

基于通遥融合的卫星即时遥感系统架构研究

赵辰乾^{1,2,3}, 闫瑞东^{1,2,3}, 赵 贇^{1,2,3}, 刘 言^{1,2,3}, 孙军帅^{1,2,3}

(1.上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 201306; 2.上海市卫星互联网重点实验室, 上海 201306;

3.卫星互联网全国重点实验室, 上海 201306)

摘 要: 传统卫星遥感具有数传能力有限和业务流程冗长的局限, 难以满足海量遥感数据的实时获取需求。卫星通信和卫星遥感的发展融合能够提升遥感数传和处理能力, 实现卫星即时遥感。梳理总结通遥融合的发展模式及未来演进方式, 从通遥业务融合和通遥系统融合两种模式兼顾的角度出发, 对卫星即时遥感系统的组成、部署和功能架构以及遥感数据中继、遥感在轨数据处理和在轨任务规划等典型业务流程开展研究。

关键词: 卫星即时遥感; 卫星通信; 通遥融合; 功能架构

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025015

Research on Architecture of Real-Time Satellite Remote Sensing System Based on Communication and Remote Sensing Integration

ZHAO Chenqian^{1,2,3}, YAN Ruidong^{1,2,3}, ZHAO Yun^{1,2,3}, LIU Yan^{1,2,3}, SUN Junshuai^{1,2,3}

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201306, China

2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201306, China

3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 201306, China

Abstract: Traditional satellite remote sensing suffer from limited data transmission capabilities and lengthy business processes, making it difficult to meet the real-time acquisition demand of massive remote sensing data. The integration of satellite communication and remote sensing can enhance the transmission and processing capabilities of remote sensing, achieving real-time service. This article summarizes the development modes of communication and remote sensing integration, as well as their future evolution. From the perspective of balancing business integration and system integration, it studies the composition, deployment and functional architecture of real-time satellite remote sensing systems, as well as typical business processes such as remote sensing data relay, onboard data processing and task planning.

Keywords: real-time satellite remote sensing, satellite communication, communication and remote sensing integration, functional architecture

0 引言

传统卫星遥感系统采用“地面规划、星上获取、星地传输、地面处理和分发”的工作模式, 难以满足海量遥感数据的实时获取需求^[1], 其原因主要有以下几个。一是遥感数传能力有限, 传统遥感卫星系统主要依靠星

地数传, 卫星需过顶地面站进行测控和数传, 然而, 由于遥感卫星通常位于低轨, 受地球曲率影响, 与地面站可见时间短, 且地面站受到地理环境制约而无法全球布站 (现有地面站网对于低轨卫星的覆盖率不足20%), 因此, 遥感卫星大部分时间处于空转状态, 无法即时进行测控和数传。二是遥感业务流程冗长, 传统遥感卫星系

统采用地面集中运控和数据处理模式,这种中心式的工作模式需要星地间的频繁信息交互和海量原始遥感数据的传输,导致遥感信息的传输链条长、时延高。综上所述,传统卫星遥感系统存在的数传能力有限、遥感业务流程冗长等固有局限,导致卫星遥感服务响应滞后。目前,卫星互联网和太空云计算的发展融合(即云网融合)能够为卫星遥感提供通信和算力赋能,提升卫星遥感的数传和处理能力,打破传统卫星遥感系统的固有局限,实现遥感服务的即时响应,因此未来卫星通信和卫星遥感的融合(即通遥融合)是大势所趋^[2]。

1 通遥融合的发展演进

通遥融合有通遥业务融合和通遥系统融合两种发展模式。通遥融合的第一阶段是业务融合,在此阶段,卫星通信系统和卫星遥感系统独立建设,卫星通信系统向卫星遥感系统提供数据中继服务和云计算服务,通过业务协同实现对卫星遥感系统的通算赋能。业务融合的优点是可以通过在卫星侧加装通信终端和软件方式实现,能够基本沿袭原有系统架构,系统建设成本低且能分摊

至各运营商;缺点是在系统设计时无法统筹考虑通信和遥感业务需求,导致在通遥星座的稳定组网以及统一管控和调度等方面受到明显掣肘,难以实现即时遥感。通遥融合的第二阶段是系统融合,在此阶段,卫星通信系统和卫星遥感系统一体化建设,通过通遥载荷的集成融合、通遥星座的组网融合和测运控系统的深度融合实现通感算功能一体化。系统融合的优点:一是在系统设计阶段可以统筹考虑遥感、通信和计算(即通遥算)业务;二是在系统运行阶段可以统一星座管控、资源调度和任务规划,实现分钟级甚至秒级的即时遥感服务响应。缺点是需要打破原有的系统架构,重新设计和建设一套面向即时遥感服务的通遥算一体化系统架构,通遥算一体化系统建设难度大、成本高。通遥融合的两种模式各有优劣,且两种模式也不是泾渭分明的(例如通过星座的全权托管和地面站网的统管可以将两个独立建设的系统进行系统级融合),因此,综合考量经济和技术等多方面因素,两种模式将会长期共存。目前通遥融合的发展主要处于业务融合阶段,而系统融合仍处在起步阶段。通遥融合的发展演进如图1所示。

