引文格式:李建成,邹贤才,李志伟,等.星地空天信息智能协同与计算[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2239-2251.DOI:10.13203/j.whugis20260397

Citation:LI Jiancheng,ZOU Xiancai,LI Zhiwei,et al.Intelligent Satellite-Ground Synergy and Computing for Aerospace Information[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(11):2239-2251.DOI:10.13203/j.whugis20260397

星地空天信息智能协同与计算

李建成[1,2] 邹贤才[2] 李志伟[1] 金涛勇[2]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410012

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:回顾了武汉大学测绘学科自1956年创建以来,围绕服务国家使命历经传统测绘、数字化测绘、信息化测绘3个阶段的发展历程与主要成就。在精密测量、计算机、人工智能、宇航科技与通信技术交叉融合的背景下,阐述了测绘学科研究对象由地球及其他实体与地理空间分布有关的属性为主拓展为空天信息的变革趋势,明确了空天信息的定义与内涵;结合国家安全、灾害监测与应急、社会治理、自然资源管理、海洋管控、深空探测等领域的案例,指出空天信息事关国家安全和发展全局,是全球争夺的战略制高点。揭示了传统单星采集、地面处理模式在传输、处理、应用等多个维度上的结构性矛盾;系统分析了全球空天竞争由卫星规模比拼转向星上智能处理、星间协同与地面自主决策能力竞争的态势,指出学科转型的方向是空天信息科学与技术,而星地空天信息智能协同与计算正是转型的制高点与切入点,并提出其基本概念、总体架构与关键科学问题。分析了从"天感地算"到星地协同的范式变革,指出其是应对我国未来星座建设关键挑战、把握重大机遇的必然选择,并从人才培养与科研管理模式两个维度讨论了依托传统测绘学科,转型发展建设空天信息国家战略科技力量的可能路径。

关键词:空天信息;星地协同;在轨智能处理;时空基准;通导遥算一体

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-29

DOI:10.13203/j.whugis20260397 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2239-13

Intelligent Satellite-Ground Synergy and Computing for Aerospace Information

LI Jiancheng[1,2] *ZOU Xiancai*[2] *LI Zhiwei*[1] *JIN Taoyong*[2]

1 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410012, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper reviews the development of the surveying and mapping discipline at Wuhan University since its founding in 1956, tracing three stages of serving national missions: traditional surveying and mapping, digital surveying and mapping, and informatized surveying and mapping, and summarizing its major achievements. Against the background of the interdisciplinary synergy of precision measurement, computer, artificial intelligence, astronautics, and communication technologies, the evolutionary trend of the surveying and mapping discipline, shifting its research focus from the geospatial distribution-relating properties of the Earth and other entities to aerospace information, and the concept and scope of aerospace information are defined. Case studies in national security, disaster monitoring and emergency response, social governance, natural resource management, maritime governance, and deep space exploration show that aerospace information bears upon the overarching interests of national security and development, representing a key strategic battleground in global competition. The traditional paradigm of sensing in space and computing on ground is shown to suffer from structural contradictions in transmission, processing, and application. Global aerospace competition is shifting from satellite numbers toward system capabilities that integrate on-orbit intelligent processing, inter-satellite synergy, and autonomous ground decision-making.

基金项目:国家自然科学基金(42388102)。

第一作者:李建成,博士,教授,中国工程院院士,主要从事卫星大地测量学和物理大地测量学研究。jcli@whu.edu.cn

This paper argues that the discipline should transform toward aerospace information science and technology, with intelligent satellite-ground synergy and computing as the commanding height and entry point of this transformation, and proposes its basic concept, overall architecture, and key scientific problems. The paradigm shift from "sensing in space, computing on ground" to satellite-ground synergy is a necessary choice for meeting the key challenges and seizing the major opportunities in China's future constellation construction. Furthermore, from the two dimensions of talent training and scientific research management modes, it discusses the potential paths for leveraging traditional surveying and mapping disciplines to transform and develop national strategic technological forces in aerospace information.

Key words: aerospace information; satellite-ground synergy; on-orbit intelligent processing; spatiotemporal datum; integration of communication, navigation, remote sensing and computing

1 学科传承与时代转型

新中国成立初期,由于国家经济建设对基础测绘工作需求迫切,国家将全国民用高校几乎所有的测绘学科资源汇聚武汉,成立了武汉测量制图学院,因此,从建校伊始,为国家测绘事业培养急需人才、建立我国自主测绘科学与技术体系就是学校的主要办学目标。学校在学科设置上积极响应国家天文大地控制网建设与地形图测绘的紧迫需求,专业建设对标国家测绘基准建设与测绘生产作业体系,人才培养直接输送到国家测绘生产与科研一线。形成了以服务国家使命为办学方向的优良传统,构成了武汉大学测绘学科70年发展中最核心的价值定位。

1.1 以服务国家使命为办学方向的3个发展阶段

1)传统测绘阶段(1956年至20世纪80年代初):独立自主奠基我国测绘领域教育、科技、人才协同发展体系。初创阶段,全校师生深度参与了国家一、二等天文大地网建立与平差理论攻关;1975年,武汉测绘学院师生作为主力之一参与珠穆朗玛峰高程测量;以宁津生院士为代表的大地测量学者系统开展了地球重力场逼近理论与大地水准面精化的研究[1],为国家重力基准与高程基准建设奠定理论基础。同期的重要工作还包括从无到有,建立了以测量平差、大地测量、航空摄影测量、地图制图为核心的教材与课程体系[2],许多教材成为全国测绘专业的通用教材,为国家培养输送了大批测绘生产与科研骨干。

2)数字化测绘阶段(20世纪80年代初至21世纪初):产学研用一体发展实现数字化跨越。1978年,王之卓先生前瞻性地提出全数字化自动测图方案[3],指明了从模拟、解析走向全数字的技术方向。张祖勋院士团队相继研制出我国具有自主知识产权的数字摄影测量系统VirtuoZo、数字摄影测量网格DPGrid[4]等,实现了航空影像的全自动处理,生产效率较传统数字摄影测量工作站提升3~10倍[5]。宁津生院士、刘经南院士带领团队完成了一系列省市级现代测绘基准项目,革新了我国传统的坐标基准和高程基准建立与维持模式[1,6]。龚健雅院士提出面向对象的地理信息系统(geographic information system,GIS)数据模型,并主持研制国产GIS基础软件等[7]。上述成果支撑测绘学科完成了数字化转型,成果形态由纸质地图转为数字线划图、数字栅格地图、数字高程模型、数字正射影像图等标准化数字产品,作业模式由依赖个人经验的手工作业转为依托软件系统与标准工艺流程的规模化数字化生产。

3)信息化测绘阶段(21世纪初至今):需求牵引迈向空天地一体的时空信息服务。学科主体于2000年并入武汉大学后,测绘科学与技术学科保持了良好的发展势头,深度参与了西部测图、北斗系统应用等国家重大工程。这一阶段的标志性成果包括3项国家科技进步奖一等奖、10余项国家科技进步奖二等奖。近10年来,武汉大学测绘学科累计承担各类科研项目2 000余项,其中国家级任务1 100余项,形成了以国家级平台为核心、省部级平台为支撑的创新体系,推动了行业化应用,传统测绘由静态处理、事后服务走向实时感知与智能服务。

