

天地一体通遥融合架构及其应用设想

苏文博, 张 驰, 王妮炜, 秦智超
(中国星网网络创新研究院有限公司, 北京 100029)

摘 要: 遥感系统是天基对地观测的重要手段, 由于在“采集-处理-分发”等环节中存在测控指令、数据传输、数据处理及产品分发不及时等问题, 难以有效实现全天时、全天候、全球覆盖的实时智能遥感应用服务, 低轨星座的通信和遥感的融合是解决现有天基系统中通遥分治、服务响应滞后等问题的有效途径。概述国内外通遥融合现状, 设想天地一体通遥融合总体架构、发展阶段及其服务模式, 提出通遥融合架构下的关键技术, 最后以典型应用场景进行通遥融合应用流程的探索。

关键词: 通遥融合; 遥感; 遥感应用

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024019

Integrated Architecture and Application Assumption of Earth-Space Communication and Remote Sensing Combination

SU Wenbo, ZHANG Chi, WANG Niwei, QIN Zhichao
China Satellite Network Innovation Co., Ltd., Beijing 100029, China

Abstract: Remote sensing systems are important means of space-based Earth observation, due to issues such as delayed measurement and control commands, data transmission, data processing, and product distribution in the "collection-processing-distribution" process, it is difficult to effectively achieve real-time intelligent remote sensing application services that cover all day, all weather, and the world. The combination of low earth orbit communication and remote sensing satellite constellations is an effective way to solve service delay and separate control problems in existing systems. It summarized the current situation of communication and remote sensing integration over the world, and then imagined the architecture, development stages, and service modes of the integration of communication and remote sensing. Finally, key technologies under the communication and remote sensing integration architecture were proposed, and the application process of communication and remote sensing integration used typical application scenarios were explored.

Keywords: communication and remote sensing integration, remote sensing, remote sensing applications

0 引言

低轨遥感卫星是实现地对地观测的重要手段, 多源遥感数据已广泛应用于应急救援、自然资源、国土资源等领域。近几年, 以 Starlink 为代表的低轨通信卫星备受关注, 我国同时规划了“鸿雁”“虹云”等通信星座, 卫星互联网进入快速发展期, 未来在经济建设、应急救援和大众民生领域具有较大市场价值。

现有低轨遥感卫星系统中存在遥控指令上注流程烦琐、地面站数据接收受限、地面数据传输不及时、数据分

发能力弱等问题, 导致遥感数据获取与信息服务响应滞后, 难以满足用户对于遥感服务高时效的要求, 提高遥感服务响应速度的关键在于测控指令和遥感数据的快速传输及分发、数据自动化处理及信息智能化提取。卫星互联网具有远距离通信、中继传输、覆盖全面、通信频带宽且容量大等优点^[1], 通过卫星互联网可提供近实时的测控数据和遥感数据传输能力, 进一步借助卫星互联网系统直连终端的特性, 结合星上处理能力, 用户可通过终端直接向卫星互联网系统发起遥感请求并即时接收遥感产品, 实现即时遥感愿景, 提升卫星互联网应用和服务能力。

1 通遥融合现状分析

1.1 通遥融合现状

针对低轨星座的通信和遥感的融合,国内外学者和企业已经展开了初步研究。在国内,针对集成遥感、通信、导航系统的空间基础设施,我国在《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》中提出了“一星多用、多星组网、多网协同、数据集成”的发展思路,分阶段逐步建成技术先进、自主可控、布局合理、全球覆盖,由卫星遥感、通信广播、导航定位三大系统构成的国家民用空间基础设施^[2]。李德仁院士等^[3]提出构建卫星、通信、遥感于一体的天基信息实时服务系统,通过多载荷集成、多星协同、天地网络互联、智能终端实现通遥融合应用。王密等^[4]以全天时、全天候遥感信息实时智能服务为目标,提出通遥星群的智能服务体系,探讨了结合星地星间链路、5G/6G的星群自主任务管理、动态规划和协同智能处理等关键技术。珞珈三号 01 星通过遥感卫星与互联网、5G 技术的集成,打通手机 App 和星地通信链路,实现全球范围遥感数据从获取、在轨处理到应用终端的分钟级遥感信息服务。