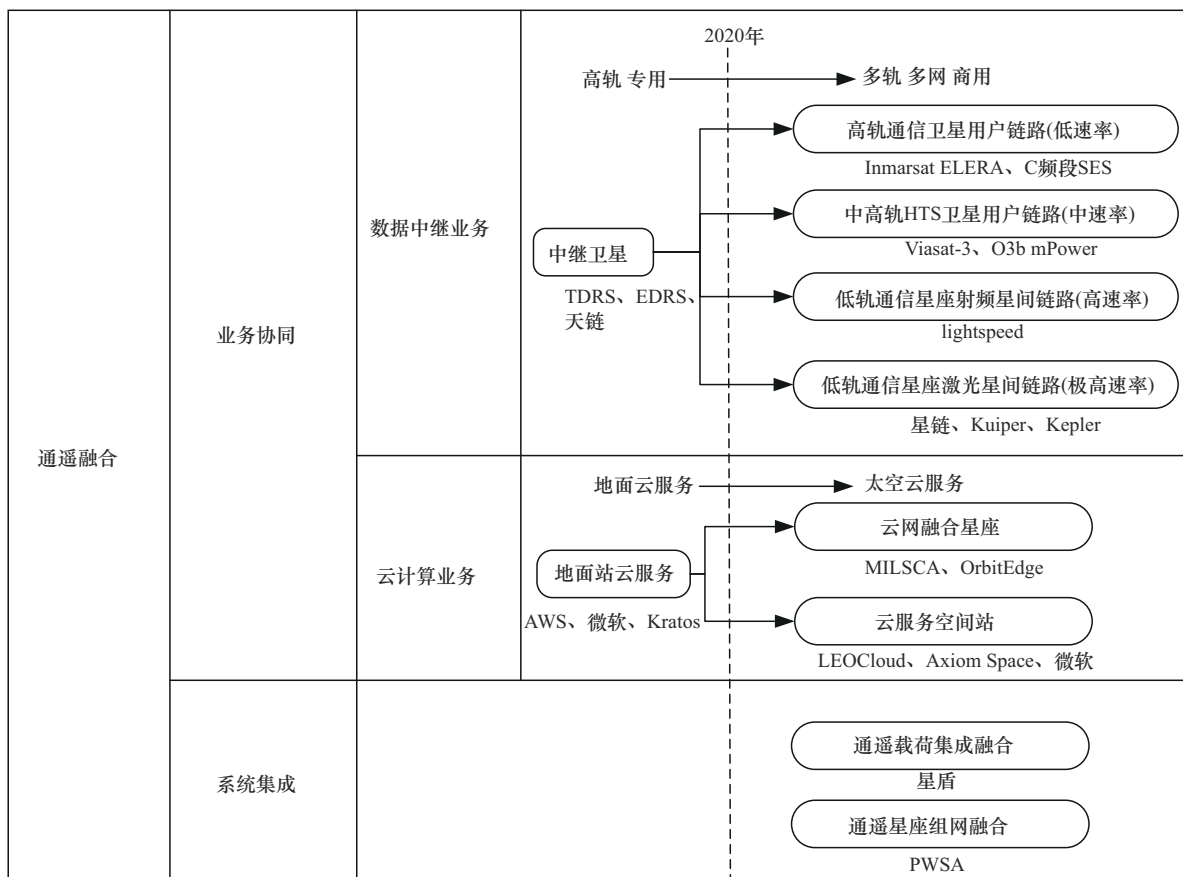


图1 通遥融合的发展演进

1.1 通遥业务融合

通遥业务融合包括数据中继业务和云计算业务，且云计算业务需在数据中继业务的基础上开展。

从技术演进和产业发展情况来看，数据中继业务将从专用卫星向商业卫星、从高轨向多轨多网联合的方向发展。数据中继业务发展的第一阶段是从20世纪80年代到2020年左右，其特点是利用专用中继卫星向遥感卫星提供数据中继服务。中继卫星通常位于地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)或高椭圆轨道(Highly Elliptical Orbit, HEO)，具备全球覆盖能力，典型中继系统有美国的跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)、欧洲数据中继系统(European Data Relay System, EDRS)和中国的天链^[3]。中继卫星一般配备1套S频段多址天线用于低速率测控，以及2套Ka频段或激光单址天线用于高速率业务数传。中继卫星的星座规模以及单星可服务用户数量都极其有限，因此，更适合服务于少量重要航天器而无法满足大规模商业遥感卫星的数传需求。数据中继业务发展的第二阶段是从2020年到2030年左右，其特点是使用商业卫星网络向低轨遥感卫星提供数据中继服务。随着美国TDRSS的逐步退役，美国航空航天局启动“通信服务项目^[4]”(Communications Services Project, CSP)，计划在2031年前使用商业卫星网络为低轨卫星提供数据中继服务，项目内容包括：一是直接使用具备全球覆盖能力的高轨通信卫星(包括L频段Inmarsat ELERA海事卫星和C频段SES卫星)的用户链路为低轨卫星提供低速率数据中继服务，目前SAR遥感卫星Capella已搭载Advalue公司的海事终端用于卫星遥控遥测数据的中继传输^[5]；二是直接使用中高轨高通量卫星(High Throughput Satellite, HTS)(包括Ka频段高轨Viasat-3卫星和中轨O3b mPower卫星)的用户链路为低轨遥感卫星提供中速率数据中继服务；三是利用低轨通信星座的射频星间链路为低轨星座提供高速率数据中继服务，目前Telesat公司计划利用其在建的“光速”低轨通信星座为行星公司的“鸚鵡”光学遥感星座提供基于射频星间链路的数据中继服务^[6]；四是利用低轨通信星座的激光星间链路为低轨卫星提供极高速率数据中继服务，包括星链(Starlink)和柯伊伯(Kuiper)星座等，同时期欧洲航天局与开普勒公司合作的高吞吐量光学网络^[7](High Throughput Optical Network, HyDRON)项目也采用与此相同的技术路线。

从技术演进和产业发展情况来看，云计算业务将经

历从地面云服务到太空云服务的发展转变。在地面云服务阶段，SpaceX、SES等卫星运营商通过与亚马逊^[8]、微软^[9]等云服务商合作，将地面站部署在云服务数据中心附近或者利用数字中频技术和网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术将地面站的调制解调及测运控功能以软件形式直接运行在云平台上^[10]。地面站云服务的优点包括：一是可以使数据回传到地面站后直接“单跳”连接到数据中心进行处理，显著降低数据时延；二是能够实现地面站服务的自动化和智能编排，提升地面站数传及测运控服务的响应速度和敏捷性；三是能够按需动态扩展地面站的数传、存储、处理和分发能力，无须进行额外的基础设施建设。太空云服务目前处于发展初期，发展路线有：一是利用云网融合星座为遥感等用户卫星提供分布式太空边缘计算服务，云网融合星座中每颗卫星都是卫星网络节点和边缘计算节点，目前意大利国防部的“军事太空云架构”^[11](Military Space Cloud Architecture, MILSCA)项目和美国轨道边缘公司^[12]旨在构建此类星座；二是部署云服务空间站作为天基云服务数据中心，为遥感等用户卫星提供太空云计算服务，目前LEOCloud公司正在联合微软和商业空间站公司Axiom Space研发和部署云服务空间站^[13]，相较于云服务卫星平台，云服务空间站能够为算力服务器提供更大的空间、载重和功率资源，具有更强的存储和计算能力。太空云计算服务能够使计算资源尽可能接近数据源和用户，减少星地间的数传，遥感数据可以直接在太空边缘侧进行处理和分发，大大降低数据时延，提升遥感服务的即时性。