当前,学科正处于信息化测绘向智能化测绘跃升的新阶段。放眼国际,这也是全球测绘学科共同面对的时代命题。感知智能化、处理智能化与服务智能化的技术链条正在形成,这既是挑战,更是学科转型发展的历史机遇。

1.2 技术交叉融合的必然趋势与学科主动求变

回顾过往,测绘学科的发展从来就是学科交叉融合的结果:大地测量学的基础是数学物理与

天文测量学,摄影测量源于光学与航空摄影技术的发展,地图制图源于数学与信息科学等。当前,技术学科的爆发式发展使学科交叉成为学科发展与转型中不可回避的问题。

1)精密测量技术。以原子物理学、量子精密测量为代表的计量革命[8]正在重塑时空基准的建立与维持方式,测绘学科的感知广度和深度得到极大拓展。重力测量方面,SNADDEN 等[9]于 1998 年在 *Physical Review Letters* 报道了国际首个原子干涉仪式重力梯度仪,实现对地球重力梯度的测量;FIXLER 等[10]于 2007 年在 *Science* 杂志报道了利用原子干涉仪对牛顿引力常数的精确测定;CHEINEY 等[11]于 2018 年在 *Physical Review Applied* 报道了与导航兼容的混合量子加速度计。卫星导航与定位方面,北斗三号全球卫星导航系统建成并开通,北斗系统在轨运行卫星达 50 颗,全球定位精度(开放服务,水平位置)优于 10 m、授时误差小于 20 ns[12-14],相关性能与未来发展路径见北斗卫星导航系统发展报告[13-14]。与此同时,对地观测传感器的代际进步同样显著。遥感由胶片回收发展到亚米级数字成像、多光谱遥感等;合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)极大地推动了地球科学相关领域的发展[15];对地观测卫星的全球陆地观测能力得到极大的提升[16]。这些进步使时空基准的精度、稳定性与时空信息的适用范围大幅拓展。

2)计算机技术。云计算、边缘计算与星载人工智能(artificial intelligence,AI)芯片使计算资源的部署位置发生根本改变,算力已经拓展到了外太空。我国也开展了天基智能软件栈、在轨计算等方面的科学研究和工程验证[17];相关团队研究了智能遥感卫星系统的进展与挑战[18],卫星计算已成为关键能力之一[18-19]。未来星基的观测数据不必全部落地,数据、信息、知识的转换链条可以在卫星平台上完成,有可能直接变革地面集中处理这一传统范式。

3)AI 技术。深度学习与大规模预训练模型使遥感影像解译的自动化程度发生质的跃升,目标检测、语义分割、变化检测从辅助手段变为核心生产力。龚健雅院士系统分析了 AI 给遥感技术带来的发展机遇与挑战[20],对学科而言,解译不再单纯依赖人工判读经验,而由数据驱动模型生成,学科的知识边界也扩展到自然和社会感知、认知与推理。AI 改变了影像处理的知识生产方式,SpectralGPT、SkySense 等遥感基础模型的相关研究表明,大规模预训练正推动遥感解译从任务定制走向更加通用的智能[21-23]。

4)空间通信与组网技术。星间激光链路与大规模低轨星座部署使卫星从孤立节点变为可组网、可调度、可协同的基础设施。星间激光通信技术可有效支撑天基海量数据高速互通[24],甚至支撑行星探测任务[25-26]。任务中信息传输环节第一次具备了天上网的形态[26-27],感知、传输、计算可以在天基体系内形成闭环,为星地协同的体系范式提供了基础设施。

上述技术的作用链条完整覆盖了时空基准建立与维持、全域感知、数据处理、信息传输与应用等测绘学科的关键环节。技术领域发生了根本变化,新时代的测绘已不再是以地形图生产为中心的测量制图学,而是以时空信息全链条智能化服务为主线的空天信息学科。测绘学科若不主动应变,未来就会在新体系中逐步被边缘化;主动求变,我们可以将学科 70 年积淀下来的时空基准与对地观测优势转化为新体系中的核心能力,在学科交叉与融合中获得新的发展机遇。

2　空天信息的内涵与战略地位

2.1　空天信息的定义与内涵

传统测绘的研究方式是通过大地测量建立时空基准,通过摄影测量与地图制图获取和表达地表几何形态,成果形态以地图、坐标与工程控制成果为主,总体上具有静态和事后的特征。随着巨型星座建设和多种无人平台的爆发,空天信息是在空天地海全域由各类平台、以统一时空基准为底座获取的时空位置信息、对地观测信息与空间环境信息的总和,其主体形态为通信、定位导航授时、遥感三类信息及其融合产品。这一信息形态与近年来对地观测系统从单一功能向实时、智能、主动为特征的通导遥融合发展总体趋势一致(包括即时遥感等相关概念)[28]。

其内涵包括 4 个维度:(1)基准统一:一切信息以高精度时空基准为底座,可实现全球统一框架下的多源融合;(2)平台多元:从地球静止轨道、中地球轨道、低地球轨道卫星到临近空间、无人机与地面传感网,构成泛在感知体系;(3)链条完整:覆盖感知、传输、处理、决策与服务全链条;(4)服务多元:颠覆传统意义上有什么提供什么的被动服务模式,以按需、实时、到端的智能服务为经济社会发展赋能,为国家安全提供支撑。

空天信息的成果形态是持续更新的时空数据流与按需送达的智能服务:感知由周期性观测变为泛在持续获取,成果由一次测绘、多年使用变为实时感知、即时服务,价值实现由数据交付前移为决策支持。上述根本变化,意味着支撑空天信息生产的知识体系、技术手段与组织模式都面临巨大的挑战,也是学科转型发展的重大机遇。

2.2 空天信息的典型应用

以下从国家安全、灾害监测与应急、社会治理、自然资源管理、海洋管控、深空探测等6个领域,结合案例论述空天信息的战略作用。

1)支撑国家安全。2022年以来,空天信息深度改变了战争形态,以俄乌冲突为例,星链低轨星座为乌克兰军队提供了战时韧性的指挥通信与无人机控制链路。乌军无人机依托低轨星座实现上千千米远程奔袭,实时回传高清图像、动态调整航线并精准发起打击与效果评估[29]。俄乌冲突中商业航天与国家安全深度耦合的典型案例表明,大型科技企业与军事体系的军民协同正在重塑安全治理格局[30]。低轨星座搭载光学、合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)等多元侦察载荷,可实现全天候、全地域侦察监视,精准甄别高价值目标,并与天基卫星侦察、地面雷达探测数据深度融合,商业星座正在重塑作战体系与范式[30-31]。而且,SpaceX在部署约5 000颗卫星后,系统总体实现了收支平衡,具备了可持续的自主发展能力。星座规模、智能处理、自我更新3项能力叠加,已成为战争胜负手从平台数量转向体系效能的典型标志。低轨星座对作战体系的赋能、商业卫星情报的军民融合模式已经成为国防科技领域的前沿议题[29,31]。

