



综述

低轨卫星通信遥感融合：架构、技术与试验

彭木根¹, 张世杰^{2,3}, 许宏涛¹, 张梦菲¹, 孙耀华¹, 程瑛³

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876;

2. 银河航天(北京)科技有限公司, 北京 100192;

3. 媒体融合生产技术与系统国家重点实验室, 北京 100803)

摘要: 低轨卫星系统是获取空间信息和破解宽带数字鸿沟的重要基础设施之一, 通信与遥感融合是解决现有遥感和通信分治、卫星重置、应急业务响应不及时等问题的有效途径。概述了低轨通信和遥感卫星系统的现状, 针对通信和遥感融合需求, 提出了通信遥感融合方案及体系架构, 阐述了基于该体系架构的硬件组成及融合试验方案, 最后探讨了相关挑战和未来发展。

关键词: 通信遥感融合; 低轨卫星; 即感即传

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022021

Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment

PENG Mugen¹, ZHANG Shijie^{2,3}, XU Hongtao¹, ZHANG Mengfei¹, SUN Yaohua¹, CHENG Ying³

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. YinheHangtian (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

3. State Key Laboratory of Media Convergence Production Technology and System, Beijing 100803, China

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellite system is one of the most important infrastructures to gather spatial information and break the broadband digital divide. The integration of communication and remote sensing is an effective way to solve the existing problems of system independence, satellite resource waste, and late response to emergency service requests. Firstly, the status of communication and remote sensing in LEO satellite systems were outlined, and then a communication and remote sensing integrated scheme and architecture were put forward to meet the integration requirements. In addition, a hardware composition and corresponding experiment based on this architecture was introduced. Finally, the relevant challenges and future development were discussed.

Key words: integration of communication and remote sensing, LEO satellite, real-time remote sensing and transmission

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200); 国家自然科学基金资助项目 (No.61925101, No.61831002)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200), The National Natural Science Foundation of China (No.61925101, No.61831002)



0 引言

低轨遥感卫星系统为对地观测提供了数据保障,已广泛应用于森林火灾监测、应急救援、大气观测等领域,促进了社会与经济发展,同时在国防领域的重要战略地位也日益凸显。另一方面,低轨宽带通信卫星近年来受到广泛关注,美国以 OneWeb、Starlink 为代表的低轨商业互联网星座已进入快速建设期,并为“黑杰克”“空间传输层”等项目提供服务^[1];我国也相继提出了鸿雁星座、虹云工程等一系列低轨星座发展计划^[2],在商业等领域均有巨大应用前景。现有遥感系统采用周期性、批处理的运行方式,存在卫星过顶时间短、地面接收资源不足、各处理环节相对独立烦杂等问题,难以满足大量、低时延的遥感信息获取需求^[3]。为解决上述问题,结合低轨卫星通信系统的发展,以及节省有限的低轨卫星载荷、轨道和频率等宝贵资源,低轨卫星系统的遥感和通信融合大势所趋。实际上,6G 的一个重要技术特征就是采用非地面网络(non-terrestrial network, NTN),在提供 10 100 倍于 5G 传输速率的同时,开发新的空中接口,实现传感、通信、导航、计算的融合^[4]。

为克服传统遥感卫星系统性能瓶颈,通信遥感功能可依托低轨卫星进行融合,最终实现即感即传的愿景。具体而言,通过在低轨卫星上同时搭载通信与遥感载荷,并借助在轨任务调度与信息智能分发、高速综合信号处理、地面站网资源融合管控等关键技术,提升遥感数据分发速率和遥感任务实时响应能力。

国内外对卫星遥感通信融合展开了初步研究。文献[5]设计了一个快记录慢发布模式的遥感数据传输子系统和对应的下行链路,实现了数据无损压缩准实时下传。针对遥感卫星的通信任务规划,文献[6]综合考虑数据采集链中的各类资源,提出了一个标签约束最短路径的框架以实现快速响应。针对多星协同问题,文献[7]比较了地面和

低轨小星座无线感知网络的异同,提出一种从卫星负责感知、主卫星负责与地面站通信的多星协同通感方案。此外,文献[8]基于具备星间链的 Walker 低轨遥感星座提出了一种遥感数据转发算法,能够最小化遥感数据请求和数据下传的时间。通过在应急导航/通信系统中集成地球观测信息、在地面/卫星混合网络基础设施中集成纳米卫星,文献[9]提出了面向应急场景的通信、导航、遥感三网协同方法。与此同时,各国关于卫星通感融合的相关项目也在推进当中:2018 年,美国国防高级研究计划局发起“黑杰克”项目,计划开发一个搭载军用通信、导航、侦察、预警等多类任务载荷的自主智能低轨星座^[10];美国陆军融合项目计划借助低轨星座通信传输能力连接传感器与作战武器,构建 20 秒杀伤链;俄罗斯于 2018 年提出打造通导遥一体化星座——“球体”,提供宽带通信、机器对机器通信、侦察、导航等多种功能^[11];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、数据集成发展的思路。总体来说,基于低轨星座的遥感通信融合研究已取得一些进展,但低轨卫星同时部署遥感和通信载荷的试验目前尚无公开案例。

1 低轨卫星遥感技术发展

遥感起源于航空探测,经过半个多世纪的发展,现代遥感系统借助光学相机、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)等传感器,接收来自地球空间的各种电磁波信息并进行处理分析,能实现全天候观测从而得到目标的物理特征及变化规律,具有宏观动态的优点。随着遥感技术在生态环境监测、国防战略安全等领域应用愈加广泛,全球各国积极组织遥感卫星技术研发,空间分辨率、时间分辨率等性能指标不断提高。

