

# 巨星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考

康利鸿, 田菁, 江碧涛

北京市遥感信息研究所, 北京 100192

**摘要:** 从20世纪70年代以来, 中国遥感卫星系统经历了模拟式时代到数字式时代的发展, 建成了稳定运行的遥感卫星系统及相应的应用体系, 当前正在向智能化、网络化的遥感巨星座时代迈进。为了更好地推动国家遥感卫星事业发展, 有必要站在当前历史发展的机遇期, 详细梳理其面临的技术挑战, 确定未来技术攻关方向, 为中国遥感卫星巨星座时代的到来预置技术、做好准备。本文通过总结回顾中国遥感卫星系统的发展历程和建设成就, 从应用系统建设的角度分析了遥感卫星走向巨星座时代面临的技术挑战, 特别是海量数据处理技术和大规模星群控制技术的挑战, 分析了完全依靠星上智能处理存在的问题, 提出了地面支持下的星上智能处理模式, 在分析目前星上自主任务规划能力现状基础上, 提出了基于数字孪生的星地一体智能任务管理和分布式智能协同模式。最后梳理了智能遥感巨星座1.0到3.0共3个阶段的发展路线及需要关注的关键技术, 为国内遥感领域应用技术研究提供借鉴。

**关键词:** 遥感巨星座, 发展历程, 智能化, 网络化, 应用技术, 星群控制, 数据处理, 发展规划

**中图分类号:** TP236/P2

**引用格式:** 康利鸿, 田菁, 江碧涛. 2024. 巨星座时代遥感卫星应用技术挑战与思考. 遥感学报, 28(7): 1658-1666

Kang L H, Tian J and Jiang B T. 2024. Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the Giant Constellation Era. National Remote Sensing Bulletin, 28(7): 1658-1666 [DOI: 10.11834/jrs.20233248]

## 1 引言

遥感卫星是国家空间基础设施的重要组成部分, 在有力掌控信息资源主导权, 及时把握全球经济、资源、环境、社会发展态势等方面具有重要意义 (江碧涛, 2022; 赵文波等, 2021)。自20世纪70年代以来, 中国遥感卫星经历了从无到有、从小到大的发展过程, 在维护国家发展利益、支援国民经济建设、减灾救灾等方面发挥了重要的作用。

近年来, 随着卫星集成制造技术、新型传感器技术、低成本发射技术、空间通信技术、集成电路技术以及信息处理技术的快速进步, 对地探测系统性能不断提升、新型探测手段不断涌现, 卫星集成度和技术先进性不断提高。当前, 世界各国遥感卫星领域正进入加速升级换代以及稳定补网加强阶段, 即将步入以智能化、网络化为主要特征的巨型星座时代。

本文通过总结回顾中国遥感卫星系统的发展历程, 详细剖析了遥感卫星走向巨星座时代面临的应用技术挑战, 包括海量遥感数据处理和遥感巨星座复杂任务控制面临的技术挑战, 提出了发展思路, 以期为国内遥感卫星应用技术研究提供参考。

## 2 中国遥感卫星系统发展历程

### 2.1 模拟技术时代

1975年11月26日, 中国自行研制的第1颗返回式对地观测卫星成功发射 (江碧涛, 2022), 11月29日, 卫星在轨按计划运行3天、完成绕地球47圈任务后, 胶片舱成功返回地面。地面系统根据计划拍摄区域, 预先设置好相机开机时间和成像参数。卫星采用胶片型棱镜扫描全景相机, 按照计划完成拍摄任务记录在胶片上。地面主要处理设备为胶片光化设备, 胶片舱返回地面后, 地面系统完成药液制备、暗盒开启、导片、接片、

收稿日期: 2023-06-30; 预印本: 2023-08-27

第一作者简介: 康利鸿, 研究方向为遥感卫星应用研究和工程实践。E-mail: gregrs@126.com

通信作者简介: 田菁, 研究方向为卫星信息智能处理与应用技术。E-mail: tianjing97@sina.com

试冲、机冲、原底片拷贝、正像洗印等处理, 获得了第1批卫星对地摄影图片, 用于国土资源普查, 开创了中国航天遥感事业的先河。

该阶段, 星上成像和地面处理主要采用模拟技术, 星上用胶片记录图像信息, 地面用光化设备冲洗和处理。

在此基础上, 返回式遥感卫星不断进行技术升级, 1985年和1986年又发射了两颗国土资源普查卫星(江碧涛, 2022), 利用胶片感应成像获取黑白全色胶片和假彩色红外翻转胶片约4000 m, 中国遥感卫星逐步进入工程应用阶段, 为国土普查、资源勘测、铁路选线等国民经济领域提供了大量卫星遥感数据源。