国外企业在通遥融合方面也有较大进展,Iridium Next 系统是第一个搭载其他有效载荷的商业系统,通过搭载 ADS-B、AIS 以及 GEOScan 等传感器实现航空交通管制、船只定位跟踪以及全球气象水文感知服务^[5]。2018 年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)发起“黑杰克”项目,计划通过多个通用商业化卫星平台搭载通信、导航、遥感等多类任务载荷,构建 60~200 颗卫星组成的星座,并通过星间激光链路在轨相互连接,近实时地将在轨收集的传感器数据传送给地面人员^[6],美军计划借助低轨星座通信传输能力连接传感器与平台。美国“扩散作战人员空间架构(PWSA)”通过构建不同功能层的系统,将通信、导航、感知有机融合,能够对不同速度的目标进行全程跟踪和监管,支持空间态势感知,实现天地间、不同功能层卫星间、同一功能层不同卫星间的互联互通,提供 PNT 服务。俄罗斯于 2018 年提出打造通遥一体化多功能星座——“球体”,可提供宽带通信、机器对机器通信、遥感、导航等多种功能^[7]。2019 年,遥感信息服务 Capella Space 公司与 AddValue 公司达成协议,使用其依托 Immarsat 全球 L 频段通信卫星建立的星间数据中继系统(IDRS),实现全球任意地点的卫星数据快速分发服务。2022 年 12 月,SpaceX 发布“星盾”卫星互联网星座计划,初步侧重于提供对地观测、卫星通

信和载荷托管 3 个方面^[8]。

1.2 现状分析

基于上述通遥融合现状分析,总体来说,基于低轨卫星星座的通信和遥感研究已取得一些进展,目前通遥融合方式可以归纳为以下几种方式。

(1) 数据中继:通过通信卫星星间及星地链路,实现遥感数据的快速回传及分发,如 Capella Space 公司的业务。

(2) 载荷搭载:通过通用平台搭载除通信之外的遥感、AIS、ADS-B 等载荷,实现对地观测及其他服务,如 Iridium Next 系统。

(3) 一星多用:通过遥感、通信卫星间互联互通和更改模块化载荷实现通遥以及计算功能融合,如“星盾”和“黑杰克”系统;通过在单星集成遥感数据采集与 5G 等功能,实现遥感和通信功能集成,且在星上开展在轨数据处理,提高产品交付时效性,降低星地链路负载,实现直接面向终端的遥感产品分发,如珞珈星座。

(4) 体系化设计:通过体系化分层设计,融合遥感星座和通信星座,如 PWSA、“球体”等系统。

上述几种通遥融合方式主要关注低轨遥感卫星系统的某一环节提高服务能力,比如数据中继仅提高数据传输效率,在测控环节和数据处理环节时效性差的问题并未得到改善;载荷搭载方式通过共平台方式提高载荷数量,仅能从载荷数量上提高对地观测频次。总的来说,上述几种方式并未高效解决低轨遥感卫星系统服务响应时效性低的问题。因此,本文提出的天地一体通遥融合架构拟从遥感卫星系统各个环节解决响应时效性差的问题。

2 天地一体通遥融合架构设想

2.1 总体架构

天地一体通遥融合主要在星座、平台及载荷方面进行融合,总体框架包括空间段(通信、遥感、算力载荷),地面段(地面站、运控中心、数据处理中心、数据分发中心、网关等)和用户段(用户终端)三大部分,如图 1 所示。通过该架构向不同层级用户提供低时延通信、大容量数据中继传输、分布式星上计算、遥感综合应用等服务。