2)服务灾害监测与应急。2026年8月末,尼泊尔境内冰川断裂发生冰岩崩,崩塌物高速下泄后演变为巨型泥石流冲击中国西藏吉隆口岸,造成重大人员伤亡。灾后,中国科学院相关研究机构利用遥感监测数据快速查明灾害系冰川失稳所致,并揭示了灾害的放大机制。该事件一方面证明测绘技术在重大地质灾害溯源中的作用,另一方面也暴露出单星采集、地面处理模式下从成像到可用产品的时延与灾害黄金救援窗口之间的供需矛盾。

3)赋能社会治理。全国已有40个智慧城市时空大数据平台建成并投入运行,为城市精细化管理与智能化决策提供统一的时空底座[32-33]。时空大数据已成为社会治理智慧化的基础性生产要素,数字孪生城市建模中的时空数据融合方法研究为城市治理的时空底座提供了支撑[34]。国际上以Google Earth Engine为代表的大规模云端地理空间分析平台亦为时空底座建设提供了成熟技术模式[35]。

4)自然资源管理。全国国土调查、耕地“非农化、非粮化”卫片执法、实景三维中国建设均依赖遥感常态化监测。“十四五”期间,国产卫星遥感影像自主保障率已达90%以上,1∶50 000基础地理信息数据库覆盖全部国土,1∶10 000基础地理信息数据陆地国土覆盖率达到70%。同时,包括InSAR在内的遥感手段也成为应急测绘的重要组成部分,已在全国地质灾害隐患早期识别中规模化应用,是空天地一体化隐患早期识别与监测预警体系的重要一环[36]。

5)海洋管控。星载SAR具备全天时、全天候海面目标探测能力,与船舶自动识别系统融合可对非合作目标实施广域常态化监测,是远海看得见、盯得住的关键手段。我国海洋卫星系列(海洋一号、海洋二号、海洋三号)已实现业务化运行,也可为海洋权益维护、渔业管控与海上执法提供持续数据支撑;SAR影像舰船目标检测的深度学习方法已成为海洋目标监视的重要手段[37],相关成果也可为海域常态化监测提供技术保障[38]。

6)深空探测。嫦娥五号、嫦娥六号实现月球采样返回,天问一号实现火星着陆巡视,《2021中国的航天》白皮书将月球探测、行星探测列为未来航天强国建设的重点方向[39]。未来国际月球科研站与载人登月工程,对月球、火星的高精度制图与统一时空基准提出迫切需求,包括着陆区的厘米级地形测绘、巡视器的视觉/激光融合定位、撞击坑与坡道的自动识别避障等。基于嫦娥数据的深度学习撞击坑识别已展示了智能方法在行星测绘的潜力[40]。上述内容本质上都是测绘科技在行星场景的延伸,在可见的未来,测绘能力边界必将随着国家深空探测步伐延伸至38万km之外,甚至更远的深空。

2.3 空天信息的战略地位

纵观上述领域可以看到一条共同规律,无论是战场态势即时感知、灾害窗口快速研判,还是城市运行智慧管理,重大需求的时效性已经从天级压缩到分钟级甚至秒级,要求边感知、边处理、边服务。现行的单星采集、地面处理模式需经数据下传、集中处理、产品分发多个环节,时延普遍

处于小时级以上,供需矛盾在应急场景下尤为尖锐。可以断言,空天信息领域的能力是国家综合实力的重要体现与组成部分。

1)体系能力之争。美国“星链+Palantir”范式把多源情报与AI决策平台直接耦合进作战体系,将发现、识别、定位、打击闭环压缩至分钟级[41]。美国国防部2024年发布商业航天整合战略,将商业航天解决方案正式纳入国家安全太空架构[31]。兰德公司研究指出,星链在俄乌冲突中展示的韧性星座作战效用,已深刻影响大国对低轨星座军事价值的认知与布局[29]。截至2025年,我国在轨遥感卫星超过600颗、数量稳居世界第二。卫星数量追赶迅速的同时,还需要瞄准体系能力建设,在理论、方法、工程与人才上整体突破。

2)产业规模之争。太空经济正加速扩张,全球太空经济已演变为涵盖卫星制造、发射服务、太空算力等要素的庞大产业集群[42]。SpaceX已于2026年挂牌上市,成为美国股市历史上规模最大的首次公开募股之一。据专业机构预测,全球太空经济规模2035年将达到2023年水平的约3倍[42],由于商业航天军民边界模糊、以商促军的结构性特征,使产业竞争本身成为战略竞争的组成部分[31]。

3)规则与资源之争。低轨轨道与频谱资源遵循先占先得规则,使低轨星座的大规模快速部署成为排他性的战略动作,竞争窗口期正在收窄。对此,《2021中国的航天》白皮书提出推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展,开启全面建设航天强国新征程[39]。国家航天局2025年印发《国家航天局推进商业航天高质量安全发展行动计划(2025—2027年)》,将商业航天定位为“推动航天产业发展、建设航天强国的重要力量”[43]。从“十四五”规划纲要提出打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系[44],到“十五五”规划纲要首次将建设航天强国写入国家重点任务,并把商业航天列为新产业、新赛道重点培育[45],空天信息的战略制高点竞争已经全面展开。

3　全球空天信息竞争与星地协同范式变革

3.1　从“天感地算”到星地协同

现行的卫星工作模式是“天感地算”,执行的是卫星采集、数据下传、地面处理、用户应用的工作流程。据报道,由于卫星每次过境仅有分钟级的数据传输窗口期,大部分卫星获取的数据约90%无法实时传输到地面,成为传统卫星运营模式的痛点之一。此外,绝大多数遥感数据存档闲置,仅有不足5%实现高价值落地应用。因此,一方面是海量历史数据长期闲置,得不到深度应用,另一方面是用户找数据难、用数据难,供需两端严重错配。传统模式下数据处理与分发时延普遍处于天至小时级,而灾害应急、军事行动等场景要求分钟至秒级响应。为此,欧洲空间局在2020年发射了Φ-Sat-1卫星。该任务是国际首个在轨运行深度神经网络的对地观测任务,其星载CloudScout智能载荷在轨完成云检测并剔除无效影像数据,使有限下行带宽集中于有效观测信息[46]。Φ-Sat-1的成功实践表明,将智能处理前移至星上,可以在不增加星地传输带宽的前提下大幅提升信息交付效率[46],为建立星地协同的智能模式提供了可行路径。在轨海洋异常检测方面也已有相关试验验证,将海洋污染监测产品的生成由地面数天缩短至在轨分钟级[38]。其后续任务Φ-Sat-2已于2024年发射,以开放平台模式支持云检测、图像压缩、近岸水质监测等多个在轨AI应用,展示了广阔的应用前景[47-48]。

传统“天感地算”模式与星地协同智能模式的能力对比见表1。

表1　传统“天感地算”模式与星地协同智能模式能力对比

Table 1　Capability Comparison Between the Traditional “Sensing in Space, Computing on Ground” Paradigm and the Intelligent Satellite-Ground Synergy Paradigm