1.1 国内外研究现状

全球在轨运行的遥感卫星主要运行在 300 800 km 的低轨道,运行速度快、周期短,相比于无人机、浮空器等遥感类型具备独有的周期性广域覆盖和全球快速访问优势^[12],因此遥感卫星建设已成为各国科技发展竞争的焦点,美国、法国、俄罗斯、日本、欧洲航天局等国家和机构均展开了卫星遥感系统的建设和规划。目前具有代表性的先进高分辨率系统有美国的 WorldView 系列、法国的 SPOT 系列、加拿大的 RadarSat 系列以及中国“高分”系列等。总体而言,全球低轨遥感卫星规模不断壮大,美国在其中仍处于领先水平。我国航天事业发展 40 多年,现已跻身航天大国行列,卫星事业正面临难得的发展机遇。基于我国全球发展战略和国民经济产业发展需求,近年来国家接连论证发布了《高分辨率对地观测系统重大专项》《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025 年)》和《中国面向全球的综合地球观测系统十年执行计划(2016—2025 年)》,计划构建多分辨率配置、多观测技术组合的卫星遥感系统以提升全球观测和数据获取能力,加快中国的空间信息与应用技术发展^[13]。

1.2 传统遥感卫星体系架构

卫星遥感系统完成一次任务操作,涉及的环节包括指令上注、数据获取、星上处理、数据下传、数据处理与分发。遥感卫星的工作模式则包括成像记录、数据回放、准实时数传任务等 10 种,同一时刻只能工作在一种工作模式中,具体由运控指令进行控制。传统遥感卫星系统的体系架构如图 1 所示,由卫星平台、有效载荷、星地链路、地面系统 4 个子系统组成,各系统有序协同配合,完成遥感作业^[14]。

- 卫星平台: 遥感卫星常采用太阳同步轨道、回归轨道等 1 000 km 以下低轨^[15],也有部分处于地球同步轨道,本文主要针对低轨遥感卫星与星座进行探讨。低轨卫星具有发射成本低、重访次数高、数据传输率高等优点,更利于完成全球观测任务和观测数据快速下传。
- 有效载荷: 有效载荷即卫星平台搭载的对地感知观测设备,目前已投入使用的包括光学、合成孔径雷达、多光谱/高光谱等各类载荷,其性能直接关系到遥感的分辨率

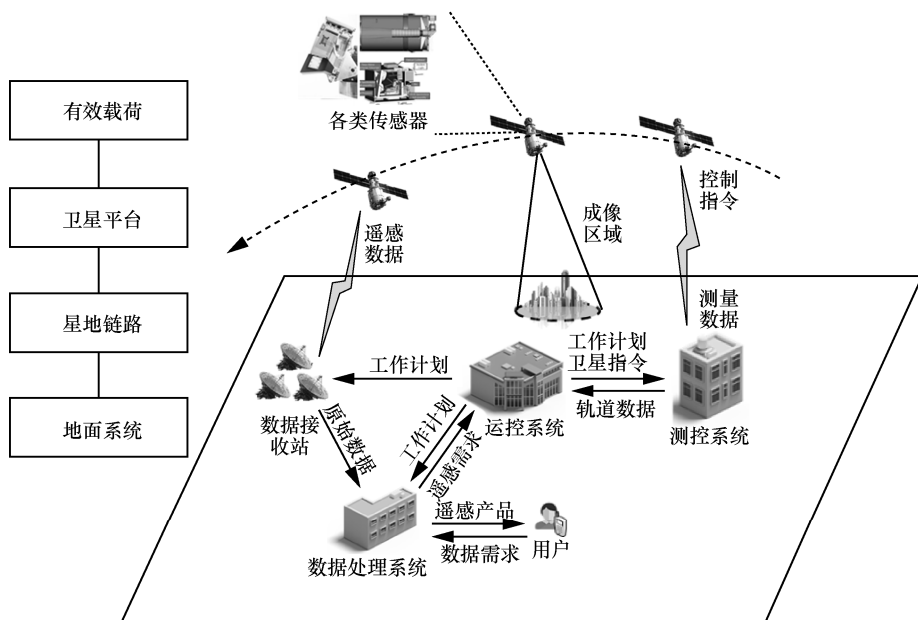


图 1 传统遥感卫星系统的体系架构



和成像质量。我国高分二号卫星已具有全色 0.8 m 的高空间分辨率。

- 星地链路：主要包括测控链路和数传链路，测控链路主要以 S/X 频段为主，数据传输链路主要以 X 频段为主^[15]。我国部分地面站具备 Ka 频段的下行数据接收能力，码速率可达 $4 \times 1.5 \text{ Gbit/s}$ ^[16]。
- 地面系统：地面段主要包括运控系统、测控系统、数据接收站、数据处理系统^[3]。运控系统作为地面控制中心，根据遥感需求生成卫星控制指令和遥感任务计划、统筹调度地面站网资源；测控系统负责卫星遥测与轨道保持、上注运控系统分发的控制指令、监视卫星平台和载荷运行工况；数据接收站根据运控系统发布的工作计划，完成遥感数据下行接收；数据处理系统对原始遥感数据做辐射校正及几何校正等进一步处理，生成对应的遥感信息产品分发给用户。目前，我国遥感卫星地面站承担着中国全部的民用陆地观测卫星和空间科学卫星任务，呈现了以北京总部为中心，连接密云、喀什、三亚、昆明、北极 5 个卫星接收站的结构，形成了完整的卫星数据接收、传输、存档、处理、分发体系^[16]。