## 2.2 数字技术时代

进入21世纪以来, 随着世界航天技术的蓬勃发展, 中国遥感卫星整体技术水平明显提高, 实现了探测信息记录数字化、数据传输数字化和地面处理数字化, 按照卫星规模, 可以分为单星阶段、多星阶段和星座阶段。

### 2.2.1 单星阶段

1999年10月, 中巴合作研制的“资源一号”卫星成功发射(徐文, 2011; 江碧涛, 2022), 星上采用5谱段CCD相机、4谱段红外多光谱扫描仪、2谱段宽视场成像仪, 用CCD器件取代了传统的胶片记录方式, 将数据存储在星上存储系统, 卫星过境时通过星地数据传输链路将数据传输至地面接收站, 地面处理系统对原始数据进行几何、辐射等校正处理后得到标准遥感数据产品。

自此, 中国遥感卫星实现了从返回式向传输型的跨越, 遥感卫星技术也随之进入了数字技术时代。

国家在密云、喀什、三亚等地建成了遥感卫星数据接收站网(李安等, 2021), 统筹建设对地观测卫星地面数据处理系统, 提升了数据集中处理、存档、分发和服务能力, 逐步建立了稳定运行的遥感卫星系统及相应的遥感卫星应用体系。先后成立中国资源卫星应用中心、国家卫星海洋应用中心等, 极大带动了遥感卫星在资源、气象、海洋等各行业领域的应用。

### 2.2.2 多星阶段

2010年之后, 随着高分辨率对地观测系统重

大专项(高分专项)、《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》等的全面实施(廖小罕, 2021; 赵坚等, 2022; 孙伟伟等, 2020; 童旭东, 2016), 中国遥感卫星技术突飞猛进, 探测手段不断丰富、探测指标不断提升, 逐步实现了由单一光学传感器向多类传感器、由单星向多星联合运用的转变, 资源系列、高分系列遥感卫星先后发射, 覆盖了全色、多光谱到高光谱, 从光学到雷达多种手段, 实现了多星联合和协作对地观测。

与此同时, 遥感卫星应用技术也随之快速发展, 国内系统性开展了多星多任务分配、遥感卫星数据精细处理、多源卫星数据融合处理、遥感卫星数据量化反演等关键技术研究, 遥感卫星数据接收、处理、分发、定标场等地面应用设施进一步完善、应用服务水平进一步提升(王冰冰等, 2021)。

### 2.2.3 星座阶段

随着卫星性能提高和运载技术发展, 遥感星座进一步向轻小型卫星组网模式发展, 紧跟国外商业遥感星座部署运行, 国内商业遥感卫星星座也迅速发展。长光卫星技术有限公司部署了吉林一号光学遥感卫星星座, 截至目前共有30颗卫星在轨运行, 预计2023年底, 可完成138颗卫星部署, 具备全球任意地点10 min内重访能力; 中国四维测绘技术有限公司于2016年开始部署高景一号卫星星座, 目前已完成第一阶段的4颗光学小卫星发射; 二十一世纪空间技术应用股份有限公司先后发射了北京二号、北京三号星座。2023年3月, 航天宏图信息技术股份有限公司的“女娲”星座首颗4星也成功发射入轨, 该星座计划包括44颗雷达卫星和10颗光学卫星。

根据组网卫星之间是否存在星间通信, 遥感卫星星座可以分为松耦合遥感星座和紧耦合遥感星座。松耦合遥感星座卫星之间不直接进行通信, 主要通过合理任务安排进行分工合作观测、获取信息。紧耦合遥感星座卫星之间可利用星间链路进行通信, 并基于星上自动处理结果和自主任务规划实现多星之间的观测任务协同。

目前在轨的遥感卫星星座, 主要是利用轨道设计和多类载荷配置实现协同观测, 星上处理、星间通信、自主协同等能力还属于起步和验证阶段。

### 2.3 发展历程总结

回顾 50 多年来的发展历程, 中国遥感卫星体系取得了长足发展, 走出了一条自主创新、跨越发展道路。

一是能力水平由追赶先进向开拓创新发展。截止到 2022 年底, 中国在轨遥感卫星共计 200 余颗, 实现了 16 m 分辨率卫星数据 1 d 全球覆盖, 光学 2 m 分辨率数据全球 1 d 重访, 1 m 分辨率合成孔径雷达卫星对全球任意地区重访时间为 5 h, 高分系列卫星与同期在轨的美国 WorldView、欧洲“哨兵”等系列卫星水平比肩, 最高分辨率达到相近的 0.5 m, 高分四号是世界上最高分辨率 (50 m) 的静止轨道遥感卫星, 高分三号卫星实现了 1 m 分辨率 C 波段 SAR 成像, 是世界上成像模式最多的 SAR 卫星。中国遥感卫星研制、工程系统总体、卫星公用平台、有效载荷、应用与服务、运行管理等关键技术已步入国际先进行列 (赵坚等, 2022)。