2.1.1 空间段

空间段主要包含通信、遥感、算力以及多功能卫星形成的通感算混合星座,星座统一设计,并通过统一的测运

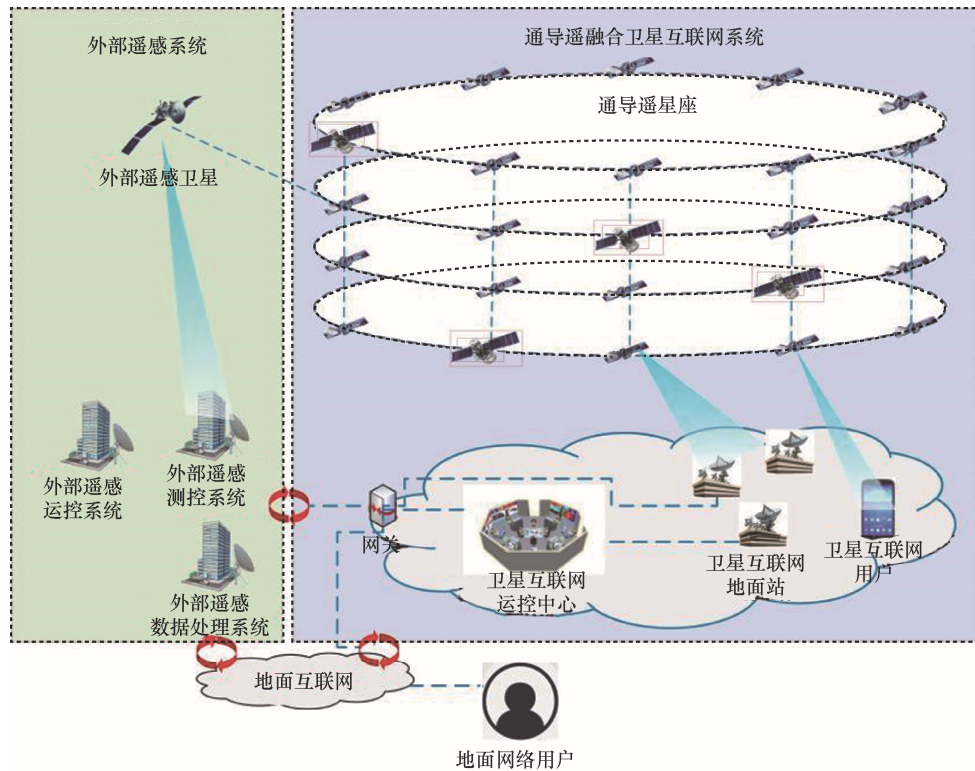


图1 通遥融合总体架构

控系统实现任务协同调度及星座统一管理,支持数据传输、对地观测、星上智能边缘计算、星上产品分发等功能在空间段的按需灵活部署。

在通信方面,不同卫星均具备通信功能并通过星间链路互联,部分卫星具备星地通信功能,实现卫星测控、星间数据传输及数据分发等功能;在对地观测方面,具备单独搭载遥感载荷的卫星及与其他功能星共星承载的遥感载荷,实现对地高频次、全覆盖观测;在星上计算方面,所有卫星均具备计算能力,部分为独立算力星,根据算力需求智能化调度计算资源,实现星上遥感影像、目标检测识别、变化检测等产品的生产。

2.1.2 地面段

地面段主要包括运控中心、地面站/信关站、数据处理及分发中心以及网关,负责对用户的管理、星地链路及地面网接入,支持用户管理、需求提报、卫星测运控、地面资源调度、数据处理、数据分发等功能,向用户提供通遥综合服务。

卫星互联网运控中心是整个混合星座管理控制的中枢,通过地面承载网络、地面站网、星地以及星间链路实现系统管控,提供任务规划调度、卫星平台和载荷管理、星座构型保持控制、星地路由规划与控制、卫星波束资源调度、电磁频谱共享和监管、网络资源分配与调度、天地

所有网络节点的监视和管理、业务处理、互联互通等功能,确保卫星互联网系统的高效、稳定、可靠运行,支持各类应用系统按需使用网络功能和网络资源。数据处理及分发中心主要负责地面段遥感影像、增值产品(DEM、DSM等)、信息产品(目标检测、变化检测等)等不同级别产品的存储、归档、生产及分发。卫星互联网地面站负责测控指令上注、数据星地传输,主要用于超出星上存储能力的海量数据、非星上分发数据等具备大容量、非实时特性数据的接收。