1.3 问题挑战

随着遥感精度不断提升，原始遥感数据量成倍增长，每日生成数据量可达几十 TB。同时，遥感作为抢险救灾、海域监察、全球目标监测等场景中的重要辅助手段，应实现分钟级的响应。然而，以下因素严重限制了遥感信息获取的时效性。

- 地面系统由于各种因素无法实现全球布站，大部分测控站和接收站都处于境内且发展较为滞后，测控和接收资源都非常有限。
- 卫星运控、接收、处理和应用环节相互独立，信息获取链条复杂繁长，响应较慢^[17]。
- 低轨卫星平台高速飞行的特点决定了卫星

大部分时间在境外，由于单地面站过顶时长不超过 10 min，相对于有限的地面站布局而言，卫星可见时间短。

- 遥感卫星只能处于一种工作模式，观测任务和数传任务无法并行。
- 现有遥感卫星功能侧重在遥感数据获取和处理，星地链路数据传输能力较弱，无星间链路，制约了遥感信息分发能力。

综上，传统遥感系统存在过度依赖地面资源、信息分发能力受限问题，导致遥感信息服务响应滞后。与美国针对敏感事件 12 min 内的响应时间相比，我国遥感系统对境内事件的反应时延长达 10 h，对境外事件的反应时延则高达 2 030 h，性能差异明显。

1.4 通信—导航—遥感融合的体系架构

近年来，我国对导航、遥感等天基信息服务的覆盖需求趋于全球化。随着低轨卫星通信系统的发展，学术界提出了卫星通信、导航、遥感融合的天基信息服务系统建设构想，文献[3,18-20]中进行了深入探讨，依托具备全球无缝覆盖能力的低轨卫星通信系统，实现在轨多源信息的实时传输分发，将原来各自独立的通信、导航、遥感卫星网络有机融合。

通信—导航—遥感融合网络体系架构如图 2 所示，与传统遥感系统不同，此架构下遥感卫星作为天基感知节点接入融合网络，由全球覆盖的卫星通信网络辅助遥感指令和遥感数据即时传输转发，卫星测控、任务更新、数据下传不再依赖有限的地面测控、运控、接收资源，星地链路传输速率大幅提升，可以根据任务需要随时随地高速进行，从而突破地面站布局对卫星服务的限制，保障任何人在任何时间、任何地点均能实时可靠地获取高精度定位导航授时和遥感信息^[19]。

上述方案实现了通信、导航、遥感功能的互联互通，可让遥感卫星随时随地接收控制和任务指令并实时或准实时地高速回传遥感数据，大幅提升遥感时效性，然而，该解决方案目前仍处在

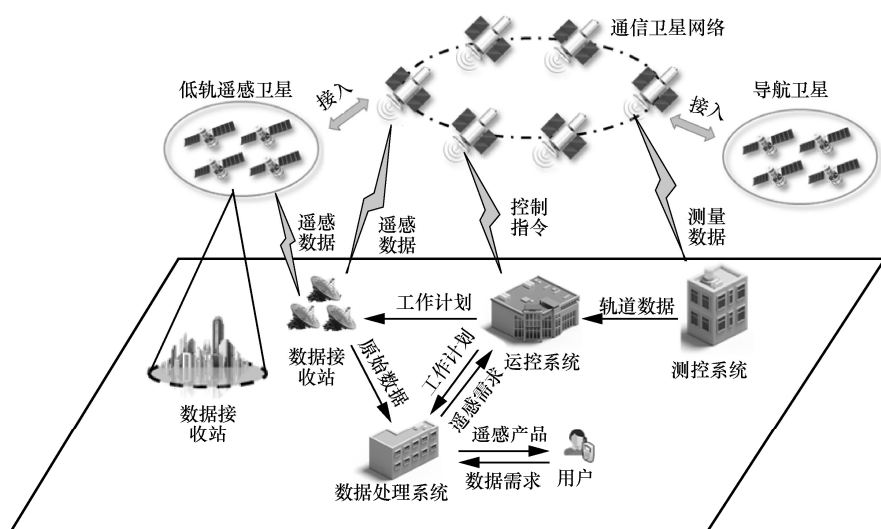


图2 通信—导航—遥感融合网络体系架构

建设构想阶段。考虑我国现有低轨通信卫星数量少、卫星轨道资源珍贵，可初步考虑首先在单颗低轨卫星实现通信、遥感功能的融合，相比前述通导遥融合架构可以减少所需的卫星数量、节省轨道和频率资源，同时降低发射运维成本。

2 基于通信遥感融合的低轨卫星系统

随着低轨卫星设计和制造技术的不断发展以及星载处理能力的增强，单星有望同时搭载多种载荷，实现“一星多用”，具体而言，借助强大的星载高性能处理单元，单颗低轨卫星能够在执行遥感任务的同时进行星间/星地数据传输。通过采用通信遥感融合卫星，可以减少通信遥感融合网络架构中所需的卫星数量，充分利用稀缺的轨道资源，实现即感即传。基于该融合卫星，本文提出了新型的低轨卫星通信遥感融合系统网络体系架构。

低轨卫星通信遥感融合系统体系架构如图3所示，低轨卫星通信遥感融合系统由通信遥感融合卫星、地面遥感中心、卫星信关站、地面通信系统组成。新型遥感系统对地面站网资源进行了融合管控。传统地面站由测控、运控、数据接收和处理系统组成，为了拓展遥控接收覆盖区域以及数据获取能力，地面站的接收系统之间布站遥

远，链路距离极长，网络环境复杂^[16]；测控、运控、接收、处理系统节点分布分立、环节存在冗余，服务响应链条见长。在新型网络架构下，可以将现有地面站整合为地面遥感中心，其主要职能包括卫星测量控轨、卫星控制和任务指令生成与上注、原始遥感数据接收处理以及遥感信息分发。