二是核心技术由合作引进向自主可控发展, 探测、传输、处理、应用技术等环节核心技术立足自力更生发展, 国产化水平不断提高。卫星遥感数据已基本摆脱对国外卫星的依赖, 国产高分辨率卫星数据替代比率已近 90%。探测技术不断向高性能、大规模发展, 打破了早期主要依靠进口的局面, 具备自主研发超大口径 SiC 反射镜、InGaAs 探测器的能力; 数据传输技术不断向高通量、大带宽发展, 形成成套的 X、Ka 频段星地数传产品, 正在加速发展星间激光通信技术; 遥感信息处理技术向一体化、网云化持续发展, 高分辨率精细成像、星上处理、智能解译等技术水平持续提升; 应用技术不断向精细化、量化发展, 建设了全球首个碳通量数据集, 生态环境遥感监测、农情通报遥感数据应用能力不断提高。

三是服务模式由试验试用向业务化应用服务发展, 服务战略向大众应用拓展。随着遥感卫星系统从机会探测逐渐发展到昼夜持续观测, 响应时效性从原来的天级响应提高到目前的小时级。在多个应用部门的支撑下, 遥感卫星数据服务模式不断完善, 在国家安全、国土普查、环境保护、应急减灾、气象海洋等应用领域提供稳定业务化服务。

四是发展机制由政府投资向多元投入发展。

政府投入支持持续发展, 多元投入促进商业卫星快速发展, 融合成效显著。遥感卫星产业市场规模持续增长, 如图 1 所示, 2022 年中国卫星遥感市场规模高达 130.8 亿元 (数据来自智研咨询发布的《2022—2028 年中国商业遥感卫星行业市场全景调查及投资前景预测报告》)。研制主体和运营主体呈现多元化, 涵盖了国家部委、省市政府、科研院所、高校、民商企业, 卫星设备制造、发射、运用、应用实现了全链条市场化。

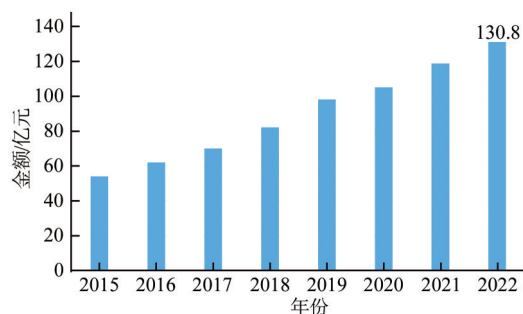


图 1 2015 年—2022 年中国卫星遥感市场规模 (单位: 亿元)

Fig. 1 The market size of China's remote sensing satellite from 2015 to 2022

### 3 遥感星座应用技术挑战分析

随着卫星制造技术和发射技术的快速发展, 遥感星座规模从百余颗向 1000 余颗扩大, 大量卫星组网构建巨型星座已成为国内外天基系统建设的重要发展趋势。美国 SpaceX 公司“星链”计划目前已发射入轨近 4000 颗卫星, 计划 2027 年前将达到 42000 颗卫星, 其可见的社会、经济和国防效益, 促进世界各国竞相发展巨型星座, 同时也引发了对地观测领域新一轮的格局重塑。全球最大的商业遥感卫星公司行星公司 (Planet) 在持续扩展星座规模的基础上, 加紧研发新一代卫星系统, 在目前在轨运行 200 多颗分辨率 3 m 的“鸽群” (Flock) 卫星和 21 颗分辨率 0.5 m 的“天空卫星” (SkySat) 基础上, 2023 年开始部署下一代“鹈鹕” (Pelican) 卫星星座, 由 32 颗卫星组成, 将实现每日提供至少 10 幅陆地观测图以及 30 个中纬度地区的图像, 分辨率提高到 0.3 m。近年来国内国营、民营遥感卫星厂商也持续加大星座建设, 加快部署对地观测卫星星座, 未来十年内可查的商用遥感卫星计划在 2449 颗以上, 中国遥感卫星数量有望提升一个数量级。

网络化和智能化是巨星座的典型特征。网络化的主要特征是“星星联通、星地联通、全网联通”，一点接入、全网皆知，卫星可随时随地通过卫星之间联网将数据及时回传地面；智能化的主要特征是“自主感知、智能处理、主动服务”，实现卫星在轨全智能化的处理和任务规划操作，减轻地面处理压力，专注于应用服务。网络化和智能化的实现并非一蹴而就，需要详细梳理其面临的技术挑战，确定未来技术攻关方向，为中国遥感卫星巨星座时代的到来预置技术、做好准备。