对比维度	“天感地算”模式	星地协同智能模式
卫星的作用	单星采集,功能孤立	组网感知,星间协同
数据流	全量下行,星上缺乏智能	在轨处理,产品下行
算力部署	地面集中式	星上/星间/地面云边端一体
服务时延	天至小时级	分钟级至秒级
数据利用	存档数据闲置率高	按需成像、即时服务
任务模式	预定计划、批处理	用户驱动、自主规划、闭环响应
体系韧性	依赖地面站,单点脆弱	星间路由,去中心化,抗毁

3.2 从平台竞争到体系协同

传统意义上,单星能力与卫星数量决定感知覆盖的上限。星地协同模式下,把感知能力转化为行动能力和服务能力的速度与质量取决于体系能力。全球空天竞争正由卫星平台效能及其规模的简单竞争转向星上智能处理、星间协同与地面自主决策三位一体能力的竞争。

1)星上智能处理。从拍照回传到边拍边算。据报道,中科卫星14星、15星搭载星上数据接收、计算、分析一体化载荷,在洪涝、地震等应急场景下可实现分钟级图像处理与解译。以在轨处理与地面处理作简单对比:星上每完成一次数据到产品的转换,需要下传到地面的数据量就可能降低一个量级,等效于有效带宽被放大。因此,星上算力已成为与载荷能力同等重要的卫星核心指标。在轨边缘计算架构[19]以及星载图像在轨分类[49]等相关问题得到了广泛的研究,卫星计算的发展愿景与关键技术挑战亦有系统分析[19]。卫星移动边缘计算的体系架构与服务质量保障方法[50]、星载神经网络推理的硬件设备与软件技术[51]已经可以为星上智能处理提供重要支撑。

2)星间协同。卫星以前是孤立的节点,低轨星座通过星间激光链路构成天基骨干网后,数据不经地面站中转即可全球访问,重访周期由单星的数小时/天缩短为星座的分钟级。我国星间激光通信核心技术取得重要进展[26-27],具备支撑天基海量数据高速互通的能力,为星间协同奠定了坚实的技术保障。国际上,美国国家航空航天局2023年在“灵神星”任务中完成深空激光通信在轨演示,在0.31~4亿km距离上实现最高267 Mbps下行速率[52],国内外的工程实践与最新研究表明星间激光链路正在迈向工程组网应用。近期,星网、千帆等低轨互联网星座正以一箭多星的规模化方式密集发射,加速组网、通过体系化设计,星间链路[53]把过境窗口约束转化为全星座在线,任何一颗卫星的感知数据都可以由全网传输与计算,空天地一体化对地观测网络方向正在形成[53-54]。

3)地面自主决策与算力星座。地面系统正由集中处理中心演变为任务规划与智能决策中枢,并与天基算力耦合。“星链+Palantir”范式是当前该领域的典型成果[41]。上海于2026年9月启动“明珠星座计划”,拟到2030年建成太空智能算力网络;竞争的重点已不仅仅是有多少颗卫星,还包括能在多短的时间内把天上的感知变成行动,星上智能、星间协同、自主决策的三位一体能力缺一不可。

3.3 范式变革的必然性

感知在天上、计算在地面、决策在后端的“天感地算”模式,实际上隐含了传输带宽无限、时间不敏感、应用在事后,而这3个前提在智能时代是不成立的,且无法支撑分钟级闭环的体系能力。综合国内外的技术进展与突破,可行的解决思路是把计算前移到数据端,在星上完成数据、信息、知识的逐级压缩,将原始数据中的目标与语义产品在轨提取后下传,等效传输比可达数量级提升;配合星间激光链路跨星分发与地面云协同算力,构成星上智能处理、星间协同传输、地面自主决策的一体化系统。

这一变革趋势已经初见端倪,主要航天国家与地区均在围绕星地协同能力展开布局。欧盟委员会于2022年签署IRIS^2(Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite)星座合同,计划部署约300颗卫星,为欧盟及成员国政府提供安全通信服务并兼顾商业宽带,计划于2030年前后提供初始服务[55]。从美国的“星链+Palantir”范式到欧盟的IRIS^{2}主权星座,全球主要力量正把天基感知、智能处理与安全通信纳入一体化体系能力建设,进一步印证了范式变革的必然性与紧迫性。

一系列国内外探索实践与规划说明,从“天感地算”到星地协同的范式变革,是突破我国遥感卫星传输、处理、应用三大瓶颈、抢占全域空天信息战略制高点的关键途径。

3.4 星地智能协同关键技术

前已述及,星地空天信息智能协同与计算,是指以统一时空基准为基础,将天基感知资源、星间星地通信资源与星上/地面计算资源视为可统一调度的整体,通过AI技术实现星上智能处理、星间协同传输、地面自主决策,面向用户提供分钟至秒级时空信息服务的理论、方法与工程体系。其总体架构可概括为6个层次:统一的时空基准层、天基感知层、星间星地互联层、智能计算层、自主决策层与应用服务层。(1)统一的时空基准层为高精度、高稳定、星地一体的时间与坐标基准;(2)天基感知层为遥感、导航、通信与空间环境探测载荷构成的多尺度泛在感知网络;(3)星间星地互联层为激光星间链路与星地链路构成的天基骨干网,实现数据与任务的跨星路由;(4)智能计算层为星上轻量化智能处理单元

与星地协同计算平台,支撑在轨的数据、信息、知识转换链;(5)自主决策层面向任务实现感知、传输、计算资源的按需闭环配置;(6)应用服务层面向国家安全、民生应急、自然资源、海洋、深空等场景提供按需服务。星地空天信息智能协同与计算的主要内容如图 1 所示。

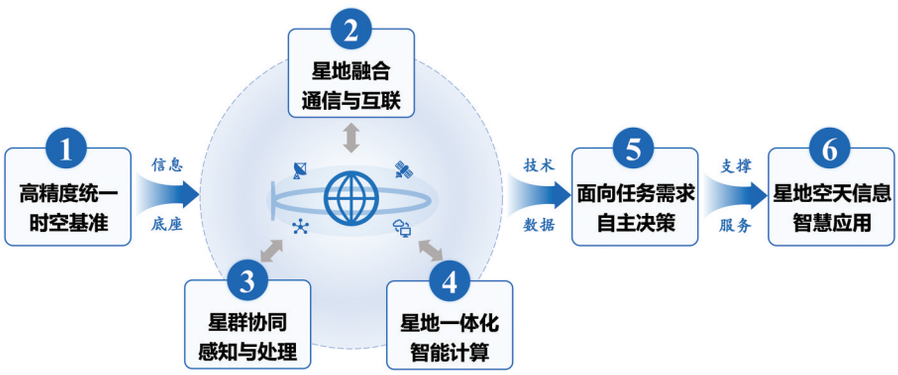


图 1　星地空天信息智能协同与计算的主要内容

Fig. 1　Main Contents of Intelligent Satellite-Ground Synergy and Computing for Aerospace Information