1.2 通遥系统融合

美军正在筹划建设一系列扩散低轨卫星星座(Proliferated LEO Constellation, PLEO)，主要包括美国太空发展局主导的扩散太空作战架构^[14](Proliferated Warfighter Space Architecture, PWSA)和美国国家侦察局主导的星盾^[15](又称扩散太空架构(Proliferated Space Architecture, PSA))，此类星座的目标是利用弹性、可快速重构的低轨卫星星座实现全球覆盖的通信、监视、跟踪和导航一体化功能，用以补充和替代过去昂贵、脆弱的大型军用预警、侦察、通信和导航卫星。星盾系统由SpaceX和诺斯罗普格鲁曼公司共建，它将遥感载荷和通信载荷集成于一颗卫星，实现了通遥载荷的集成融合，同时星盾卫星通过星间链路组网形成稳定的卫星网络并共享星链的信关站和测控站等地面基础设施，可以通过星间路由与地面指挥中心及军事用户进行实时信息交互。

扩散太空作战架构是基于 DARPA “黑杰克”项目开展的,目前主要由洛克航天系统、洛克希德马丁、诺斯罗普格鲁曼、雷神、L3Harris 等航天防务公司共建^[16],该架构从功能层面划分为7层^[17],包括传输层、监视层、作战管理层、跟踪层、导航层、威慑层和支持层,其中传输层负责数据接入和中继,监视层利用光学/雷达/红外等遥感星座实现情报监视和侦察(Intelligence Surveillance and Reconnaissance, ISR)功能。架构中不同功能层由不同星座构成,通过星座的组网融合形成统一的系统架构,实现通信、监视、跟踪和导航等功能的一体化。

2 基于通遥融合的即时遥感系统架构

基于通遥融合的即时遥感系统架构应兼容通遥业务融合和通遥系统融合两种模式。针对通遥业务融合模式,即时遥感系统应具备接入符合标准的第三方遥感卫星并向其提供数据中继服务和云计算服务的能力,系统可以根据业务需要租用和集成第三方遥感星座,快速和低成本地扩展系统遥感观测能力。针对通遥系统融合模式,系统应包含统一建设和运营的通遥算一体化星座,提供通遥算基座服务。

2.1 系统组成架构

基于通遥融合的即时遥感系统包含空间段、地面段和用户段,其组成架构如图2所示。

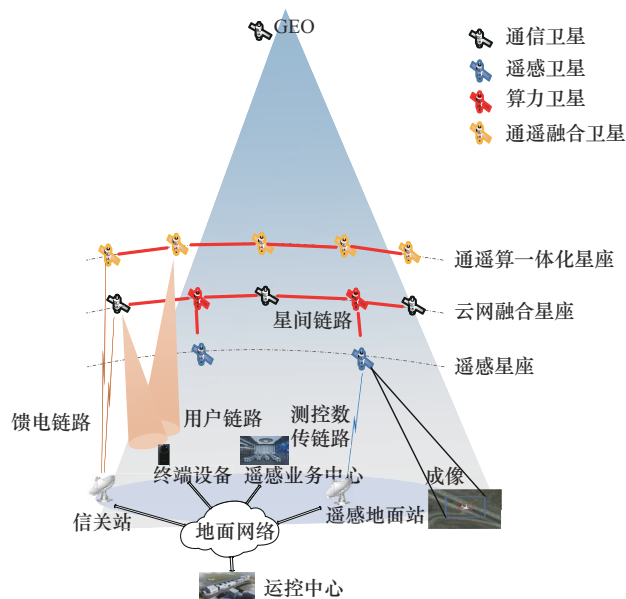


图2 基于通遥融合的即时遥感系统组成架构

空间段主要包含通信卫星、算力卫星、遥感卫星以及通遥融合卫星。通信卫星包括高轨通信卫星和低轨通

信卫星,高轨通信卫星具有波束广域覆盖的特点,可以利用其用户链路接入低轨遥感卫星,为其提供实时的天基测控服务;低轨通信卫星通过星间链路和算力卫星稳定组网形成云网融合星座,能够通过星间链路接入遥感卫星,为其提供数据中继和在轨处理服务。遥感卫星具有光学、红外或雷达遥感成像能力以及一定的星上存储和计算能力。通遥融合卫星将通信载荷、遥感载荷和算力载荷共平台搭载,通过星间链路组网形成通遥算一体化星座。通遥算一体化星座和云网融合星座只是概念上的区分,在现实中二者并非完全独立而是动态演变的,当云网融合星座在后续发射的算力卫星或通信卫星上集成遥感载荷后,星座就具备了通遥算一体化功能,云网融合星座自然会向通遥算一体化星座演变。

地面段包含信关站、测控站、运控中心和遥感地面站。信关站通过馈电链路和通信卫星进行星地数传并将数据接入地面网络,同时也可承担卫星组网后的常态化卫星测控。测控站负责卫星入轨、卫星故障和星座未组网时的应急和补充测控。遥感地面站是传统卫星遥感系统的地面基础设施,可以与卫星网络进行星地协同,为遥感卫星提供测控和数传服务。运控中心负责对空间段的遥感星座、云网融合星座、通遥算一体化星座以及地面段的信关站、测控站、遥感地面站进行统一管控。信关站、遥感地面站和运控中心均可部署云服务数据中心,提供地面云计算服务。

用户段主要包含遥感业务中心和终端设备。遥感业务中心对应行业用户,主要包括航天侦察业务、气象观测业务、海洋观测业务和资源管理业务等,遥感业务中心可以通过地面网络接入运控中心。终端设备对应个人用户(可以是手机或其他专用设备),具备观测需求提报功能和遥感产品接收显示功能,可通过用户链路接入卫星网络,也可接入地面网络。

2.2 系统部署架构

基于通遥融合的即时遥感系统中各组成平台通过部署功能单元实现相应功能,部署架构如图3所示。

(1) 通信卫星

高轨通信卫星和低轨通信卫星均部署有接入网、馈电、测控、路由控制与转发、边缘云平台和存算硬件等功能单元,其中,低轨通信卫星额外部署有星间链路终端,用于星座组网以及遥感卫星接入。接入网单元负责接收地面终端用户的遥感观测需求以及分发遥感情报产品,其中,高轨通信卫星的接入网还可以向低轨遥感卫星提供测控数据中继传输服务。路由控制和转发单元负