### 3.1 海量卫星遥感数据处理技术

遥感数据处理是遥感卫星发挥效益的基础。随着遥感卫星数量从百到千乃至万颗发展，获取的原始数据量也迅速增加，相较于通信、导航等卫星，遥感卫星特别是高分辨率成像卫星，获取的原始数据量非常大。以0.5 m分辨率、30 km幅宽成像卫星为例，每景图像像素数约为60000×60000，考虑图像存储4:1的压缩比，若每天成像500景，一颗卫星的原始数据量约为每天5000 G，1000颗卫星则为每天5 P，以1 Gbps星地数传速率估算，需要每天120个天线接收波束，给数据接收和传输均带来了极大的压力。

高效处理海量原始数据、获取有用信息，是遥感卫星巨星座必须考虑的关键技术难题，应对该难题的一种技术途径是将数据处理环节前置，在星上完成遥感卫星数据处理、无效数据剔除和目标检测识别等任务，降低原始数据下传的压力。本文重点讨论了在轨数据预处理方法和在轨数据智能信息提取方法，分析了完全星上处理存在的问题，提出了地面支持下的星上处理模式。

#### 3.1.1 在轨数据预处理

在轨数据预处理主要是在星上有限计算资源条件下，实现遥感卫星传感器原始探测数据的高精度误差补偿、辐射校正和几何校正等快速处理，确保数据反映地物场景的真实物理量，为地物信息提取奠定基础。

对于高分辨率光学遥感卫星，需要重点关注全色和多光谱遥感影像在轨精密定姿、几何定标、辐射校正以及自动云量检测（王密和仵倩玉，2022；谭凯等，2016）等技术难题。对于SAR卫

星，需要重点解决滑动聚束、条带、扫描等多种成像模式的实时高速成像处理和辐射校正技术，以及斜视成像、干涉测量以及运动目标重聚焦等技术难题。

#### 3.1.2 在轨智能解译

在轨智能解译主要基于预处理的遥感数据，提取用户关注的地物信息，如机场飞机和海面船只的检测识别、变化检测等。

近年来，基于深度学习技术的遥感图像解译技术快速发展（龚健雅和钟燕飞，2016；付琨等，2023），国内外也开展了大量的基于深度学习的在轨智能解译方法研究并逐步走向工程应用（王密和杨芳，2019；李宗凌等，2021；李德仁等，2021），但是从当前技术现状看，星上算力有限（约为地面1/100）、处理算法精度也相对有限。以海上舰船检测识别为例，当前星上处理的检测率约为90%左右，尚不能做到完全满足应用需要。对一些复杂任务场景，如地震灾害等复杂场景智能处理、暗弱特征目标的智能检测等问题仍尚未完全解决。

星上智能处理是遥感卫星巨星座实现的重要途径，但是完全依托星上智能处理，不下传原始数据，现阶段尚不可行。一是星上目标智能检测识别的结果缺乏真值校验。目前在地面处理系统中，由于遥感图像的智能解译算法精度有限，其处理结果必须要经过经验丰富的判图人员在根据原始数据生产的标准图像产品进行确认。在没有原始数据的情况下，判图人员无法判断星上智能检测识别的切片数据是否存在遗漏。二是缺少真实样本导致星上处理算法无法持续优化。目前以深度学习为主的智能解译算法还需要大量的样本数据进行训练优化，遥感数据的样本特别是专业性的应用样本需要经验丰富的专家在图像上进行标注生成，星上原始数据不下传，将导致难以采集真实样本，进而使得星上处理算法无法增强学习和优化改进。

#### 3.1.3 地面支持下的在轨智能解译

因此，在将来一段时间内，星上处理无法完全取代原始数据下传，应是地面系统后台支持下的星上处理，如图2所示。星上对原始数据进行预

处理、目标检测识别,结果直接分发用户。同时,星上原始数据也要下传地面处理系统,地面系统行业专家依据原始数据得到的标准产品对星上处理结果进行监督评估评估其性能,并持续更新样本库,对星上智能处理模型进行增强训练优化改进,定期生成升级的轻量化模型,通过在轨上注的方式更新星上处理模型,实现在轨处理能力的不断提升。

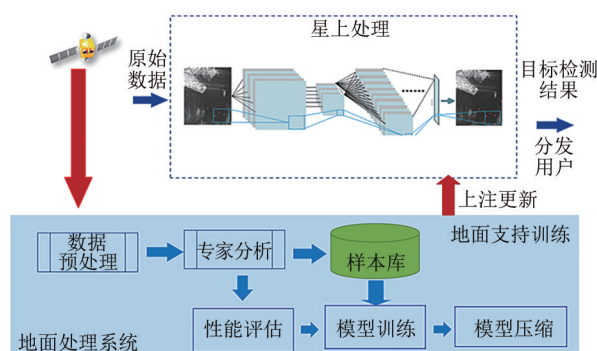


图2 地面系统支持下的在轨智能解译模式

Fig. 2 Space born information intelligent processing mode supported by ground systems