在新的架构下，用户获取遥感信息的途径变得更加多元：新架构中的遥感中心对原有地面站进行功能整合，兼容原有的运行方式，用户可直接向遥感中心发送遥感需求并接收数据产品；用户可以按照传统地面网络端到端的通信方式，与遥感中心建立链接，发送需求并接收产品；网络中的孤立节点，如执行海上救援的船只，可直接与遥感卫星进行通信，发送遥感服务请求并获取数据，然而，由于遥感原始数据量巨大，该方式需要星上有较强的计算处理能力对原始数据进行压缩甚至直接生成数据产品。

在无星间链的情况下，针对遥感中心和境内卫星间的交互，网络体系架构如图4所示。

- 遥感中心可以在特定的可视时间窗口直接与卫星进行通信，进行指令上注和原始遥感数据接收，此时遥感中心与卫星间的链路可以采用现有卫星通信体制，例如 DVB-S2X。

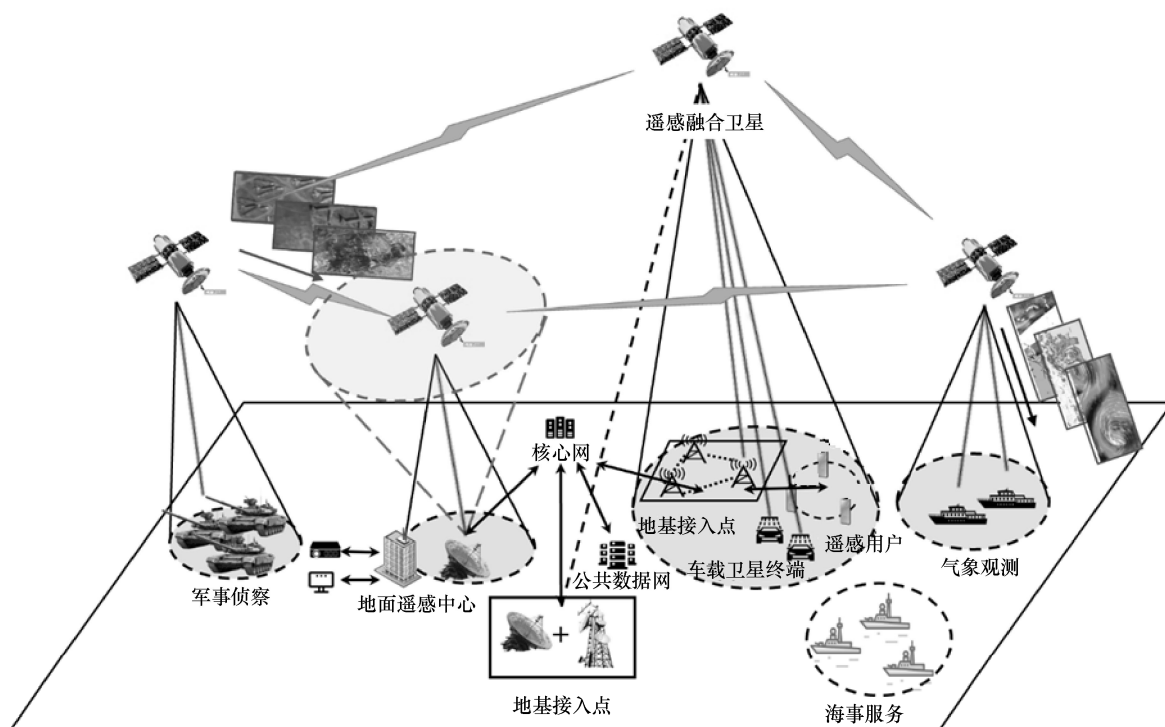


图3 低轨卫星通信遥感融合系统体系架构

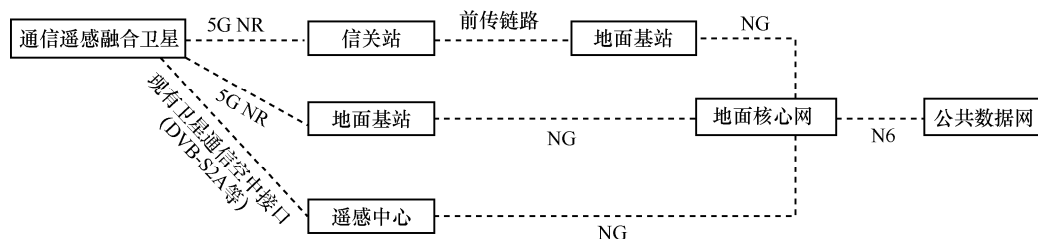


图4 无星间链路的网络体系架构

- 卫星可以通过地面网络的空中接口，如 5G NR，接入配备对空天线的基站，经过地面核心网转发后与遥感中心实现信息交互。然而，由于原始 5G NR 是专门为地面网络设计的，需要进一步评估卫星典型的信道特征对其的影响，如高传播时延、大多普勒频移等^[21]。
- 卫星可以通过含有基站处理单元的信关站进行基于 5G NR 体制的星地传输，随后再通过核心网与遥感中心通信，此时在架构上信关站用作地面基站的射频天线，通过前传链路与基站进行通信。

在存在星间链路的情况下，针对遥感中心和境外卫星 A 的交互方式，以数据下传为例进行说明，如图 5 所示。卫星 A 先将遥感数据由星间链路转发至卫星 B 或卫星 C，然后由卫星 B 通过 5G NR 下传至地面站、通过核心网传输至遥感中心，或由卫星 C 直接通过现有卫星通信空中接口下传至遥感中心。此时，卫星需具备星上处理以及路由能力，搭载可再生载荷。这种体系架构显然更加复杂，成本也更高。特别地，当卫星 A 通过卫星 B 下传遥感数据时，从信关站/基站角度而言，对于 NR 接口物理层、MAC 层的传播时延只须考虑与卫星 B 之间的星地链路。