2.1.3 用户段

用户段包括卫星互联网用户和地面网络用户。用户可以通过终端直连卫星及地面运控中心进行需求提报,实现遥感产品接收。地面网络用户通过运控中心地面网络接收遥感产品,卫星互联网用户则利用卫星与终端链路接收遥感产品。

2.1.4 业务流程

天地一体通遥融合系统业务流程如图2所示,主要包括用户终端、卫星测运控中心、地面站/信关站、空间段、数据处理及分发中心共5个环节。用户终端用来提报需求及遥感产品接收。卫星测运控中心是最核心的环节,基于获取的卫星资源、地面站资源、计算资源的信息,完成成像、接收、处理及分发等任务规划,形成测控方

同时初步具备星上简单计算能力。

第二阶段：随着轻量计算板卡研制、平台适配能力增强，集成基础算力资源，提供星上简单计算服务。

第三阶段：随着火箭发射能力、卫星平台搭载能力以及能源系统的增强，实现遥感载荷搭载；随着星上通用计算平台等技术进步，实现算力资源集成升级，具备对地观测、星上综合计算、遥感基础应用能力。

第四阶段：随着数据中继、星上简单计算、对地观测能力的不断增强，提供完整的遥感综合服务。

2.2.2 服务模式

随着天地一体通遥融合系统分阶段建设，未来可以逐渐实现数据中继、算力支撑、对地观测、载荷托管、综合应用等 5 种服务模式。

(1) 数据中继服务

数据中继即多源数据传输，通过卫星互联网系统为内外部遥感系统提供卫星测控数据传输、星间遥感数据传输、遥感数据回传地面站、定标参数、数据处理算法及 AI 模型上传卫星等服务，实现用户终端、卫星测运控中心、

地面接收站、数据处理中心、遥感卫星、通信卫星之间的互联互通。数据中继服务模式业务流程如图 4 所示。

在遥感数据中继服务模式中，用户方通过购买服务使用卫星中继传输及地面站接收，减小卫星运营商地面站建设成本。用户向卫星测运控中心提报外部遥感数据中继需求，卫星测运控中心制定传输及接收计划，通过信关站上注卫星传输指令，外部遥感卫星通过星间链路将数据传输至通信卫星，通过星地链路将数据传输至地面站，通过地面链路分发至用户方。

(2) 算力支撑服务

天地一体通遥融合系统的算力分布于星上、信关站和测运控中心，构成星上边缘、地面边缘和云中心的算力分布架构。算力支撑服务主要面向实时性要求较高且计算量较小的需求，可将模型算法提前部署于星上，利用星上算力进行处理后直接分发，减小数据和产品在地面站、数据处理中心及用户间的传输时延。算力支撑服务业务流程如图 5 所示。