在这种处理模式中,需要重点解决的是原始数据抽样下传策略问题,研究如何通过采用延迟回传、随机抽样、动态抽样等策略,在降低原始数据下传需求量的同时,满足支持星上处理优化能力的需要。

在此基础上,瞄准未来完全智能化的遥感卫星星座,需要国内学者研究解决面向遥感卫星数据智能处理的在轨持续学习理论与方法,逐步摆脱对地面系统的依赖,完全依靠卫星无监督持续自学习、知识积累,实现在轨智能处理、地面抽样监督。

综上,在应对海量遥感卫星数据处理问题上,值得关注的技术包括但不限于:遥感卫星数据在轨高精度高效预处理技术、场景自适应智能数据超大压缩比无损压缩与高效恢复技术,基于随机抽样数据的遥感智能解译算法评测与性能优化技术,面向遥感卫星数据智能处理的在轨无监督持续自学习理论与方法等。

### 3.2 遥感星座复杂任务管理控制技术

遥感卫星任务管理控制主要是把来自多个用户的观测需求,根据不同卫星使用约束和轨道,

进行任务安排,生成卫星可执行指令的过程。在多数卫星的情况下,其核心是解决在多种约束条件下,如何对多颗卫星资源进行有效的分配和调度,最大限度的满足多个用户观测需求、实现综合效益最大的问题。随着中国遥感卫星从单星到多星发展,卫星任务控制也经历了从“预先计划”、“精细管控”到“需求驱动”的发展。

当前,中国遥感卫星的任务控制主要还是采用地面集中任务控制的模式,由地面管控系统根据所有用户的观测需求、卫星的过境时间、数据传输能力,集中制定每颗卫星的观测计划和数据传输计划,生成卫星控制指令,通过测控链路上注卫星执行。地面集中任务控制的主要问题是星地交互复杂、响应速度慢,在应急救援等突发任务时,不能及时响应。

在遥感星座情况下,传统集中式的任务管理面临两方面技术难题:一是随着卫星数量增加,问题复杂度急剧增加,求解空间呈指数型爆炸增长,给星群任务规划求解带来极大挑战;二是随着各类遥感用户增加、需求更加多样化,特别是面向应急遥感需求的动态调整频次增加,进一步加大了动态任务规划难度。三是星间网络快速变化,资源和信息同步共享难,星群资源管理和协同应用难度大。

近年来,随着卫星任务管理技术的进步,部分卫星已经具备了一定的在轨任务规划能力,可自主执行一些简单任务,如固定观测任务,在星上存储一个位置列表,卫星每次经过这些区域时,会自动计算成像参数、开机观测。或者是执行简单协同任务,如编队飞行的卫星在执行海上搜救时,前星对搜救区域进行大面积成像和数据处理后,将疑似目标信息传送给后星,后星根据该信息进一步进行高分辨率成像观测。星上自主任务规划可有效提高卫星任务响应速度、降低对测控资源的需求,但也带来自主规划任务可靠性、星地状态同步难等问题。

在一些复杂任务中,目前星上任务管理能力还是比较有限。一是复杂动态观测任务中,如抢险救灾任务中,随着地面情况动态演变,关注的重点也在动态变化、不同用户观测需求的优先级也在动态变化,星上难以实时动态调整应对时变的需求。二是复杂协同任务能力有限。协同任务

的实现是以星上数据处理为基础的, 根据星上智能处理的结果, 判断是否获得了需要的观测目标信息数据, 并自主决定下一步观测计划。在智能处理结果存在误差的情况下, 显然规划的结果也将出现偏差, 在多次连续观测的情况下, 会出现误差扩散的情况。以前面描述的海上搜救任务为例, 第1颗卫星给出的引导信息取决于其星上智能检测结果的准确性, 经过多星之间的串联传输之后, 最终误差将大到无法观测到目标如图3所示, 导致搜救任务失败。

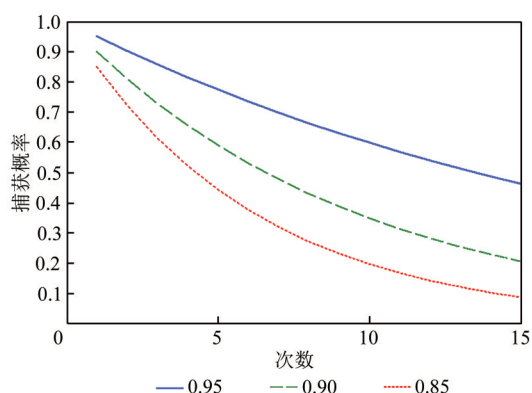


图3 多星连续观测机会随检测精度变化

Fig. 3 The opportunity for continuous multi-satellite observations varying with the detection accuracy