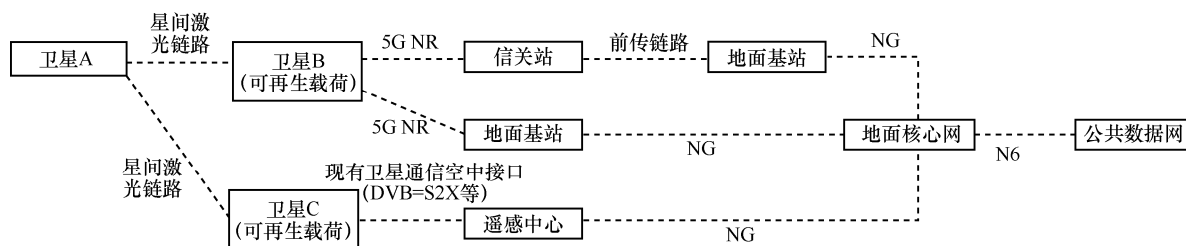


图5 有星间链路的网络体系架构

通过以上方式，新型卫星遥感系统的数据下传性能从3个维度实现了提升。一是星地链路传输带宽的极大扩展。目前，各国遥感卫星迅猛发展将导致广泛使用的S、X频段非常拥挤，而Ka等高频段传输带宽可达2.5 GHz以上，与S（90 MHz）、X（375 MHz）频段相比具有显著优势^[22]，卫星业务通信预计可保障至少1 Gbit/s的单通道速率^[23]。二是对卫星过顶时间的充分利用。现有遥感系统需要地面站的天线仰角在一定范围内才能对卫星进行跟踪，导致卫星与地面站之间的一次通信最大只能维持10 min左右，通过在星上实现通信、遥感两种工作模式并行，可即感即传，有效利用可视时间进行数据下传。三是遥感卫星的地面接收资源大幅增加。随着遥感系统与通信网络的融合，卫星的数据下传不再仅仅依赖有限的地面数据接收站，泛在的地面网络接入节点均可以为卫星提供数据链路，从而显著降低遥感数据获取时延。该架构通过多颗通信遥感融合卫星建链组网、地面遥感站点功能融合、网络泛在接入，真正实现“一星多用、多星组网、多网协同、数据集成”的多样化、精细化、高实效性遥感信息服务^[24]。

3 低轨卫星系统的通信遥感融合试验

为了验证评估上述所提网络体系架构的可行性和先进性，针对应急维稳等遥感信息即时传输需求，需要构建基于通信遥感融合的低轨卫星系统，提出基于通感融合的低轨卫星系统的实时遥感信息的关键性生产资料采集、传输、解译的新

模式，研究通信遥感一体化对遥感信息时效性的影响评价方法，优化实时遥感信息即时采集与传输系统的设计，并进行典型应用场景的试验验证。

本文融合试验目标是实现高分辨率遥感图像的快速获取、即时下传遥感数据并进行处理、快速将数据产品分发至用户端。为此，基于上述所提的通信遥感融合体系架构，进一步阐明星上通信、遥感载荷的功能部署与接口等，提出了如图6所示的试验体系架构。相较于传统遥感卫星系统，该架构系统利用通信传输实现了遥感的即时性，并扩展了遥感服务对象，未来可以更好地向开放合作、规模化应用发展。

3.1 试验体系架构

通感融合低轨卫星系统由空间段和地面段组成，其中空间段主要包括卫星平台、通信载荷和遥感载荷等，地面段包括Q/V频段信关站、X频段测控/数传站、Ka频段卫星终端和试验管控平台。

融合的低轨卫星通过在轨推扫成像、连拍高清成像等多种方式采集图像数据，利用与地面站间的遥测数传链路、馈电链路进行数据下传。测控数传站综合了传统测控站与数据接收站的功能，因此系统兼容传统遥感系统的运行方式，即在试验管控平台的控制下，通过X频段遥测数传链路对卫星进行轨道控制、指令上注以及数据接收。工作于Q/V频段的信关站与试验管控平台相连，能够接收管控平台的设备工作计划并实现程序跟踪，具备低轨卫星馈电侧无线信号收发功能，