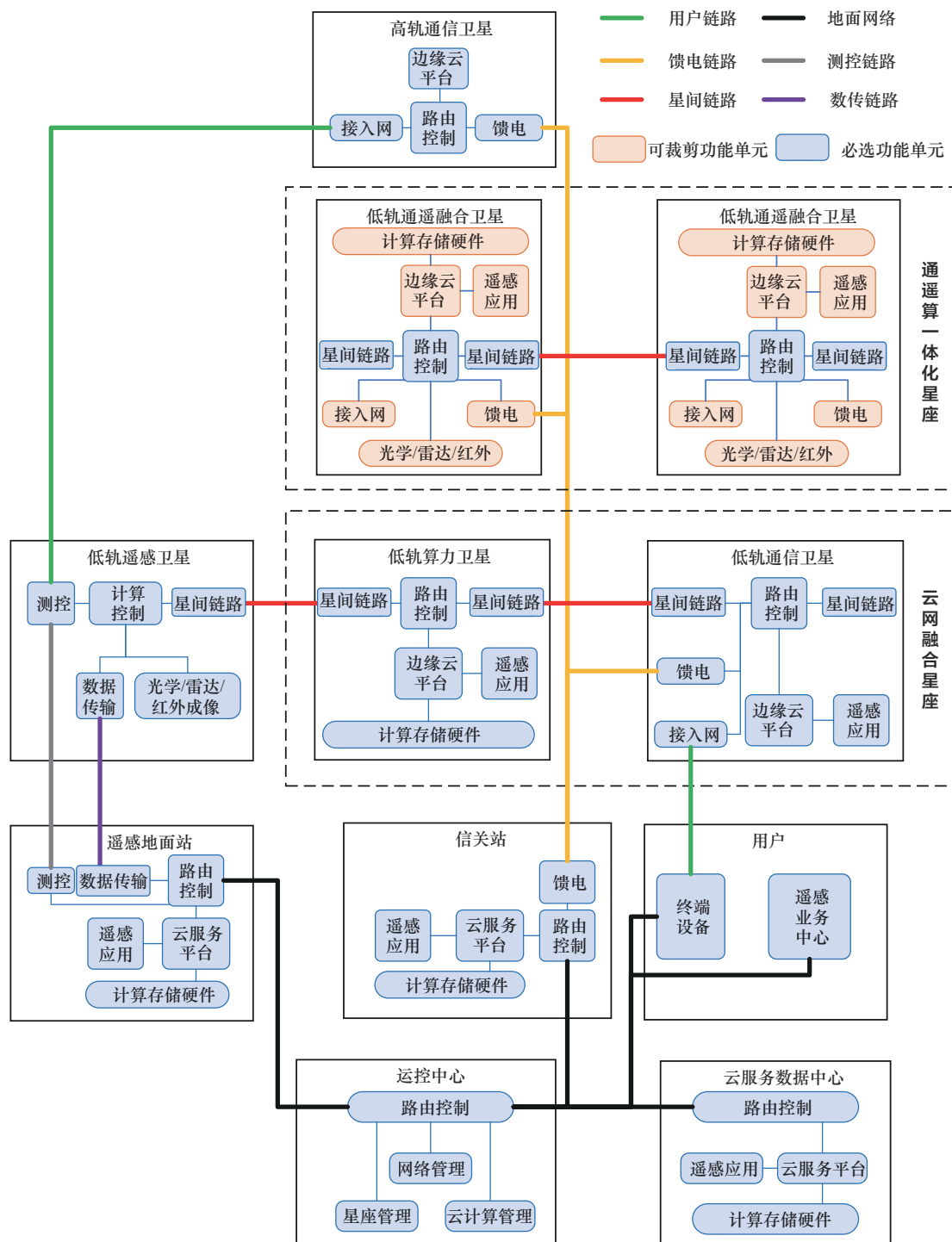


图3 基于通遥融合的即时遥感系统部署架构

责数据的星间路由传输。馈电单元负责通信卫星与信关站之间的星地通信。边缘云平台负责星上存算硬件资源的虚拟化管理，并为遥感等应用服务提供运行环境。通信卫星的存算资源主要用于数据缓存和路由转发，当存算资源存在空余时可通过边缘云平台对外提供云计算服

务。高轨通信卫星一般体积和重量均更大，可部署较多的存算硬件，可提供中等算力的云计算服务，低轨通信卫星算力资源较少，仅提供较低算力的云计算服务。

(2) 算力卫星

算力卫星部署有星间链路终端、测控、路由控制和

转发、边缘云平台以及存算硬件。算力卫星由于裁剪了接入网和馈电单元,因此可以部署额外的星载 CPU、GPU、NPU、FPGA 和 SSD 等异构算力和存储硬件,其中少部分存算资源用于数据缓存和路由转发,大部分用于提供云计算服务,可以在云平台上部署和运行遥感数据处理和任务规划等高算力需求应用服务。

(3) 遥感卫星

遥感卫星主要部署有符合系统标准的星间链路终端、光学/雷达/红外遥感载荷、星载测控单元、星载数传单元和计算控制单元。星间链路终端负责与低轨通信卫星或算力卫星通信建链,光学/雷达/红外遥感载荷负责对地观测及遥感成像,星载测控单元包括传统的遥测、跟踪和遥控 (Telemetry, Tracking and Command, TT&C) 单元用于地面站测控以及高轨卫星通信终端用于天基中继测控,星载数传单元负责向遥感地面站传输遥感影像数据,计算控制单元负责统一管理其余功能单元以及进行轻量化的在轨数据处理。

(4) 通遥融合卫星

通遥融合卫星部署有星间链路终端、接入网、馈电、测控、路由控制与转发、光学/雷达/红外遥感载荷、边缘云平台和存算硬件等功能单元,其中,星间链路终端、测控、路由控制与转发单元为必选功能单元,其余为可裁剪功能单元。通遥融合卫星依靠组网后的一体化星座提供通遥算功能,无须星座中每颗卫星都部署所有功能单元,因此可以根据业务需求和卫星平台约束对星座中各卫星进行差异化设计,卫星的功能单元可以适应性裁剪。例如:当卫星搭载体积和重量更大的高分光学遥感载荷时,受卫星平台的空间、重量和功率约束,可以裁剪接入、馈电及存算硬件等功能单元;当卫星搭载体积和重量更小的红外遥感载荷时,则无须裁剪上述功能单元。