所以, 在一段时间内, 遥感卫星星群的任务管控需要采用简单任务星上自主、复杂任务地面控制的模式。

地面作为遥感卫星星群的控制中心, 为了有效应对复杂动态任务管理需求, 应掌握所有卫星的执行任务状态, 为此, 需要在地面建立在轨卫星的“数字镜像”, 实现对其在轨运行状态的同步推演, 以便对复杂任务的星地统筹和一体安排, 主要需要攻克基于数字孪生的星地一体智能任务管理技术。其中, 面向用户优先级相对固定的大众遥感服务, 利用分布式卫星智能自主任务规划技术, 实现星群“抢单”式任务规划, 减少对地面管控的依赖和任务指令上注数据量; 面向事件变化快、用户优先级动态调整多的复杂场景, 攻克事件驱动的大规模星座快速任务分配技术, 依托地面进行星地联合任务管理控制, 服务国家应急重大需求。对于复杂星群资源管理, 可根据卫星特点、任务能力和连接关系进行分类分组, 通

过逐层简化, 实现资源高效管理和信息同步。

综上, 在应对复杂巨星座任务管理问题上, 值得关注的技术包括但不限于: 基于数字孪生的星地一体智能任务管理技术、分布式卫星智能自主任务规划技术、事件驱动的大规模星座快速任务分配技术等。

### 3.3 复杂巨星座自组织技术

前面所述为遥感卫星向巨星座发展带来的海量数据处理和复杂任务管理控制挑战, 重在解决“量变”的问题。随着遥感卫星向大规模发展, 还应当关注复杂巨星座的“群体”效应, 或者“集体智能”的涌现, 即多个单一功能的个体通过大规模合作实现特定任务, 个体之间只进行有限的通信, 但是整体上表现出极为复杂的系统行为。

类似的情况在自然界中早已存在。如蚁群系统, 单个蚂蚁虽然行为非常简单, 但是蚁群整体可以在不同的环境下, 寻找到到达事物源的最短路径, 体现出集体智能行为。人脑系统也是类似的复杂系统, 组成人脑的简单个体主要是神经元, 大量的神经元聚集在一起使大脑能够思维和学习新事物。

从美国“星链”的发展模式可以看出, 单星小型化、低成本, 星间网络化将是遥感巨星座的重要形态, 因此, 以多个简单个体通过高效协作实现复杂功能是遥感巨星座的重要技术特征之一。因此, 在研究遥感巨星座的过程中, 还应从复杂系统的角度进行研究, 关注大量简单个体聚合后涌现的执行复杂任务的能力, 在不一定存在中央控制的情况下, 研究大量简单卫星个体如何自组织产生复杂行为模式、处理信息甚至能够进化和学习, 宏观上则体现为一种“有机巨星座”的形态, 这比研究提高单个卫星智能化程度更有价值, 是实现遥感巨星座“量变”到“质变”的飞跃。如图4所示, 其基本内涵是星群中单个简单的“细胞”卫星通过任务分工和局域网聚合实现“组织”星簇, 如感知、计算、存储、通信、控制、安全维护等, 进而各个“组织”星座进一步通过全局任务协同完成全球遥感探测任务, 如海洋航运监管、海上船只搜救、陆上应急救援等。

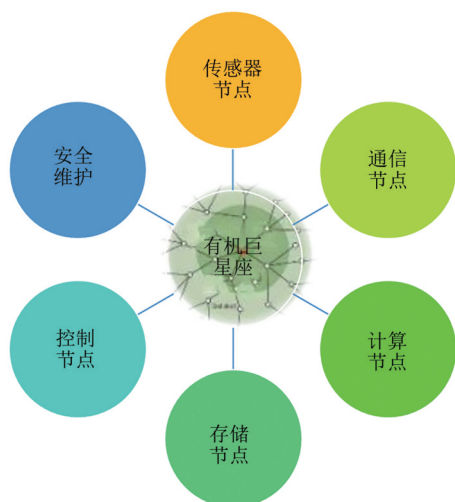


图4 有机遥感巨星座概念

Fig. 4 Organic giant remote sensing constellation concept

当前国内在该领域的研究还比较少, 值得关注的技术挑战包括星群信息共享与智能涌现技术、星群在轨自主生存技术、有机巨星座自组织技术、星间高速可靠实时信息交互技术等。

### 3.4 遥感巨星座发展阶段总结

总体来看, 当前中国尚处于星上有限处理、地面为主处理的阶段, 正在迈入星上简单控制、地面为主控制的阶段, 以星上智能处理能力提升为带动, 遥感星座向理想“有机巨星座”发展可划分为3个阶段, 如图5所示。第一阶段为智能巨星座1.0阶段, 从当前状态逐渐实现星上智能处理、地面支持优化, 地面作为星上智能处理的后台, 基于下传的原始数据支持星上处理性能的监测、评估和迭代优化, 进而实现星上智能控制、地面有限干预; 在完全实现星上自主持续学习进化后, 可发展到智能巨星座2.0阶段, 即星上自主优化、地面抽样监督, 星上实现完全可行的智能处理, 地面仅作有限的抽样监督即可, 并进一步实现星地智能进化、自主任务分配阶段。最终, 在突破星群智能涌现技术、自组织技术后, 进入智能巨星座3.0阶段, 即实现理想的有机巨星座, 实现遥感任务自组织、系统自演进能力。

