够充分发挥巨型感知星座的自治能力,实现智能卫星的高效利用,提高观测时效性和快速响应能力。

参考文献：

- [1] 刘韵洁, 黄韬, 张晨, 等. 未来网络的发展趋势与机遇[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(1): 1-5.
LIU Y J, HUANG T, ZHANG C, et al. Challenges and opportunities of future network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(1): 1-5.
- [2] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.
- [3] 孙晨华, 庞策. 低轨卫星互联网体系和技术体制研究发展路线思考[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 521-527.
SUN C H, PANG C. Thoughts on the research and development of the LEO satellite Internet system and technology system[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 521-527.
- [4] 刘雨霏, 罗芳. 遥感星座的今天与未来[J]. 卫星与网络, 2019(3): 24-29.
LIU Y F, LUO F. The present and future of remote sensing constellations[J]. Satellite & Network, 2019(3): 24-29.
- [5] 戴庆龙, 李建武. 云计算中一种基于排队论的资源分配方案[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(5): 47-51.
DAI Q L, LI J W. A queueing theory-based resource allocation scheme in cloud computing environment[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(5): 47-51.
- [6] 杨学猛, 赵悦, 李娟, 等. 低轨星座系统测控技术与管理研究[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 517-526.
YANG X M, ZHAO Y, LI J, et al. Research on TT & C and operation management technology for LEO constellation[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 517-526.
- [7] 刘云杰, 王彬, 刘友永. 基于资源池的航天测控资源动态重组实现技术[J]. 无线电工程, 2018, 48(8): 699-703.
LIU Y J, WANG B, LIU Y Y. Research on implementing technologies of dynamic resources restructuring for aerospace TT & C based on resource pooling[J]. Radio Engineering, 2018, 48(8): 699-703.
- [8] 刘晓丽, 张恒, 王京京. 遥感卫星在轨测试任务管控方法[J]. 无线电工程, 2018, 48(1): 40-45.
LIU X L, ZHANG H, WANG J J. Management and control techniques for remote sensing satellite on-orbit test mission[J]. Radio Engineering, 2018, 48(1): 40-45.
- [9] 赵娜, 董峥. 卫星星座运行管理方法研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(6): 62-64.
ZHAO N, DONG Z. Study on satellite constellation management method[J]. Radio Engineering, 2010, 40(6): 62-64.
- [10] 何赞晟, 俞杭华, 池忠明. 一种新的星地一体化导航卫星星座管理模式设计[C]//中国卫星导航学术年会. [出版地不详: 出版社不详], 2010.
HE Y S, YU H H, CHI Z M. Design of a new satellite-ground integrated navigation satellite constellation management mode[C]// China Satellite Navigation Academic Annual Conference. [S.l.:s.n.], 2010.
- [11] 周笛, 敏感, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.
ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system full text replacement[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.
- [12] 孙海权, 马万权, 陈金勇, 等. 虚拟星座资源组合关键技术研究[J]. 无线电工程, 2018, 48(6): 507-511.
SUN H Q, MA W Q, CHEN J Y, et al. Research on key technology of virtual constellation resource combination[J]. Radio Engineering, 2018, 48(6): 507-511.
- [13] 孙慧, 李晖, 赵曼, 等. 基于贪心——线性规划算法的敏捷卫星观测时段选取[J]. 无线电工程, 2018, 48(9): 803-809.
SUN H, LI H, ZHAO M, et al. Selection of agile satellite observation period based on greedy-linear programming algorithm[J]. Radio Engineering, 2018, 48(9): 803-809.
- [14] 徐崇彦, 何川东, 邹冬冬. 基于贪婪策略的灵巧卫星启发式任务规划算法[J]. 无线电工程, 2018, 48(10): 908-912.
XU C Y, HE C D, ZOU D D. Heuristic mission planning algorithm of agile satellite based on greedy algorithm[J]. Radio Engineering, 2018, 48(10): 908-912.
- [15] 刘翔, 雷明佳, 陈韬亦, 等. 基于贪婪策略的遗传算法求解多星观测任务优化[J]. 无线电工程, 2019, 49(1): 57-62.
LIU X, LEI M J, CHEN T Y, et al. Genetic algorithm based on greedy strategy for multi-satellite observation task optimization[J]. Radio Engineering, 2019, 49(1): 57-62.
- [16] 柴伟杰, 张超. 基于图论的多星综合任务规划双蚁群算法[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 534-539.
CHAI W J, ZHANG C. Double ant colony algorithm of multi-satellite mission planning based on graph theory[J]. Radio Engineering, 2019, 49(6): 534-539.
- [17] 刘明亮, 王小燕, 邱虎, 等. 高分多模卫星应急任务规划流程设计[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 212-217.
LIU M L, WANG X Y, QIU H, et al. Application in emergency tasks scheduled with the GFDM-1 satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(3): 212-217.