(5) 信关站

信关站部署有馈电和路由控制与转发等功能单元,其中,馈电单元负责信关站与通信卫星间的星地通信,路由控制与转发单元负责将信关站数据接入地面网络。同时,信关站可以部署云服务数据中心,提供高性能云计算服务。

(6) 遥感地面站

遥感地面站部署有地面测控单元、数传单元以及路由控制与转发单元,其中地面测控单元和数传单元负责遥感卫星的星地测控和数传,路由控制与转发单元负责将信关站数据接入地面网络。同时,遥感地面站可以部署云服务数据中心,提供高性能云计算服务。

(7) 运控中心

运控中心部署有路由控制与转发单元以及星座管理系统、网络管理系统和云计算管理系统等,其中,路由控制与转发单元负责连接信关站、测控站和遥感地面站。同时,地面运控中心可以部署云服务数据中心,提供高性能云计算服务。

2.3 系统功能架构

基于通遥融合的即时遥感系统功能架构可以分为基础层和应用层,如图 4 所示。其中,基础层是卫星即时遥感服务的基础支撑,包括星座管理、网络管理和云计算管理;应用层包括遥感任务规划、遥感数据处理和遥感产品分发等遥感服务。

(1) 星座管理

星座管理负责云网融合星座、通遥算一体化星座和遥感星座的统一管控,能够为遥感任务规划提供星座运行状态信息,解析遥感任务规划方案,编排生成卫星控制指令,控制遥感卫星开展观测成像和通信建链任务。

(2) 网络管理

网络管理负责星地网络的统一管控,包括接入网、承载网和核心网。接入网主要负责地面用户和遥感卫星接入卫星网络。承载网负责遥感数据在卫星网络中的路由传输,主要功能包括路由控制和转发,路由控制负责综合星座中的算力信息和网络信息,确定最优算力节点和最优网络转发路径,生成路由表项;路由转发负责根据路由表项进行基于 IP 协议的数据转发。核心网负责地面用户和遥感卫星的注册管理、认证鉴权、移动性管理、会话管理和流量计费管理等。

(3) 云计算管理

云计算管理负责太空边缘云、地面站云和运控中心云等的统一管控,可以根据遥感业务需求为其分配算力资源,为遥感应用提供部署和运行环境,实现分布式遥感服务。太空边缘云涵盖组网星座中部署有边缘云平台的所有卫星节点,地面站云涵盖信关站和遥感地面站部署的云服务数据中心,运控中心云是运控大厅部署的云服务数据中心或租用的公有云。

(4) 遥感任务规划

遥感任务规划负责统筹用户观测需求,规划生成遥感观测方案、遥感数据处理方案和测控数传需求,具体功能包括遥感观测需求统筹、卫星资源匹配、多星协同规划、遥感观测规划、测控数传规划和数据处理规划等。所有遥感应用都能以微服务方式部署和运行在各类云平台上。

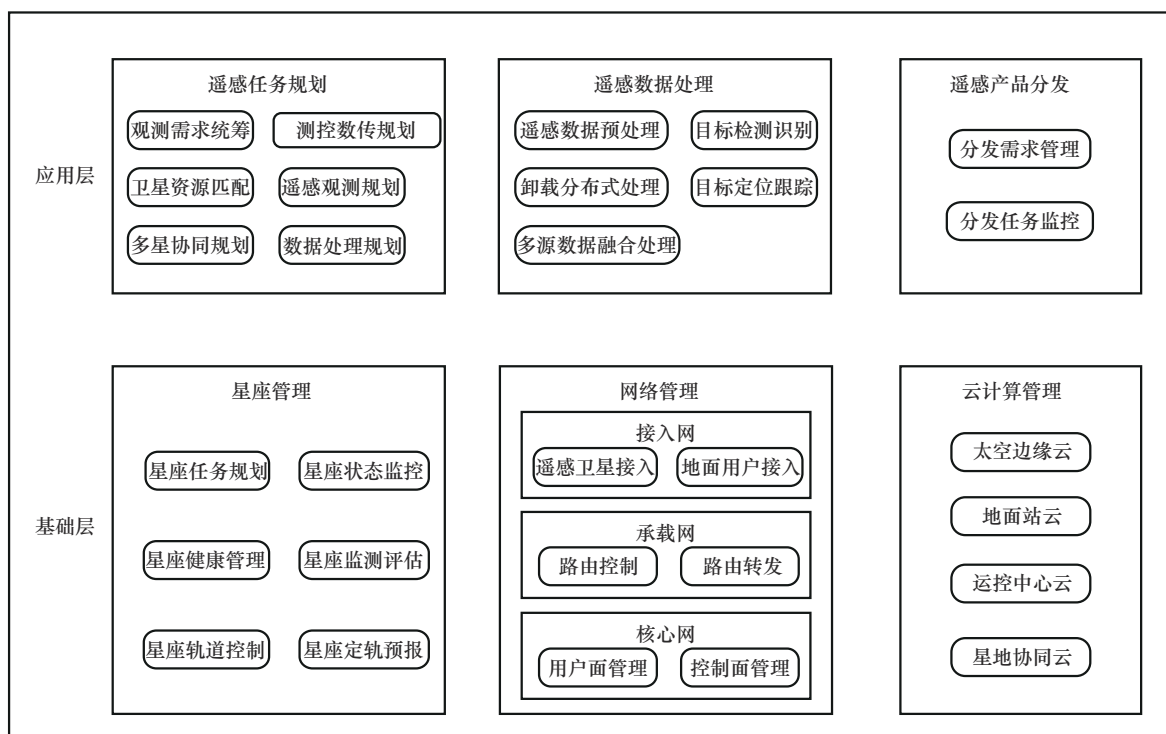


图4 基于通遥融合的即时遥感系统功能架构

(5) 遥感数据处理

遥感数据处理负责遥感数据的全流程处理和遥感产品生成，具体包括遥感数据预处理、卸载分布式处理、多源数据融合处理、目标检测识别和目标定位跟踪等。

(6) 遥感产品分发

遥感产品分发系统负责将遥感数据处理后生成的遥感产品分发至目标用户群体，具体包括分发需求管理和分发任务监控。

2.4 典型业务流程

(1) 遥感数据中继

遥感数据中继业务适用于两类场景：一是原始遥感数据下传场景，用于遥感数据分析和算法模型训练；二是简单遥感观测场景，即单颗遥感卫星可以独立完成观测和在轨数据处理。对于上述两类场景，卫星网络只需提供数传通道。遥感数据中继也是遥感在轨数据处理和遥感在轨任务规划等其他业务开展的基础。在遥感数据中继业务中，遥感任务规划、数据处理和产品分发等遥感应用服务都运行在地面运控中心或中心云。遥感数据中继业务的关键是遥感卫星稳定接入卫星网络，对于通遥算一体化星座，由于卫星已实现稳定组网，通遥融合卫星可以直接利用卫星网络进行数传；对于异构遥感星座，遥感卫星难以与云网融合星座实现常态化稳定组