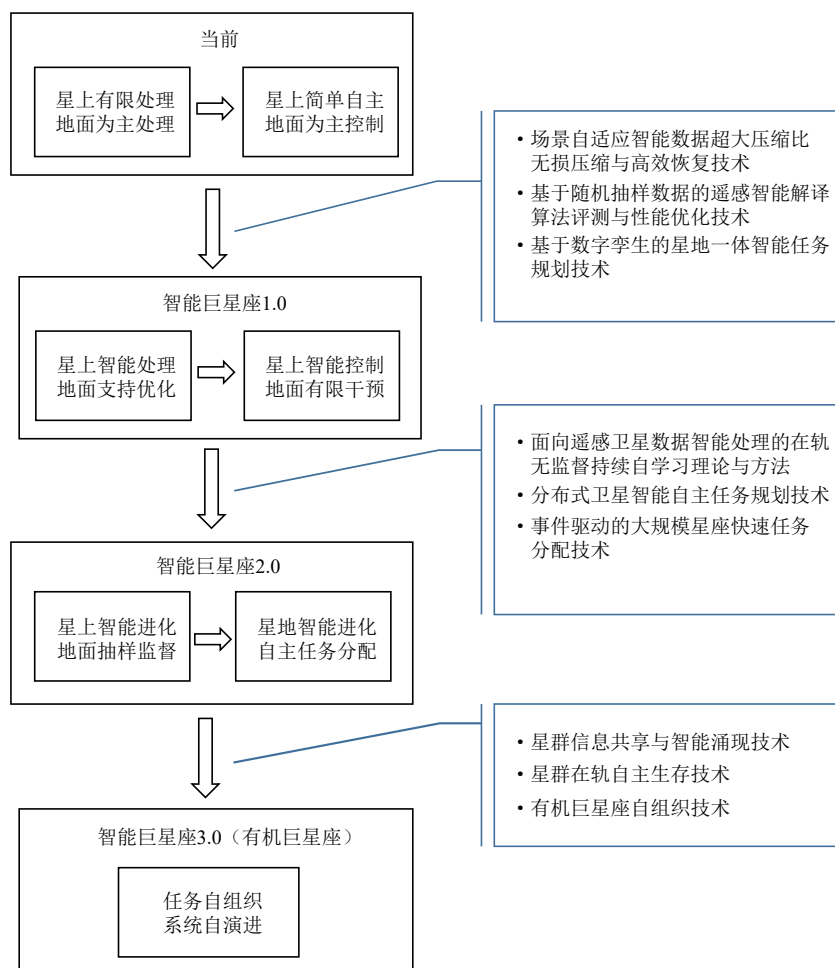


图5 智能遥感巨星座发展路线

Fig. 5 The development route of intelligent giant remote sensing constellation

从这个发展过程也可以看出, 从当前到智能巨星座 1.0、智能巨星座 2.0 初期, 都是“天上越自主、地面越复杂”的状态, 并不是卫星智能化水平提高后, 地面系统就可以少干或者不干, 恰恰相反, 天上高自主的状态需要一个更加复杂的地面应用系统支持, 比以往更加复杂, 只有在实现天上自主进化、自我演化后, 即达到智能巨星座 2.0 后期, 才可能逐渐实现去地面中心化, 达到“天上智能处理控制、地面关注重点服务”的状态。

## 4 结 语

中国遥感卫星系统经历了近五十年的发展, 取得了长足进步, 技术水平总体达到国际先进, 目前正处在由多向强的关键时期。面向以智能化、网络化为特征的巨星座时代, 我们必须紧紧抓住新阶段发展带来的机遇, 充分认清智能化遥感卫星和地面系统的技术复杂性, 厘清发展阶段, 及早开展智能遥感巨星座系统天地一体的统筹设计和技术布局。开展星间高效高可靠通信技术、基于随机抽样数据的遥感智能解译算法评测与性能优化技术、基于数字孪生的星地一体智能任务规划技术、面向遥感卫星数据智能处理的在轨无监督持续自学习理论与方法、事件驱动的大规模星座快速任务分配技术等关键技术攻关, 推动国家遥感卫星发展迈入智能化的新时代。