在星上计算服务中，用户向卫星测运控中心提报数据

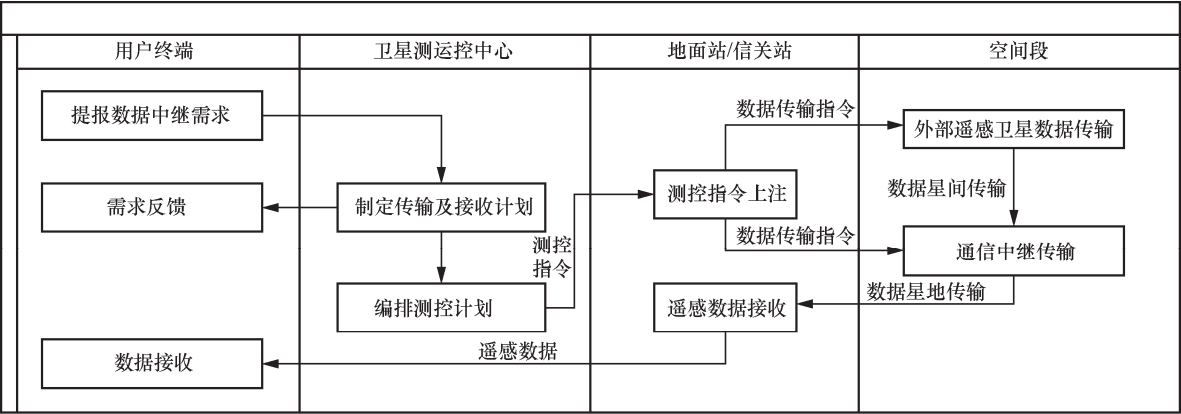


图 4 数据中继服务模式业务流程

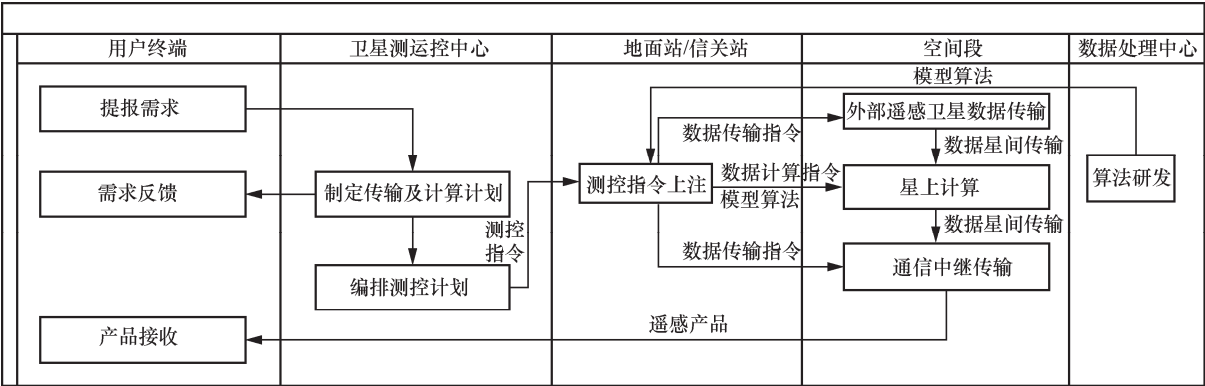


图 5 算力支撑服务业务流程

计算需求, 卫星测运控中心制定及编排数据传输、接收、处理及分发计划, 通过信关站上注数据传输指令, 外部遥感卫星通过星间链路将数据传输至星上边缘计算中心, 计算结果通过星地链路将数据传输至地面站或用户终端。

(3) 对地观测数据服务

随着火箭运载能力、遥感平台搭载能力的不断增强, 可在标准化卫星平台上搭载自主研发的遥感载荷, 届时, 系统将具备遥感任务规划、测控指令编排及上注、遥感数据采集、遥感数据星地处理和产品分发等功能, 可为用户提供对地观测产品服务。利用卫星互联网全球覆盖的特性, 用户可在任意地点通过终端发起遥感任务请求, 卫星测运控中心收到用户请求后, 准实时完成卫星任务规划并通过信关站上注指令, 遥感载荷采集数据后可通过星上计算后直接分发至用户, 或通过星地链路回传至地面处理后分发, 不受地面站接收能力的限制, 极大提高对地观测数据服务时效性。

(4) 载荷托管服务

随着遥感平台及卫星不断标准化, 可为外部遥感卫星运营商提供载荷托管服务。在载荷搭载方面, 遥感平台提供额外信息、供电、热控等标准化接口, 以支持搭载各类遥感载荷, 小型载荷可与通信载荷共星承载, 体积、功耗、重量较大的载荷可安装于接入星间承载网的单独卫星平台; 在测控指令及数据传输方面, 利用天地一体通遥融合系统的星地、星间链路进行双向测控和数据回传。其中, 遥感载荷及其测运控、数据处理及分发中心作为外部系统。用户方通过购买服务降低卫星平台研制及卫星发射成本, 同时可以获取卫星互联网星间及星地通信带来的增值服务。

(5) 综合应用服务

随着通信卫星星座不断完善、自主可控遥感卫星以及外部托管卫星数量的增加、“云-边-端”分布式计算能力以及智能化算法的研发与优化, 天地一体通遥融合系统在对地观测方面, 具备多载荷、高频次、高分辨率的遥感数据采集能力。在通信方面, 具备低时延、大容量的全球实时通信能力。在计算方面, 具备自动化、智能化的复杂计算能力。依托上述能力, 将对地观测感知信息与人工输入信息进行在轨实时处理、关联、融合分析及预测, 提供信息保障、态势感知、筹划决策、指挥控制、人机交互等综合应用服务。