网，因此需要先将遥感卫星接入云网融合星座，再进行数据中继传输。异构遥感星座利用卫星网络进行遥感数据中继传输的流程如图5所示，详细步骤如下。

① 遥感任务规划系统首先统筹用户观测需求，然后利用星座管理系统提供的星座运行状态信息进行卫星资源匹配，选择合适的遥感卫星执行观测任务，最后规划生成遥感卫星的观测方案和测控数传需求并发送至星座管理系统。

② 星座管理系统接收遥感卫星的观测方案和测控数传需求后，根据测控数传需求生成遥感卫星通信建链方案并发送至网络管理系统。网络管理系统根据建链方案和遥感业务需求配置通信服务质量（Quality of Service, QoS）策略，规划数传路径，建立相应的网络隧道并将路由控制信息发送至组网卫星。同时，星座管理系统解析遥感卫星的观测方案和建链方案，编排生成遥感观测指令和通信建链指令，通过高轨通信卫星转发至遥感卫星，同时将建链指令转发至被接入低轨通信卫星或算力卫星。

③ 遥感卫星接收到遥感观测指令和通信建链指令后，开展遥感观测成像，之后根据建链指令与低轨通信卫星建立星间链路，最后通过卫星网络将遥感影像数据回传至地面运控中心进行遥感数据处理或产品分发。

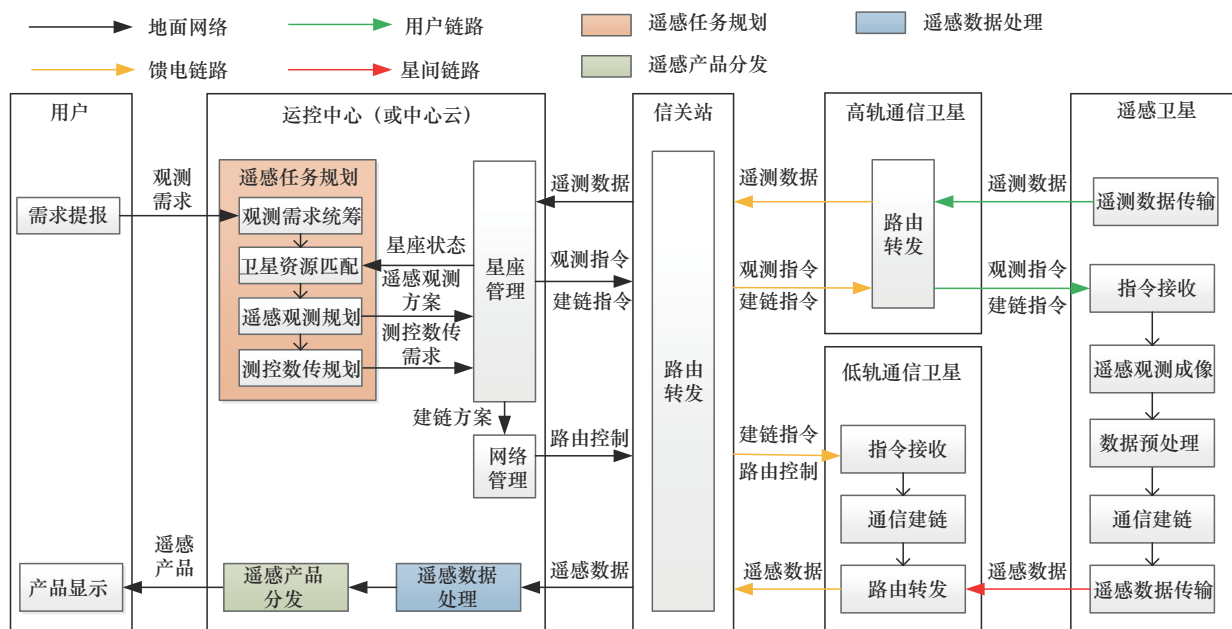


图5 遥感数据中继传输流程

(2) 遥感在轨数据处理

遥感在轨数据处理业务适用于复杂时敏观测场景，如：广域战场态势感知需要对大范围作战区域进行实时观测；重点目标识别需要对目标进行多角度和多载荷的多维立体观测，此时若仍采用地面集中式数据处理，则难以保证任务的即时性。同时，单颗遥感卫星又无法独立完成遥感观测和在轨数据处理，因此，需要利用太空边缘云提供的算力资源将原始遥感数据卸载至多个算力节点进行分布处理来提升数据处理速度^[18]，从而缩短遥

感服务响应时间。在遥感在轨数据处理业务中，遥感数据处理服务运行在算力卫星或信关站等边缘算力节点，遥感任务规划和产品分发服务仍运行在地面运控中心。遥感卫星已接入卫星网络后的遥感在轨数据处理流程如图6所示，详细步骤如下。