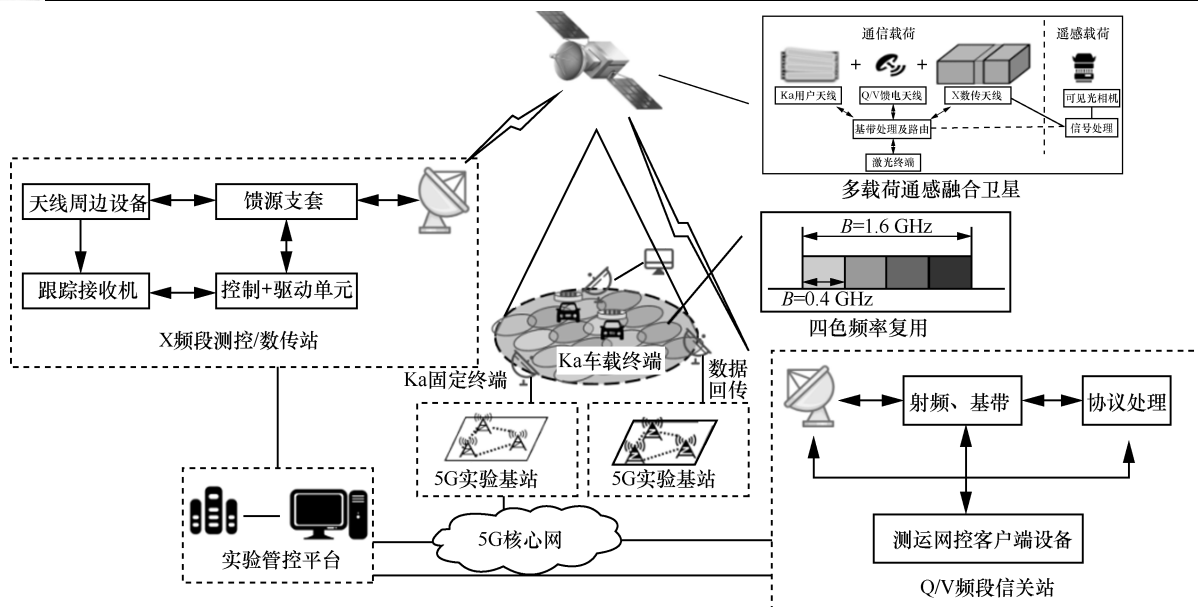


图6 基于通信遥感融合的低轨系统硬件试验体系架构

同时能够通过融合卫星的透明转发功能与卫星终端进行双向通信。卫星通信终端工作于Ka频段,并连接地面5G网络,可以作为数据下传的入口,兼具通信与借助5G网络发送遥感信息的功能。试验管控平台直接或间接通过地面网络与地面段测控/数传站、信关站相连,对系统进行统一管理,此外,在接收并处理原始遥感数据后,负责整合时间数据、文字信息等,生成即时新闻并快速分发给用户。

3.2 卫星载荷介绍

商业化低轨卫星平台目前常规的是200 kg量级,整星重约190 kg(包括宽带通信载荷和遥感相机48 kg),功耗约1350 W,预计寿命至少5年,典型代表是银河航天公司研发在轨的低轨宽带通信卫星平台。平台主要包括姿轨控、综合电子、结构、电源、数传等分系统,为有效载荷提供安装、供电、温度保证、测控等支持服务,配置Ka频段用户天线、X频段测控/数传天线、Q/V频段馈电天线、遥感相机、激光终端。测控链路设置在X频段,上行遥码速率可达2 kbit/s,下行遥码速率可达8 kbit/s。遥感数传链路也选用X频段,下行码速率可达300 Mbit/s。基于以上配

置,融合试验卫星能够实现20 Gbit/s以上低轨宽带通信能力和光学遥感能力,从而高效支持即时遥感信息的生成和快速分发。

(1) 宽带通信载荷

卫星的有效载荷设计高效支撑及时遥感信息宽带传输的时效性要求,为了降低成本和增加寿命,通信载荷可以基于透明转发模式,配置Ka频段的多波束用户天线和可接力使用的Q/V频段馈电天线,天线采用圆极化方式。此外,通信载荷集成了V-Ka频段前向链路转发器和Ka-V频段返向链路转发器,用于实现信关站、卫星、卫星终端之间的通信,提供20 Gbit/s以上宽带通信保障,从而满足遥感信息的大带宽即时传输需求。

(2) 遥感相机

卫星配置0.42~0.7 μm谱段RGB彩色面阵相机和TB级别的存储空间,相机成像数据通过X频段高速数传链路回传。为保障数据分发的灵活性,支持延时回放和边记边放功能,加快遥感信息生产的效率,连续最长成像时间可达10 min,星下点分辨率可达2 m@500 km。支持在轨推扫成像、视频成像和连拍高清成像等。

3.3 地面站硬件构成

(1) 信关站

信关站系统组成包括 Q/V 频段天馈馈、射频子系统、基带设备、协议处理设备、测运网控客户端设备。其中,天馈子系统的天线面选用抛物面天线,能够实现过顶卫星的实时高精度跟踪,而自跟踪则采用单脉冲跟踪方式。测运网控客户端负责接收试验管控平台设备工作计划,控制信关站实现天线的对星跟踪,同时采集显示信关站系统状态和设备指标参数。信关站总体功能包括低轨卫星馈电侧无线信号收发和射频信号处理、基带信号处理和空口协议处理、接收运控的设备工作计划,控制信关站天线实现程序跟踪,通过低轨卫星透明转发实现与卫星终端的数据通信。

(2) 数控/测控站

数控/测控站工作于 X 频段,发射左/右旋圆极化可选,接收测控左/右旋圆极化可选,进行数传时两种极化方式可同时工作。在关键性能方面,可达 64 kbit/s 的遥测速率,20 kbit/s 的遥控速率,1 Mbit/s 的上行注入速率,数据传输支持双通道同时解调,每通道速率可达 600 Mbit/s。

(3) Ka 频段卫星通信终端

本文融合试验主要包含便携/车载终端和固定终端两类。便携/车载终端采用平板相控阵天线,固定终端采用大口径抛物面天线。其中相控阵天线主要功能包括卫星追踪、射频信号收发、基带信号处理、卫星互联网协议处理、业务数据处理、星历输出处理、用户接口、时钟同步、资源管理等,能自动跟踪卫星并建立双向射频链路。