2.3 关键技术

天地一体通遥融合系统建设面临观测资源、星地计算资源及星地通信资源的整体统筹及调度问题, 从混合星座

测运控、数据传输、数据计算 3 个关键环节入手, 探讨天地一体通遥融合涉及的主要关键技术。

2.3.1 混合星座一体化智能管运控技术

混合星座具有卫星数量多、功能多、载荷多的特点, 在混合星座能力大幅度提升的同时, 统筹管控通信、遥感、计算、地面站等星地资源, 实现混合星座的一体化智能管运控是实现天地一体通遥融合应用的关键技术^[9]。在星地资源管理方面, 建立卫星管理平台, 实现对通信、遥感、计算、地面站等资源的统一管理, 建立卫星全生命周期档案, 包含卫星轨道信息、卫星载荷信息、卫星使用约束条件等静态信息以及通过星间及星地链路获取卫星网络负载、计算资源占用情况等动态信息, 实时掌握每一颗卫星的状态。在测运控方面, 用户需求提报后, 根据用户对于空间分辨率、频段、目标区域、产品等级、时效性等要求, 结合卫星管理平台档案, 分析混合星座数据采集窗口、侧摆角度、天气约束、地面站接收资源、算力资源及传输资源等星地主要约束条件。通过人工智能相关的强化学习技术, 不断构建以满足用户需求为目标的优化模型及算法, 实现混合星座最优调度, 满足大规模、高时效、多样化的观测需求, 提高数据获取至产品分发全流程的时效性和响应速度。

2.3.2 遥感影像自适应高效实时压缩技术

天地一体通遥融合系统中, 通信卫星传输的数据类型包含测控指令、遥感影像、音视频、模型算法等数据。其中遥感影像数据量非常大, 单景遥感影像几百 MB 至十几 GB 不等, 传输遥感影像可能造成局部通信链路过载, 进而导致拥塞、缓冲区溢出、高时延和数据包丢失。因此, 在实际通遥融合应用中, 通过遥感影像自适应高效实时压缩技术实现遥感影像压缩处理, 是节省星上存储及传输成本、保障遥感数据传输速率和质量的关键。针对影像压缩技术要求, 在压缩质量方面, 需要考虑如何对多尺度遥感图像进行有效压缩, 以保持不同尺度数据的特征, 避免数据解压缩后的失真, 提高遥感数据的真实性, 以免影响遥感数据应用中定性及定量分析; 在压缩速率方面, 需要考虑压缩算法的效率, 满足用户对于遥感服务高时效的需求。因此, 遥感影像自适应高效实时压缩技术需具备高效、实时、压缩损失小等特性, 以满足压缩任务的实际应用需求。

2.3.3 分布式实时多星协同及星地协同计算技术

遥感影像星上在轨处理技术是提升遥感服务时效性的重要手段, 但随着遥感技术和应用的不断发展, 获取的遥感图像数据规模及数据处理复杂性呈现出快速增长的趋势。然而, 单一计算卫星往往难以满足海量遥感影像复

杂任务的处理需求,计算资源受限成为制约遥感图像处理效率和能效的重要挑战^[9]。一般遥感影像基础处理包括辐射校正、几何粗校正、几何精校正、云检测、影像融合、影像镶嵌、影像匀色、影像裁剪等步骤,同时需具备目标检测、变化检测、语义分割、目标跟踪、关联分析预测等信息提取能力以支撑后续综合应用。不同的处理及分析算法所需计算资源不同,尤其是目标检测、变化检测等信息提取基本依赖深度学习和机器学习算法,其计算效率、泛化性相较传统方法显著提高,但是同时也需要消耗更多的计算资源。因此,需要根据用户需求及计算资源情况合理分配计算任务。通过分布式实时多星协同及星地协同计算技术实现分布式、分层、分级遥感影像处理及信息提取,将计算任务进行多星及星地系统协同计算,减少数据传输需求,提高协同计算效率。