- [18] 张喜明, 张耀宗, 钟胜, 等. 星地链路中抗误码实时图像解压技术[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(2): 38-40.
ZHANG X M, ZHANG Y Z, ZHONG S, et al. Error resilient real-time image decompression for satellite-ground links[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(2): 38-40.
- [19] 胡东伟, 宋春晓. 低轨卫星移动通信系统的星间链设计[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(5): 11-15.
HU D W, SONG C X. Design of the inter-satellite link of low earth orbit mobile satellite communication systems[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(5): 11-15.
- [20] 王为众, 赵永利, 郁小松, 等. 一种适用于天地一体化网络的卫星通信港设计[J]. 无线电通信技术, 2018, 44(2): 124-129.
WANG W Z, ZHAO Y L, YU X S, et al. A design of satellite communication formation suitable for integrated space-ground network[J]. Radio Communications Technology, 2018, 44(2): 124-129.
- [21] 李刚, 刘瑜, 张庆君. 多源卫星数据在轨智能融合技术[J]. 中国科学基金资助项目, 2021, 35(5): 708-712.
LI G, LIU Y, ZHANG Q J. On the development of on-board fusion of multi-source satellite data[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(5): 708-712.
- [22] 张晓光, 代树武. 在轨运行卫星的智能规划调度算法[J]. 微计算机信息, 2008, 24(3): 6-8.
ZHANG X G, DAI S W. The intelligence scheduling and planning algorithm for on-board Satellite[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(3): 6-8.
- [23] 王密, 张致齐, 董志鹏, 等. 高分辨率光学卫星影像高精度在轨实时云检测的流式计算[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 760-769.
WANG M, ZHANG Z Q, DONG Z P, et al. Stream-computing based high accuracy on-board real-time cloud detection for high resolution optical satellite imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 760-769.
- [24] 戴汨, 尤政. 基于Transputer的小卫星图像星上智能处理[J]. 航天器工程, 2000, 9(3): 12-20.
DAI G, YOU Z. On-board intelligent processing of small satellite images based on Transputer [J]. Spacecraft Engineering, 2000, 9(3): 12-20.
- [25] 文载道. 基于压缩表示学习与深度认知推理的SAR图像分类与目标识别[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
WEN Z D. Compressed representation learning and deep cognitive inference for SAR image classification and target recognition[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.

- [26] 陈勇. 对地观测用户需求智能融合处理技术[J]. 无线电工程, 2019, 49(7): 551-556.
CHEN Y. Intelligent merging processing technology for earth-observation user requirements[J]. Radio Engineering, 2019, 49(7): 551-556.
- [27] 王港, 帅通, 陈金勇, 等. 基于深度强化学习的航天信息综合应用与决策研究[J]. 无线电工程, 2019, 49(7): 564-570.
WANG G, SHUAI T, CHEN J Y, et al. Research on comprehensive application and decision of aerospace information based on deep reinforcement learning[J]. Radio Engineering, 2019, 49(7): 564-570.

[作者简介]



柴英特 (1993-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为遥感卫星智能管控、遥感信息智能处理。



王港 (1990-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为多源遥感信息处理、目标伪装检测评估。



张超 (1986-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航天任务管控技术。



朱光熙 (1994-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为卫星管控、遥感信息应用。



付伟 (1986-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航天任务管控与规划技术。



郭争强 (1993-), 男, 助理工程师, 主要研究方向为遥感影像智能解译、卫星任务管控。