① 遥感任务规划系统根据遥感数据处理需求向云计算系统提交算力资源申请。

② 云计算系统申请分配算力资源，在分配的算力节点上部署和启动遥感数据处理微服务，并将算力资源分

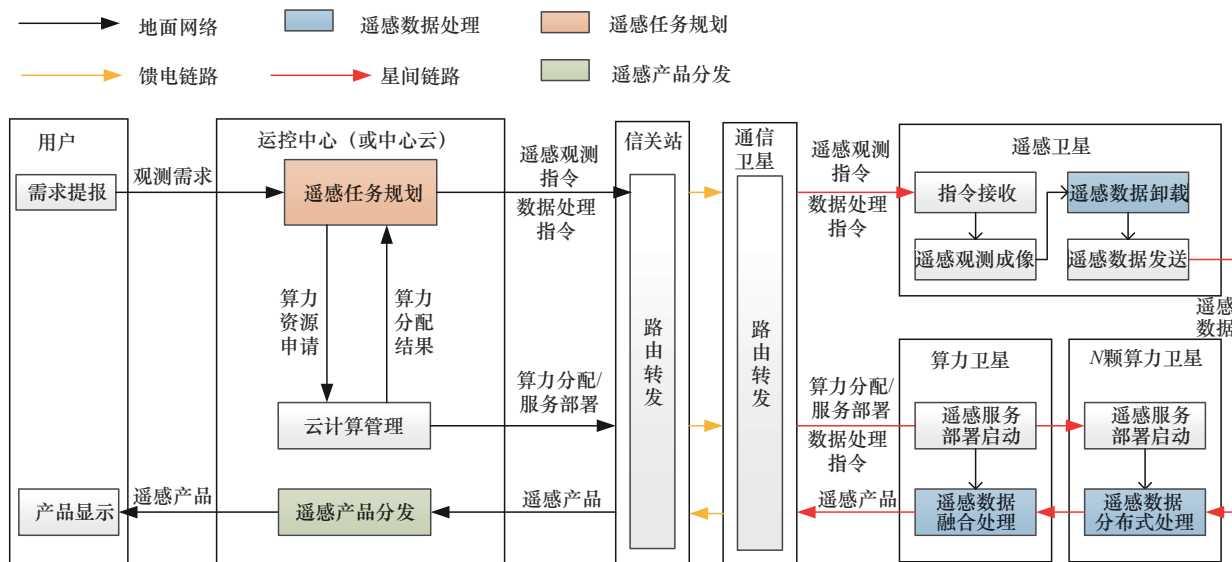


图6 遥感在轨数据处理流程

配结果反馈至遥感任务规划系统。

③ 遥感任务规划系统根据算力分配结果进行算力调度，编排数据处理流程及算法模型，生成数据处理指令并发送至遥感卫星与各算力节点。

④ 遥感卫星完成遥感观测后，按照数据处理指令将遥感数据卸载分发至相应的多个算力节点。

⑤ 各算力节点接收到遥感数据后进行分布式数据处理并将结果汇总后进行数据融合处理，最后将生成的遥感产品回传至地面运控中心进行产品分发。

上述遥感在轨数据处理流程同样适用于多星协同观测场景，如广域监视任务中的多星影像拼接和重点目标识别任务中的多维立体观测，只需在图6所示流程中扩展遥感卫星数量即可。

(3) 遥感在轨任务规划

遥感在轨任务规划业务适用于两类场景：一是星地链路受损场景，地面指令无法上注卫星，导致卫星“空转”；二是动态目标跟踪场景，此时需要随着目标状态改变而重新规划任务，地面集中规划会导致数据在星地间反复流转甚至需要人在环路，难以满足任务的即时性要求。遥感在轨任务规划可以减少数据在星地间的反复流转，降低对地面运控中心的依赖，提升系统的效能和稳定性，实现星座的自主运行，大大提高遥感服务的即时

性。然而，目前星上资源总体有限，难以实现地面功能整体上星，因此，在轨任务规划可以采用星地协同方式，地面侧负责遥感任务的总体把控和具体任务目标的生成，卫星侧负责某一具体任务目标的管理和规划^[19]，如航母战斗群跟踪任务。遥感在轨任务规划业务中，除了遥感数据处理服务上星，还需要将部分遥感任务规划和产品分发服务部署和运行在天基算力节点。已完成遥感卫星接入以及遥感服务星上部署后的遥感在轨任务规划流程如图7所示，详细步骤如下。

① 地面遥感任务规划系统进行遥感观测需求统筹，生成任务目标并发送至作为主控节点的算力卫星，主控节点部署有遥感任务规划、遥感数据处理和产品分发服务。任务目标是指任务描述信息，例如动态目标跟踪任务中的目标类型信息和目标指示信息等。