2.4 典型场景应用——洪涝应急救援

随着天基遥感系统的快速发展,其已广泛应用于洪

涝、火灾、地震救援等应急救援领域,且灾害信息的快速提取、分析及信息分发影响后续应急救援任务的指挥决策及救援行动,因此高时效就显得尤为重要。

目前主要利用多源遥感等天基手段实现对灾害区域的高频次侦照及灾害情况分析,然而遥感系统中卫星规划、指令上注、数据下载、数据处理、信息提取及信息分发等流程需要几十分钟至几十小时不等,难以满足应急救援的时效性要求。随着本文构想的天地一体通遥融合架构及关键技术的发展,尤其是在轨处理、星间传输、星地分发等技术将极大提升灾害信息处理及快速响应能力,助力应急救援中灾害信息提取、精准决策及行动指挥。

以洪涝应急救援场景为例,实例化本文设想的通遥融合框架及业务流程,如图6所示。

3 结束语

本文设计的天地一体通遥融合架构在具体建设中可

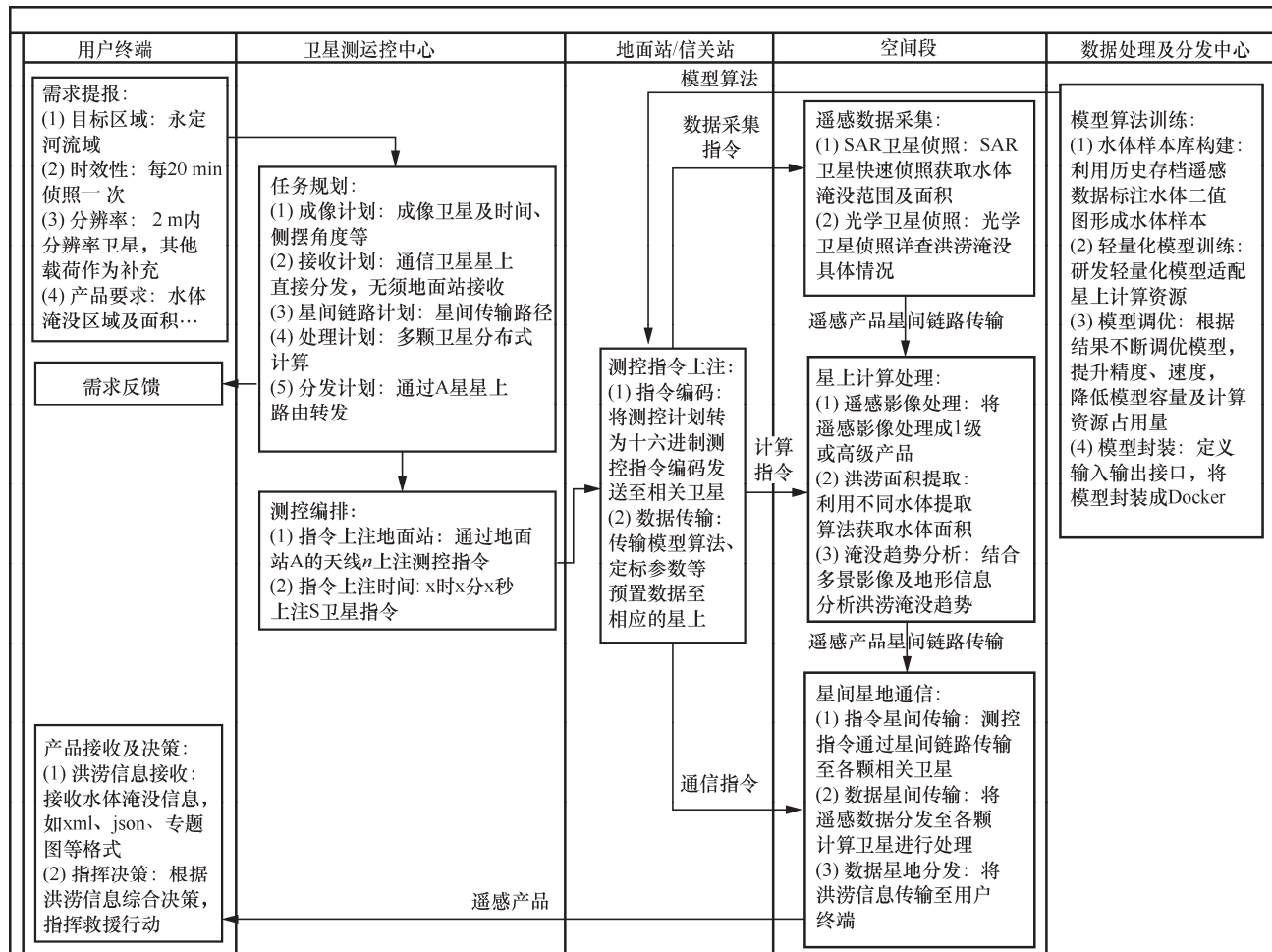


图6 洪涝应急救援应用场景业务流程示例

能存在以下几个方面的挑战:

(1) 内外部系统的互联互通与管控: 需实现卫星互联网系统与遥感系统、国家授时中心、测运控中心等外部系统的互联互通, 实现巨型星座统一管控;

(2) 标准化通用卫星平台的研制: 构建通信、遥感与算力混合星座, 需研制标准化通用载荷, 实现载荷“即插即用”, 快速实现相关服务;

(3) 高性能边缘计算板卡研制: 为实现星上海量遥感数据在轨处理, 需研制高性能边缘计算板卡;

(4) 卫星直连手机的产品快速分发: 需实现卫星直连手机, 星上遥感产品可直接分发至用户终端, 提供遥感应用服务体验。

未来, 随着产业链相关技术的发展与迭代, 标准通用平台、高性能计算板卡、高性能天线以及相关芯片可批量低成本生产, 本文设想的通遥融合架构将可能成为现实, 实现即时遥感愿景, 提升卫星互联网应用和服务能力。

参考文献

- [1] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 161-176.
YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent development and its prospect of satellite communications[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6): 161-176.
- [2] 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)[J]. 卫星应用, 2015(11): 64-70.
Medium and long-term development plan of national civil space infrastructure (2015-2025)[J]. Satellite Application, 2015(11): 64-70.
- [3] 李德仁, 沈欣, 李迪龙, 等. 论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1501-1505.
LI D R, SHEN X, LI D L, et al. On civil-military integrated space-based real-time information service system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1501-1505.