当前体系能力与预期目标的差距集中体现在 4 个方面。在时空基准上,动态框架的维持仍高度依赖地面站网,距离全球统一、天基地基融合、快速服务可达的目标存在明显差距,需要开展星地一体高精度时空基准建设。在星地通信上,跨域信道建模与异构链路组网能力不足,星地传输仍受制于过境弧段与频谱资源,难以支撑海量数据“应传尽传”;在星群协同感知上,数据下传、地面处理的传统范式依然是主流,星上感知、决策、执行闭环仍处于概念验证阶段;在星地一体计算上,星地算力彼此割裂,缺乏统一的资源池与自适应负载均衡机制。未来需要在以下方面发力,开展关键技术问题攻关(图 2):

1)高精度星地一体时空基准建设。通过星地协同观测与技术融合、卫星自主定轨与基准服务[56]、超高阶重力场与高程基准[57]等建立星地协同的动态地球参考框架、超高阶重力场模型与垂直基准、广域分布式时间基准等,推动时空基准维持模式与服务模式的转变。

2)星地融合通信与互联。突破星地跨域信道建模、时空感知智能接入、异构链路动态组网与高可靠低延时传输关键技术,构建“预测驱动—智能决策—动态组网—可靠传输”的星地融合通信体系。

3)星群协同感知与处理。借鉴类脑分布式智能思想[58],构建“大脑-小脑-神经元”三级分布式星群协同感知具身智能架构,建立星上“感知—决策—执行”闭环新体系,颠覆“数据下传,地面处理”的传统范式。

4)星地一体化智能计算。构建星地全栈架构内生新生态,建立星地一体资源池,打破星地算力壁垒,建立自适应均衡负载运控机制,支持“大数地算、急数星算”。

3.5　星地智能协同基础科学问题

上述技术差距的背后,是一系列尚未突破的基础科学问题。

1)资源强约束下的轻量化模型与在轨增量学习。星上智能处理面临的资源约束远比地面苛刻,比如星载 AI 芯片的典型功耗仅为数瓦(如 Φ-Sat-1 搭载的 Intel Movidius Myriad 2 视觉处理单元可控制在 2 W[46],我国国产星载智能计算单元也可以通过系统设计做好能量控制[19]),而深度学习大模型推理的功耗需求持续攀升。如何在“瓦级功耗、高可靠、长寿命”约束下实现复杂遥感数据的实时解译,尚无成熟理论可循。在轻量化模型设计、在轨自主决策与小卫星对地观测任务图像识别等方面还有很多工作要做[51]。

2)星地算网协同的在线调度理论。低轨卫星过境单站可见时间通常在分钟级,星间链路随星座构型持续切换,感知、传输、计算三类资源的联合优化是一个典型的在线决策问题,现有地面网络的任务调度理论难以直接移植[59]。

3)多源数据可信融合与误差传播。不同平台、不同模态数据的时空信息精度与辐射定标差异显著,融合结果的误差传播与可信评估尚缺乏统一标准,在误差传播(比如融合方法对影响因素的敏感性分析等[60])、可信评估与机理融合方面展开攻关。

4)空天信息安全与治理框架。在受限的星载功耗和计算资源下,如何保障机密性、完整性、

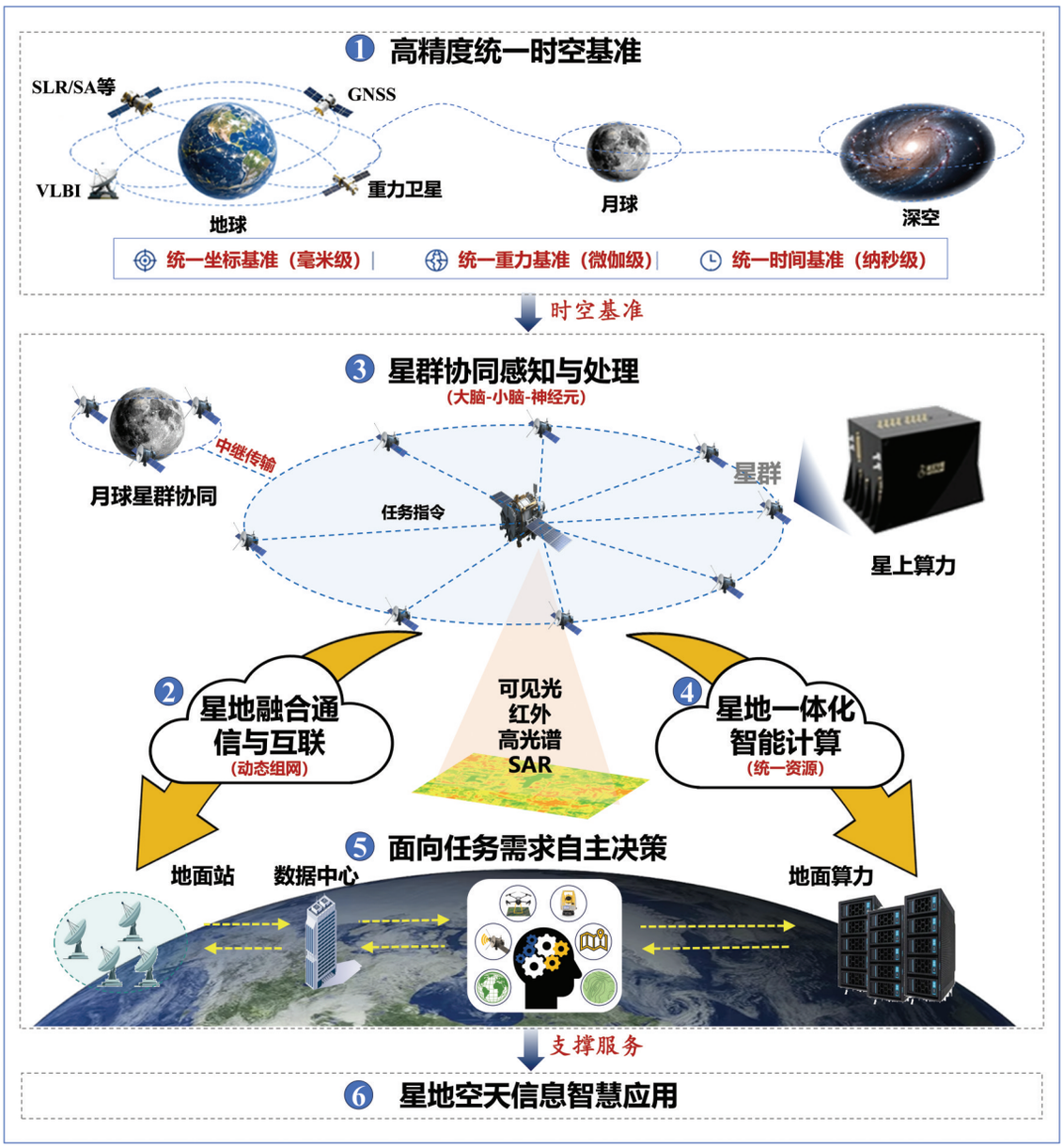


图2 星地空天信息智能协同与计算的技术路线与关键难题

Fig. 2 Technical Route and Key Challenges of Intelligent Satellite-Ground Synergy and Computing for Aerospace Information