4 未来展望与技术挑战

通信遥感融合体系架构及其硬件试验初步验证了通信和遥感融合带来的性能增益和未来的巨大前景,也为典型应用场景提供了参考。为了进

一步提升融合性能,减少融合卫星功耗和降低信号处理复杂度等,未来需要开展通信遥感一体化、灵活的网络体系架构、先进的信号处理、智能数据协同技术研究等。

4.1 通信遥感一体化处理

通信遥感一体化技术利用单一传输信号进行通信与感知,可有效提高频谱利用率。此外,通过部署单一系统满足通信、遥感需求,能节约轨道资源并降低系统部署与维护成本。考虑到通信与感知对系统具有不同的要求,一体化系统的重要设计目标之一是进行系统资源的分配以权衡通信与感知各自的需求。具体而言,它包括分配功率、时域传输资源(持续时间与周期)、频域资源(信号带宽)、波束资源(波束方向、形状)以满足感知精度、感知范围、通信速率、时延、吞吐量等多方面的指标。在定位功能集成方面,3GPP 发布的 TR 38.821 报告中指出,地面 NR 接口有望支持包含低轨卫星的非地面网络。在现有 NR 标准定义的基础上,用于信道估计的参考信号(如 SRS 以及同步信号模块 SSB)对于收/发端是已知且通常是固定的,可以用于位置感知^[25]。如文献[26]以 NR 为基础,增加了定位资源块 PRSB,并通过在同步信号模块中增加 PRSB 的配置信息设计了通信参考信号模块 CRSB,其兼容原有时频同步功能。用户可根据 CRSB 按原有的通信方式进行接入,如果有位置感知需求则根据 CRSB 所含的 PRSB 配置信息对来自多个卫星的 PRSB 模块进行测量。未来进行一体化设计还需要对现有的信号结构作出必要调整,并改进物理层控制流程。

4.2 灵活的通感融合体系架构

多颗融合卫星的灵活组网是遥感系统实现全球实时观察、低时延遥感信息传输的关键。然而,对于低轨卫星而言,多星组网面临着网络拓扑高动态、星间链路不稳定等挑战。此外,虽然通信遥感融合卫星具有多重功能,但考虑到卫星功耗以及处理能力限制,需要遥感中心对遥感、数据



传输等任务在不同卫星间进行合理统一规划,在保证系统对地观测覆盖范围的同时保持对地通信链路的稳定,做到对遥感需求的快速响应。

4.3 窄波束智能管理

窄点多波束天线具有高增益、可实现低旁瓣的特点,在提供大范围覆盖的同时通过频率、极化复用还可成倍提高卫星容量,成为了未来星载天线的重要发展方向。现阶段的通信遥感融合试验卫星一般采用 16 根窄波束天线。此外,在卫星通信标准(如 DVB-S2X)中,已经考虑扩展符号信噪比的研究范围以支持 Ka 频段多波束天线,同时还对多波束双色复用、四色复用方式下的系统容量进行了评估^[25]。结果表明,随着复用方式由四色转为双色、接收天线口径由 45 cm 增加至 1 m,系统容量由 C/N 转为 C/I 受限,这意味着波束间干扰将严重影响系统性能的提升。因此对于多波束系统而言,需要进行时域、频域、空域、功率域的多维度系统性能优化。

4.4 软件定义可重构载荷

通信遥感融合需要星上灵活的载荷调整能力。软件定义可重构载荷可按需配置卫星功能,提供了一种理想的解决方案^[27]。通过可编程硬件和网络功能虚拟化,地面可实时上注更新融合卫星任务。在星载软件控制器的帮助下,卫星资源能灵活重组重用、载荷功能可快速重构,满足了各种任务的要求。搭载可重构载荷的卫星可以被在轨编程从而提供通信、遥感图像智能处理、数据路由转发等多种服务,能最大限度提高硬件集成度、缩短任务响应时间。

5 结束语

为满足未来大量、低时延遥感信息服务要求,遥感系统的体系结构需要不断演进。通过与通信系统的融合,遥感系统可真正实现“即感即传、全球覆盖”。本文通过融合在轨任务调度与信息资源智能分发、高速综合信号处理与模块管理、地面站网资源融合管控等关键技术,提出了以低轨

通信遥感融合卫星为基础的通信遥感融合系统网络架构,介绍了该架构下遥感信息服务方式。业界目前暂无公开通信遥感融合试验的成功案例,本文依据此架构设计了通信遥感融合试验,并详细介绍了其中的卫星平台载荷、地面站硬件组成。最后探讨了未来发展在通信遥感一体化、多星组网、波束管理、软件定义可重构载荷等方面面临的技术挑战,希望能促进国家、行业对空天地海一体化的研究与建设。

参考文献:

- [1] 链星. 美军利用商业低轨通信星座的新动向分析[J]. 国际太空, 2019(5): 8-14.
LIAN X. Analysis on the new trend of US military using commercial LEO communication constellation[J]. Space International, 2019(5): 8-14.
- [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] 彭会湘, 陈金勇, 杨斌, 等. 6G 通信时代的卫星遥感系统展望[J]. 无线电工程, 2020, 50(7): 523-529.
PENG H X, CHEN J Y, YANG B, et al. Prospect of satellite remote sensing system in 6G communication[J]. Radio Engineering, 2020, 50(7): 523-529.
- [4] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.
- [5] ZHANG Y, HE Y F, DONG G. Downlink design and operating mode optimization of remote sensing satellite data transmission system[C]//Proceedings of 2021 IEEE/ACIS 20th International Fall Conference on Computer and Information Science (ICIS Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 281-284.
- [6] CHEN H, LI J, JING N, et al. User-oriented data acquisition chain task planning algorithm for operationally responsive space satellite[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 27(5): 1028-1039.
- [7] COLITTI W, STEENHAUT K, DESCOUVEMONT N, et al. Satellite based wireless sensor networks: global scale sensing with nano- and pico-satellites[C]//SenSys '08: Proceedings of the 6th ACM conference on Embedded network sensor systems, [S.l.:s.n.], 2008: 445-446.
- [8] BUNKHEILA F, CUOLLO M, ORTORE E. An optimal micro-