- [4] 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.
WANG M, WU Q Y. Key problems of remote sensing images intelligent service for constellation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1008-1016.
- [5] 苗青, 蒋照菁, 王闯. 下一代铱系统发展现状与分析[J]. 数字通信世界, 2019(7): 21-22.
MIAO Q, JIANG Z J, WANG C. Development situation and analysis of the iridium next system[J]. Digital Communication World, 2019(7): 21-22.
- [6] BELL E. Malicious digital penetration of United States weaponized military unmanned aerial vehicle systems: a national security perspective concerning the complexity of military UAVs and hacking[Z]. 2019.
- [7] 纪凡策. 2020 年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2021(2): 36-41.
JI F C. Summary of the development of foreign communication satellites in 2020[J]. Space International, 2021(2): 36-41.
- [8] LI X Y, BIAN Y M. The legality and compliance of low-orbit mega-constellations as military targets[J]. Advances in Astronautics Science and Technology, 2023, 6(1): 19-22.
- [9] 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256-1263.
WANG M, WU Q Y, XIAO J, 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, 48(8): 1256-1263.

[作者简介]



苏文博 (1995—), 男, 工程师, 现就职于中国星网网络创新研究院有限公司, 主要研究方向为通遥融合架构设计、关键技术及其应用等。



张驰 (1992—), 男, 博士, 现就职于中国星网网络创新研究院有限公司, 主要研究方向为卫星通信网络、通遥融合架构设计等。



王妮炜 (1987—) 女, 博士, 高级工程师, 现任职于中国星网网络创新研究院有限公司, 主要研究方向为星地融合网络、低轨星座、5G/6G 移动通信等。



秦智超 (1981—) 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 现就职于中国星网网络创新研究院有限公司, 主要研究方向为卫星网络、移动网络、物联网等。