可用性、可追溯性以及低时延是重大的技术挑战[61]。面向可信时延保障、质量评估、基准一致性等重要需求,空天信息服务标准体系与安全治理框架需要系统重构,从而建立从用户需求到卫星动作、再到用户终端的闭环机制,实现数据安全、模型安全与可用性。

4 面向空天信息的人才培养与科研管理

4.1 人才培养模式的转型

人才是学科转型最根本的支撑,而转型的深层逻辑在于人才能力图谱的整体迁移。传统测绘人才的核心能力是测量准确、绘制精确。以仪器操作、误差控制、成图规范为中心,能力结构呈单一、专业的特点;空天信息人才的核心能力则要求在时空信息专业素养之上,叠加AI与大数据分析能力、航天系统工程视野以及跨学科协同能力,能力结构呈专业纵深与多学科横通的T型特点。进一步细化到知识方面,传统课程体系以大地测量、误差理论、摄影测量、地图制图为主线,数学与物理是主要支撑基础学科;空天信息的知识图谱则要求在保留上述主干的同时,把机器学习、星载高性能计算与电子信息系统、卫星轨道与星座设计、组网通信协议等纳入必修课程,支撑学科从数理扩展到数理、信息、航天三足鼎立。分析教育部测绘类专业教学指导委员会发布的测绘工程等专业质量国家标准中的课程设置,可

以发现我国现行的测绘学科培养方案中传统课程占比偏高[62],而时空信息装备、人工智能与航天系统工程课程的供给不足。正视这一差距,空天信息人才培养须从以下4个方面实现转变:

1)培养目标。从测量员到时空信息与航天系统工程师兼备的复合型人才,需同时具备时空信息专业素养、AI与计算机能力、航天系统工程视野。相应的培养方案有必要据此重构。

2)知识体系。构建测绘+AI+航天+通信的交叉课程群。在保留大地测量、摄影测量、GIS等核心专业本领的基础上,系统嵌入机器学习、星载智能计算、卫星系统设计与空天组网通信模块,建设空天信息微专业与交叉学科学位方向。国际GIScience教育界同样正在经历面向GeoAI的课程体系重构与知识结构的调整[63]。

3)培养方式。科教融汇、产教融合、实战化育人。以需求为牵引,以任务为导向,比如在空天信息领域把卫星研制全链条变为育人全链条,进一步依托真实星座、真实数据、真实用户,开展实战化训练,践行实践育人。

4)价值塑造。以国家使命铸魂,从珠峰测高、南北极测绘到新时代的空天信息实践,学科70年积累的测绘精神是最鲜活的课程思政资源。

4.2　科研组织与评价改革

面对未来,我们还要进一步扩大国际交流,培养具备国际视野、能够参与国际组织与国际规则制定的卓越人才。与此相应,科研组织方式决定着学科转型的组织效能。过去学科建设和科学研究以解决单一领域的专业问题为主,一个课题组、一项技术、一篇论文的作坊式模式,与测绘行业按专业分工(大地测量、工程测量、摄影测量、制图等)纵向切分的组织形态相适应。而星地协同体系建设是要面向国家需求提供覆盖感知、决策、服务全链条的系统解决方案。它横跨测绘、计算机、航天工程、通信等多个学科,需要载荷、卫星、地面系统在统一框架下协同,任何一个单点都无力独立支撑。这种单一专业问题向系统工程问题的转变,使现行科研组织模式暴露出4个突出问题:团队建制碎片化、平台资源分散重复、评价导向重论文轻贡献、校地产业协同松散。教育部《关于加强高校有组织科研 推动高水平自立自强的若干意见》要求高校开展建制化、体系化的有组织科研[64]正是对这一矛盾的制度性回应。落实到测绘学科向空天信息的转型,应重点把握以下3点:

1)建制化攻关与平台重构。围绕星地协同目标导向任务,整合各类科研平台资源,按科学问题、关键技术、工程任务重组,实行跨学科首席科学家负责制,形成“需求—任务—团队—平台”贯通的建制化攻关格局。

2)高校主导星座工程的新型组织模式。我国天智系列卫星是全球最早开展软件定义卫星技术试验的系列之一,为大规模巨型智能星座建设积累了关键技术储备[65-66]。欧洲空间局以OPS-SAT-1试验卫星为载体,向全球团队开放在轨算力与载荷接口,已完成星上AI图像分类、生成式去噪等数十项在轨试验[49],表明“开放平台+协同攻关”的在轨试验组织模式迭代快、成本低、产出高,其经验值得我国星座工程借鉴。根据我国国情和不同机构的运行特点,高等院校主攻科学目标与方法、企业快速迭代制造、政府统筹的协同模式,实现强强联合,优势互补不失为一种很好的解决方案。

3)评价改革与资源协同。对承担国家重大任务的平台实行分类评价,推行揭榜挂帅制,落实科技部关于破除科技评价中“唯论文”“唯帽子”等不良导向有关措施的要求[67]。与此同时,为了充分释放科研人员活力和海量数据效能,应大力推动建立空天信息开放共享的数据与模型平台,充分发挥每颗卫星和每份档案数据的价值。

5　结　语

对高水平研究型大学的优势学科而言,建设国家战略科技力量的关键在于找准主攻方向。好的主攻方向需同时满足3个条件:一是国家存在紧迫、重大的战略需求;二是学科既有优势可支撑快速转化为能力,服务国家意志;三是该方向处于技术范式转换的窗口期。对测绘学科而言,星地空天信息智能协同与计算是同时满足这3个条件的主攻方向。本文回顾了武汉大学测绘学科70年来以服务国家为使命的艰苦创业历程与学科转型实践,分析了空天信息的战略地位与全球竞争焦点向星地协同能力的转移,提出了星地空天信息智能协同与计算的概念架构与关键科学问题。从“天感地算”到星地协同的范式变革,是突破我国遥感卫星传输、处理、应用瓶颈、抢占全域空天信息战略制高点的关键途径。以空天信息为主攻方向推进人才培养与科研管理改革,是测绘学科建设国家战略科技力量、服务

国家使命的必然选择。

面向未来,建议按近期可落地原则推进3项行动:(1)依托开放共享的科学试验卫星平台与合作伙伴星座,组织开展在轨智能载荷联合试验,围绕星上检测、目标数据下传、星间数据分发等典型场景形成标准化试验流程与开源数据集,以真实在轨数据反哺理论与关键技术攻关;(2)在测绘科学与技术一级学科下试点建设交叉学科方向,推进空天信息科学与技术本科专业建设,在人才培养体系建设中加强星载智能计算、卫星系统设计与空天组网通信等交叉领域的工作力度;(3)联合优势科研院所与商业航天企业组建星地协同空天信息创新联合体,共同开展前沿探索与应用落地。

参 考 文 献

[1] 李建成,陈俊勇,宁津生,等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
LI Jiancheng, CHEN Junyong, NING Jinsheng, et al. Approximation Theory of Earth Gravity Field and Determination of China 2000 Quasi-Geoid[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.

[2] 宁津生. 测绘学概论[M]. 2版. 武汉:武汉大学出版社,2008.
NING Jinsheng. Introduction to Geomatics[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.

[3] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2007.
WANG Zhizhuo. Photogrammetry Principle[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.