② 在轨遥感任务规划服务接收到任务目标后开展详细任务规划，生成遥感观测指令和数据处理指令并发送至各遥感卫星和算力卫星。

③ 遥感卫星完成观测成像后将遥感数据发送至算力卫星，算力卫星接收到遥感数据后进行数据处理，最后将生成的遥感产品回传至主控卫星节点。

④ 主控卫星节点对遥感产品进行情报分析，当目标状态发生变化时，更新任务目标，重新进行任务规划，

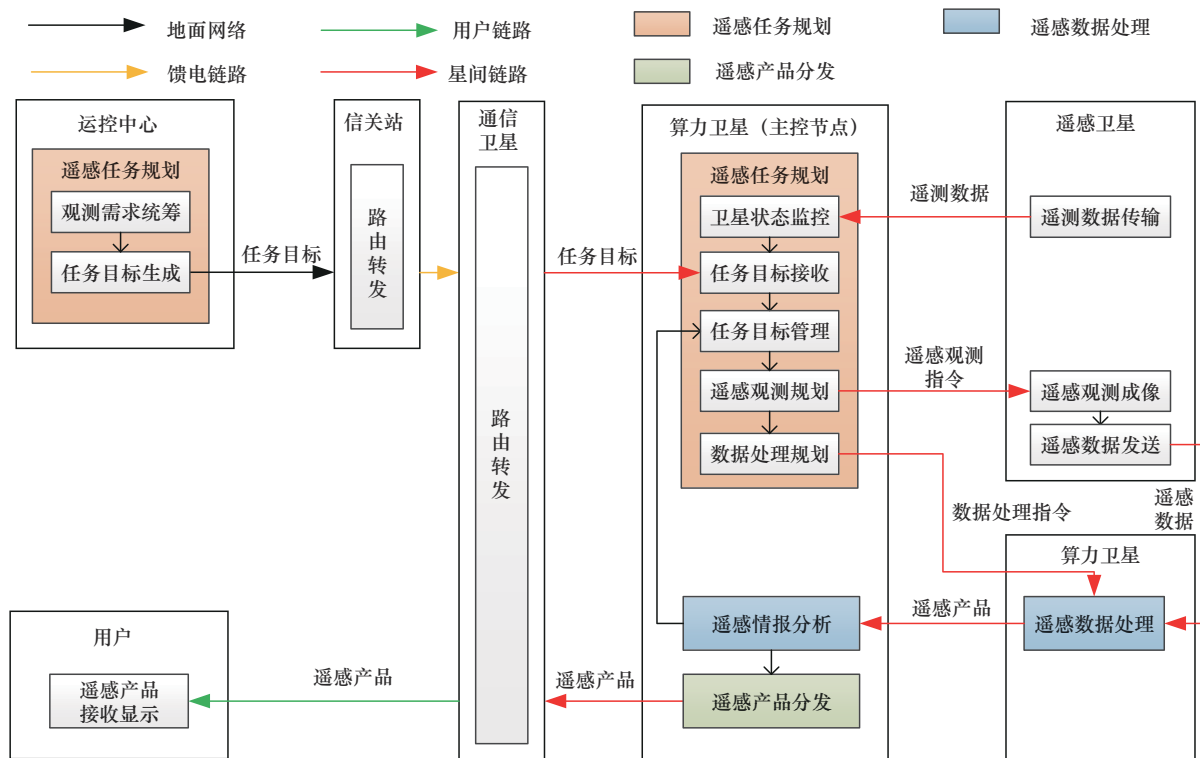


图7 遥感在轨任务规划流程

从而实现遥感任务的在轨快速闭环；当发现重要目标情报时，遥感产品分发服务通过通信卫星直接将遥感情报广播分发至终端用户。

3 结束语

本文首先阐述了传统卫星遥感系统的固有局限和通遥融合的意义，然后梳理了通遥融合的发展模式和未来演进方向，最后对基于通遥融合的即时遥感系统架构及其典型业务流程进行了研究。本文尚未涉及或需要进一步深入研究的内容包括以下几个方面。

(1) 星座构型研究，包括云网融合星座构型和通遥算一体化星座构型设计。云网融合星座需统筹考虑地面用户和遥感卫星的空间分布规律，满足地面用户和遥感卫星的接入需求。通遥算一体化星座除需满足通信业务指标外还需统筹考虑遥感业务指标，如星座时间分辨率和覆盖率等。

(2) 即时遥感系统性能指标研究，包括实时观测需求并发量、遥感产品质量和遥感服务响应时间等。

(3) 关键技术研究，包括异构遥感星座快速接入管理、多星/星地协同数据智能处理、分布式卫星自主任务规划等。

参考文献：

- [1] 彭木根, 张世杰, 许宏涛, 等. 低轨卫星通信遥感融合: 架构、技术与试验[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 13-24.
PENG M G, ZHANG S J, XU H T, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.
- [2] 苏文博, 张驰, 王妮炜, 等. 天地一体通遥融合架构及其应用设想[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 77-84.
SU W B, ZHANG C, WANG N W, et al. Integrated architecture and application assumption of earth-space communication and remote sensing combination[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 77-84.
- [3] 王磊, 姬涛, 郑军, 等. 中继卫星系统发展应用分析及建议[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(2): 303-317.
WANG L, JI T, ZHENG J, et al. Investigations and proposals for data relay satellite systems[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(2): 303-317.
- [4] National Aeronautics and Space Administration. Communications services project[EB]. 2024.
- [5] Capella Space. Capella space partners with Addvalue and Inmarsat for real-time tasking[EB]. 2019.
- [6] Kratos Defense. Planet to leverage NASA contract with SES, Tele-

sat to add RF inter-satellite links to its pelican high-res satellites[EB]. 2022.

- [7] European Space Agency. Hydron: optics for faster data rates from space[EB]. 2024.
- [8] Amazon. AWS ground station[EB]. 2024.
- [9] Microsoft. Azure orbital ground station[EB]. 2024.
- [10] Kratos Defense. Ground station in the cloud[EB]. 2024.
- [11] Leonardo. Leonardo: kick off for the project of the first Space Cloud System for defense[EB]. 2024.
- [12] Data Center Frontier. Data centers in orbit? Space-based edge computing gets a boost[EB]. 2022.
- [13] Spacenews. LEOCloud and Axiom Space cooperate on edge processing in space[EB]. 2022.
- [14] 孙耀华, 彭木根, 赵亚飞, 等. 低轨卫星互联网: 从星地融合迈向通遥一体化[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(6): 69-98.
SUN Y H, PENG M G, ZHAO Y F, et al. Low earth orbit satellite network: from satellite-terrestrial convergence to the integration of communication, navigation and sensing[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(6): 69-98.
- [15] 郭凯, 崔潇潇, 钟江山, 等. SpaceX“星盾”系统建设及应用浅析[J]. 航天电子对抗, 2023, 39(4): 55-58.
GUO K, CUI X X, ZHONG J S, et al. Analysis on the construction and application of SpaceX “starshield” system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2023, 39(4): 55-58.
- [16] 焦晓静, 左宏良, 李碧清. 美国“扩散型作战人员太空架构”发展概况[J]. 航天电子对抗, 2024, 40(3): 59-64.
JIAO X J, ZUO H L, LI B Q. Development of American proliferated warfighter space architecture[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2024, 40(3): 59-64.
- [17] 胡旖旎, 钟江山, 魏晨曦, 等. 美国“下一代太空体系架构”分析[J]. 航天器工程, 2021, 30(2): 108-117.
HU Y N, ZHONG J S, WEI C X, et al. Analysis of US next generation space architecture[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(2): 108-117.
- [18] LEYVA-MAYORGA I, MARTINEZ-GOST M, MORETTI M, et al. Satellite edge computing for real-time and very-high resolution earth observation[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(10): 6180-6194.
- [19] HILTON S, THANGAVEL K, GARDI A, et al. Intelligent mission planning for autonomous distributed satellite systems[J]. Acta Astronautica, 2024, 225: 857-869.

[作者简介]



赵辰乾 (1994-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司工程师, 主要研究方向为通遥融合、人工智能应用和电子侦察等。



闫瑞东（1984-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为通遥融合、星座管理和空间态势感知等。



刘言（1985-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为卫星网络架构、云网融合、通感算智融合、人工智能应用及天基边缘云等。



赵贇（2000-），女，上海卫星互联网研究院有限公司助理工程师，主要研究方向为卫星通信和6G等。



孙军帅（1980-），男，博士，上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师，主要研究方向为6G无线网络架构、功能和协议栈等。