- satellite system for optical remote sensing data management[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 157-165.
- [9] DEL RE E. Satellite communications for emergency[C]//Proceedings of 2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [10] 李菲菲, 胡敏, 武敏, 等. “黑杰克”项目动向及应用前景分析[J]. *中国航天*, 2020(9): 57-61.
- LI F F, HU M, WU T, et al. Analysis on the trend and application prospect of black jack project[J]. *Aerospace China*, 2020(9): 57-61.
- [11] 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. Overview of the development of foreign communication satellites in 2020[J]. *Space International*, 2021(2): 36-41.
- [12] 赵忠明, 高连如, 陈东, 等. 卫星遥感及图像处理平台发展[J]. *中国图象图形学报*, 2019, 24(12): 2098-2110.
- ZHAO Z M, GAO L R, CHEN D, et al. Development of satellite remote sensing and image processing platform[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2019, 24(12): 2098-2110.
- [13] 顾行发, 余涛, 田国良, 等. 40 年的跨越—中国航天遥感蓬勃发展中的“三大战役”[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 781-793.
- GU X F, YU T, TIAN G L, et al. Up to the higher altitude—the new “three campaigns” for the development of China space-borne remote sensing application[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 781-793.
- [14] 周拥军, 姜丽, 李元祥. 国外高分辨率对地成像观测系统现状与发展趋势[J]. *飞控与探测*, 2021, 4(5): 1-8.
- ZHOU Y J, QIANG L, LI Y X. Status and development trends of foreign space-borne high-resolution imaging remote sensing systems[J]. *Flight Control & Detection*, 2021, 4(5): 1-8.
- [15] 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.
- [16] 李安, 黄鹏, 石璐, 等. 中国遥感卫星地面站卫星地面系统的发展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 251-266.
- LI A, HUANG P, SHI L, et al. Update of remote sensing satellite ground system of China remote sensing satellite ground station[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 251-266.
- [17] 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.
- WANG M, YANG F. Intelligent remote sensing satellite and remote sensing image real-time service[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1586-1594.
- [18] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(2): 138-143.
- LI D R, SHEN X. Research on the development strategy of realTime and intelligent space-Based information service system in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(2): 138-143.
- [19] 郑作亚, 薛庆昊, 仇林遥, 等. 基于网络信息体系思维的天地一体通导遥融合应用探讨[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(8): 709-714.
- ZHENG Z Y, XUE Q H, QIU L Y, et al. Discussion on integration application of communication navigation remote-sensing with the idea of network information system of system[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(8): 709-714.
- [20] 冯建元, 李杰, 庞立新, 等. 天地一体化信息网络中天基卫星网络架构设计[J]. *电讯技术*, 2019, 59(7): 775-779.
- FENG J Y, LI J, PANG L X, et al. Architecture design of satellite networks in integrated terrestrial-satellite network[J]. *Telecommunication Engineering*, 2019, 59(7): 775-779.
- [21] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks-A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, PP(99): 1.
- [22] 张磊, 高翔, 韩锐. 遥感卫星频率使用浅析[J]. *中国无线电*, 2018(11): 35-37, 44.
- ZHANG L, GAO X, HAN R. Analysis on frequency use of remote sensing satellite[J]. *China Radio*, 2018(11): 35-37, 44.
- [23] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. *电信科学*, 2021, 37(7): 1-14.
- WU X W, JIAO Z F, LING X, et al. Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(7): 1-14.
- [24] 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.
- [25] ETSI. Implementation guidelines for the second generation system for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications: TR 102376-2-V1.2.1[S]. 2021.
- [26] WANG Y, LUO H, CHEN Y, et al. Integrated Communication and navigation for ultra-dense LEO satellite networks: vision, challenges and solutions[J]. *arXiv preprint arXiv: 2105.08985*, 2021.
- [27] 周渊, 张洵颖, 智永锋, 等. 软件定义卫星有效载荷技术研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(S1): 96-101.
- ZHOU Y, ZHANG X Y, ZHI Y F, et al. Research on software defined satellite payload technology[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(S1): 96-101.



[作者简介]



彭木根（1978—），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院执行院长、教授，网络与交换技术国家重点实验室副主任，IEEE Fellow，中国电子学会会士，中国通信学会会士。主要研究方向为智能无线网络、空天地海一体化网络、通信感知计算融合等。曾获得国家技术发明奖二等奖、北京市科学技术奖一等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖、求是杰出青年成果转化奖、中国专利银奖、IEEE 通信学会海因里希-赫兹奖等。担任《电信科学》副主编，*IEEE IoT* 期刊指导委员会委员，*IEEE Network*、*IEEE TVT*、*IEEE TNSE* 等期刊的编委等。



张世杰（1979—），男，银河航天（北京）科技有限公司创始合伙人、首席科学家，媒体融合生产技术与系统国家重点实验室特聘研究员，主要研究方向为卫星总体设计、低轨卫星互联网等，承担国家自然科学基金、装备预研重点项目 20 余项，发表论文 80 余篇，授权发明专利 15 项，获得国防科学技术奖二等奖 1 项。



许宏涛（2000—），男，北京邮电大学在读，主要研究方向为空天地海一体化网络。



张梦菲（2000—），女，北京邮电大学在读，主要研究方向为卫星通信感知一体化。

孙耀华（1992—），男，博士，北京邮电大学信息与通信工程学院讲师，中国通信学会会员，主要研究方向为智能无线网络和星地融合网络。

程瑛（1973—），女，媒体融合生产技术与系统国家重点实验室空间信息技术媒体应用研究中心主任，主要研究方向为卫星新闻生产流程、新闻与空间技术融合创新等。