[4] 张祖勋,段延松,张永军,等. 数字摄影测量学[M]. 3版. 武汉:武汉大学出版社,2023.
ZHANG Zuxun, DUAN Yansong, ZHANG Yongjun, et al. Digital Photogrammetry[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2023.

[5] 张剑清,柯涛,孙明伟,等. 并行计算在航空摄影测量中的应用与实现:数字摄影测量网格(DPGrid)并行计算技术研究[J]. 测绘通报,2008(12):11-14.
ZHANG Jianqing, KE Tao, SUN Mingwei, et al. Application and Realization of Parallel Computation in Aerophotogrammetry[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008(12): 11-14.

[6] 刘经南,刘晖,邹蓉,等. 建立全国CORS更新国家地心动态参考框架的几点思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2009,34(11):1261-1265.
LIU Jingnan, LIU Hui, ZOU Rong, et al. Some Thoughts on the Establishment of Nationwide Continuously Operating Reference Stations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1261-1265.

[7] 龚健雅. 地理信息系统基础[M]. 北京:科学出版社,2001.
GONG Jianya. Fundamentals of Geographic Information System[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[8] STOCK M, DAVIS R, DE MIRANDÉS E, et al. The Revision of the SI—The Result of Three Decades of Progress in Metrology[J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 022001.

[9] SNADDEN M, MCGUIRK J, BOUYER P, et al. Measurement of the Earth's Gravity Gradient with an Atom Interferometer-Based Gravity Gradiometer[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(5): 971-974.

[10] FIXLER J B, FOSTER G T, MCGUIRK J M, et al. Atom Interferometer Measurement of the Newtonian Constant of Gravity[J]. *Science*, 2007, 315(5808): 74-77.

[11] CHEINEY P, FOUCHÉ L, TEMPLIER S, et al. Navigation-Compatible Hybrid Quantum Accelerometer Using a Kalman Filter[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 034030.

[12] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 Navigation Satellite System[J]. *NAVIGATION*, 2019, 66(1): 7-18.

[13] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic Performance and Future Developments of BeiDou Global Navigation Satellite System[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1.

[14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)[R/OL]. 2019-12-27. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/201912/t20191227_19833.html.
China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Development Report (Version 4.0)[R/OL]. 2019-12-27. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/201912/t20191227_19833.html.

[15] BÜRGMANN R, ROSEN P A, FIELDING E J. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 169-209.

[16] BELWARD A S, SKØIEN J O. Who Launched What, When and Why; Trends in Global Land-Cover Observation Capacity from Civilian Earth Observation Satellites[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103: 115-128.

[17] 于登云,汪路元,张园园,等. 人工智能赋能航天

器应用研究现状与展望[J]. 中国科学：信息科学，2025，55(10)：2524-2541.
YU Dengyun，WANG Luyuan，ZHANG Yuanyuan，et al. AI-Enabled Spacecraft Applications：Current Research and Future Prospects[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*，2025，55(10)：2524-2541.

[18] ZHANG B，WU Y F，ZHAO B Y，et al. Progress and Challenges in Intelligent Remote Sensing Satellite Systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*，2022，15：1814-1822.

[19] WANG S G，LI Q. Satellite Computing：Vision and Challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*，2023，10(24)：22514-22529.

[20] 龚健雅. 人工智能时代测绘遥感技术的发展机遇与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2018，43(12)：1788-1796.
GONG Jianya. Chances and Challenges for Development of Surveying and Remote Sensing in the Age of Artificial Intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2018，43(12)：1788-1796.

[21] HONG D F，ZHANG B，LI X Y，et al. SpectralGPT：Spectral Remote Sensing Foundation Model[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*，2024，46(8)：5227-5244.

[22] GUO X，LAO J W，DANG B，et al. SkySense：A Multi-modal Remote Sensing Foundation Model Towards Universal Interpretation for Earth Observation Imagery[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)，Seattle，WA，USA，2024.

[23] LU S Q，GUO J L，ZIMMER-DAUPHINEE J R，et al. Vision Foundation Models in Remote Sensing：A Survey[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*，2025，13(3)：190-215.

[24] SODNIK Z，FURCH B，LUTZ H. Optical Intersatellite Communication[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*，2010，16(5)：1051-1057.

[25] IVANOV H，MEJRI S，DI MIRA A，et al. Review of Deep Space Optical Communications[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*，2025，43(3)：193-209.

[26] LI R，LIN B J，LIU Y C，et al. A Survey on Laser Space Network：Terminals，Links，and Architectures[J]. *IEEE Access*，2022，10：34815-34834.

[27] 李锐，林宝军，刘迎春，等. 激光星间链路发展综述：现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程，2023，52(3)：20220393.
LI Rui，LIN Baojun，LIU Yingchun，et al. Review on Laser Intersatellite Link：Current Status，Trends，and Prospects[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2023，52(3)：20220393.

[28] 王桥，张正，唐娉. 突发性地表异常即时遥感探测机制研究[J]. 遥感学报，2025，29(6)：1347-1364.
WANG Qiao，ZHANG Zheng，TANG Ping. Mechanism on Immediate Remote Sensing Detection of Abrupt Earth's Surface Anomalies[J]. *National Remote Sensing Bulletin*，2025，29(6)：1347-1364.

[29] WANG H，SMITH J，GARAFOLA C L. Chinese Military Views of Low Earth Orbit：Proliferation，Starlink，and Desired Countermeasures[R/OL]. 2025-03-24. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA3139-1.html.

[30] JACOBSEN J T，LIEBETRAU T. Infrastructuring Public-Private Relations：Big Tech，the Ukraine War and Implications to Security Governance[J]. *European Journal of International Relations*，2026，32(1)：183-208.

[31] U. S. Department of Defense. 2024 Commercial Space Integration Strategy[R]. Washington D C：U. S. Department of Defense，2024.

[32] 常钦. 40个智慧城市时空大数据平台建成[N]. 人民日报，2023-05-18(4).
CHANG Qin. Forty Smart-City Spatiotemporal Big Data Platforms Completed[N]. People's Daily，2023-05-18(4).

[33] 王者. 立体“城市地图”助力智慧管理[N]. 人民日报，2025-05-27(13).
WANG Zhe. 3D “City Map” Facilitates Smart Management[N]. People's Daily，2025-05-27(13).

[34] LI Y J，CHEN S P，HWANG K，et al. Spatio-temporal Data Fusion Techniques for Modeling Digital Twin City[J]. *Geo-spatial Information Science*，2025，28(2)：541-564.

[35] GORELICK N，HANCHER M，DIXON M，et al. Google Earth Engine：Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*，2017，202：18-27.

[36] 许强，董秀军，李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2019，44(7)：957-966.
XU Qiang，DONG Xiujun，LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection，Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2019，44(7)：957-966.

[37] XU X W，ZHANG X L，WEI S J，et al. Deep

Learning for Ship Detection in SAR Images: A Comprehensive Review [J]. *Ocean Engineering*, 2026, 355: 125045.

[38] GOUDEMANT T, FRANCESCONI B, AUBRUN M, et al. Onboard Anomaly Detection for Marine Environmental Protection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 7918-7931.

[39] 国务院新闻办公室. 2021中国的航天[M]. 北京: 人民出版社,2022.
State Council Information Office of the PRC. China's Space Program: A 2021 Perspective[M]. Beijing: People's Publishing House, 2022.

[40] YANG C, ZHAO H S, BRUZZONE L, et al. Lunar Impact Crater Identification and Age Estimation with Chang'E Data by Deep and Transfer Learning [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 6358.

[41] RICO D. Project Convergence: Revolutionizing Targeting in Large-Scale Combat Operations [J/OL]. *Field Artillery Professional Bulletin*, 2025-09-03. https://www.dvidshub.net/publication/issues/75175.

[42] World Economic Forum. Space: The $1.8 Trillion Opportunity for Global Economic Growth [R/OL]. 2024-09-25. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Space_2024.pdf.

[43] 李君强. 推进商业航天高质量安全发展[N]. 人民日报, 2025-11-27(11).
LI Junqiang. Advancing the High-Quality and Safe Development of Commercial Space [N]. People's Daily, 2025-11-27(11).

[44] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[Z/OL]. 2021-03-11. https://zhs.mofcom.gov.cn/cms_files/oldfile//zhs/202107/20210715110152880.pdf.
Outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives Through the Year 2035 [Z/OL]. 2021-03-11. https://zhs.mofcom.gov.cn/cms_files/oldfile//zhs/202107/20210715110152880.pdf.

[45] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[Z/OL]. 2026-03-13. https://www.ccps.gov.cn/zl/jj2026qglh/202603/t20260316_170359.html.
Outline of the 15th Five-Year Plan for National Economic and Social Development[Z/OL]. 2026-03-13. https://www.ccps.gov.cn/zl/jj2026qglh/202603/t20260316_170359.html.

[46] GIUFFRIDA G, FANUCCI L, MEONI G, et al. The Φ-Sat-1 Mission: The First On-Board Deep Neural Network Demonstrator for Satellite Earth Observation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5517414.

[47] RAZZANO F, DI STASIO P, MAURO F, et al. AI Techniques for Near Real-Time Monitoring of Contaminants in Coastal Waters on Board Future -Sat-2 Mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 16755-16766.

[48] GUERRISI G, DEL FRATE F, SCHIAVON G. Artificial Intelligence Based On-Board Image Compression for the Φ-Sat-2 Mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 8063-8075.

[49] MEONI G, MÄRTENS M, DERKSEN D, et al. The OPS-SAT Case: A Data-Centric Competition for Onboard Satellite Image Classification[J]. *Astrodynamics*, 2024, 8(4): 507-528.

[50] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite Mobile Edge Computing: Improving QoS of High-Speed Satellite-Terrestrial Networks Using Edge Computing Techniques[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 70-76.

[51] DIANA L, DINI P. Review on Hardware Devices and Software Techniques Enabling Neural Network Inference Onboard Satellites[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(21): 3957.

[52] BISWAS A, SRINIVASAN M, ANDREWS K S, et al. Overview of the Deep Space Optical Communications (DSOC) Technology Demonstration[C]// Free-Space Laser Communications XXXVII, San Francisco, California, USA, 2025.

[53] RAZMI N, MATTHIESEN B, DEKORSY A, et al. On-Board Federated Learning for Satellite Clusters with Inter-Satellite Links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(6): 3408-3424.

[54] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A Survey on Nongeostationary Satellite Systems: The Communication Perspective [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(1): 101-132.

[55] European Commission. IRIS²: Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite [R/OL]. 2026-09-29. https://defence-industry-space.ec.europa.eu/eu-space-policy/iris2-infrastructure-resilience-interconnectivity-and-security-satellite_en.

[56] 李建成. 时空基准:全球竞相布局的重大基础设施

[N]. 学习时报,2024-08-21(6).
LI Jiancheng. Spatiotemporal Datum: Major Infrastructure in the Global Competitive Layout [N]. Study Times, 2024-08-21(6).

[57] 李建成. 最新中国陆地数字高程基准模型:重力似大地水准面 CNGG2011[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 651-660.
LI Jiancheng. The Recent Chinese Terrestrial Digital Height Datum Model: Gravimetric Quasi-Geoid CNGG2011[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 651-660.

[58] XU J, LUO J H, CAO X B, et al. Cooperative Task Scheduling and Resource Allocation of Embodied Multi-satellite Systems: AI-Driven Perspective[J]. *Science China Technological Sciences*, 2026, 69(1): 1100301.

[59] LIANG Y P, CHEN Q M, JIANG H. Joint Resource Optimization for Federated Edge Learning with Integrated Sensing, Communication, and Computation [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(5): 5274-5288.

[60] ZHOU J X, CHEN J, CHEN X H, et al. Sensitivity of Six Typical Spatiotemporal Fusion Methods to Different Influential Factors: A Comparative Study for a Normalized Difference Vegetation Index Time Series Reconstruction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112130.

[61] YUE P Y, AN J P, ZHANG J K, et al. Low Earth Orbit Satellite Security and Reliability: Issues, Solutions, and the Road Ahead[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(3): 1604-1652.

[62] 教育部高等学校测绘类专业教学指导委员会. 普通高等学校本科专业类教学质量国家标准(测绘类等专业)[S]. 北京:高等教育出版社,2018.
Teaching Guidance Committee for Surveying and Mapping Programs, Ministry of Education. National Quality Standards for Undergraduate Programs (Surveying and Mapping)[S]. Beijing: Higher Education Press, 2018.

[63] FRAZIER A E, NELSON T, KEDRON P, et al. Rethinking GIScience Education in an Age of Disruptions[J]. *Transactions in GIS*, 2025, 29(2): e70048.

[64] 中华人民共和国教育部. 关于加强高校有组织科研推动高水平自立自强的若干意见[Z/OL]. 2022-08-29. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/s5987/202208/t20220829_656091.html.
Ministry of Education of the People's Republic of China. Opinions on Strengthening Organized Scientific Research in Universities to Promote High-Level Self-Reliance [Z/OL]. 2022-08-29. http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/s5987/202208/t20220829_656091.html.

[65] 刘波,杨孟飞,李明,等. 面向空天算力网络的卫星计算技术发展路径研究[J]. 宇航学报,2025,46(12):1421-1434.
LIU Bo, YANG Mengfei, LI Ming, et al. Research on Development Path of Satellite Computing Technology for Space Computing Power Network [J]. *Journal of Astronautics*, 2025, 46(12): 1421-1434.

[66] ZHAO J, WEI D, NAN L, et al. An Open and Intelligent Software Stack for Next-Generation Smart Satellites[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, 39(1): 24-36.

[67] 中华人民共和国科技部. 关于破除科技评价中"唯论文"不良导向的若干措施(试行)[Z/OL]. 2020-02-17. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2020/202002/W020200716318617342543.pdf 2020.
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China.. Measures for Eliminating the Negative Orientation of "Paper-Only" in Science and Technology Evaluation (forTrialImplementation)[Z/OL]. 2020-02-17. https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2020/202002/W020200716318617342543.pdf 2020.