## 参考文献 (References)

- Fu K, Wang P J, Feng Y C, Li J X, He Q B, Xiao S N, Diao W H and Sun X. 2023. Cross-modal remote sensing intelligent interpretation: method, data, and application. *Scientia Sinica Informationis*, 53(8): 1529-1559 (付琨, 王佩瑾, 冯琪超, 李俊希, 何琪彬, 肖思宁, 刁文辉, 孙显. 2023. 遥感跨模态智能解译: 模型、数据与应用. *中国科学: 信息科学*, 53(8): 1529-1559) [DOI: 10.1360/SSI-2023-0055]
- Gong J Y and Zhong Y F. 2016. Survey of intelligent optical remote sensing image processing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 733-747 (龚健雅, 钟燕飞. 2016. 光学遥感影像智能化处理研究进展. *遥感学报*, 20(5): 733-747) [DOI: 10.11834/jrs.20166205]
- Jiang B T. 2022. The development and prospect of China's space earth observation technology. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(7): 1153-1159 (江碧涛. 2022. 中国空间对地观测技术的发展与展望. *测绘学报*, 51(7): 1153-1159) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220199]
- Li A, Huang P, Shi L, He G J, Feng X X, Wu Y W, Zhang Q, Ma G B, Feng K, Yang J and Li J S. 2021. Update of remote sensing satellite ground system of China remote sensing satellite ground station. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 251-266 (李安, 黄鹏, 石璐, 何国金, 冯旭祥, 吴业炜, 张箐, 马广彬, 冯柯, 杨进, 李景山. 2021. 中国遥感卫星地面站卫星地面系统的发展. *遥感学报*, 25(1): 251-266) [DOI: 10.11834/jrs.20210457]
- Li D R, Ding L and Shao Z F. 2021. Application-oriented real-time remote sensing service technology. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 15-24 (李德仁, 丁霖, 邵振峰. 2021. 面向实时应用的遥感服务技术. *遥感学报*, 25(1): 15-24) [DOI: 10.11834/jrs.20210260]
- Li Z L, Wang L Y, Jiang S, Wu Y H and Zhang Q J. 2021. On orbit extraction method of ship target in SAR images based on ultra-light-weight network. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(3): 765-775 (李宗凌, 汪路元, 蒋帅, 吴雨航, 张庆君. 2021. 超轻量网络的 SAR 图像舰船目标在轨提取. *遥感学报*, 25(3): 765-775) [DOI: 10.11834/jrs.20210160]
- Liao X H. 2021. Scientific and technological progress and development prospect of the earth observation in China in the past 20 years. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 267-275 (廖小罕. 2021. 中国对地观测 20 年科技进步和发展. *遥感学报*, 25(1): 267-275) [DOI: 10.11834/jrs.20211017]
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(5): 479-510 (孙伟伟, 杨刚, 陈超, 常明会, 黄可, 孟祥珍, 刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析. *遥感学报*, 24(5): 479-510) [DOI: 10.11834/jrs.20209464]
- Tan K, Zhang Y J, Tong X and Kang Y F. 2016. Automatic Cloud Detection for Chinese High Resolution Remote Sensing Satellite Imagery. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(5): 581-591 (谭凯, 张永军, 童心, 康一飞. 2016. 国产高分辨率遥感卫星影像自动云检测. *测绘学报*, 45(5): 581-591)
- Tong X D. 2016. Development of China high-resolution earth observation system. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 775-780 (童旭东. 2016. 中国高分辨率对地观测系统重大专项建设进展. *遥感学报*, 20(5): 775-780) [DOI: 10.11834/jrs.20166302]
- Wang B B, Yu W Y, Long X X, Lin J, Wang H B, Song C Y, Chen Q, Ge S L and Li S. 2021. Development of high-resolution satellite ground processing system. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1946-1963 (王冰冰, 喻文勇, 龙小祥, 林军, 王海波, 宋超宇, 陈琦, 葛曙乐, 李帅. 2021. 高分辨率卫星地面处理系统研制. *遥感学报*, 25(9): 1946-1963) [DOI: 10.11834/jrs.20210369]
- Wang M and Wu Q Y. 2022. Key problems of remote sensing images intelligent service for constellation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 1008-1016 (王密, 仵倩玉. 2022. 面向星群的遥感影像智能服务关键问题. *测绘学报*, 51(6): 1008-1016)
- Wang M and Yang F. 2019. Intelligent remote sensing satellite and remote sensing image real-time service. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(12): 1586-1594 (王密, 杨芳. 2019. 智能遥感

- 卫星与遥感影像实时服务. 测绘学报, 48(12): 1586-1594)
- Xu W. 2011. Current situation and considerations on the strategic development of China's land observation satellites. *Scientia Sinica Informationis*, 41(S): 1-9 (徐文. 2011. 中国陆地观测卫星现状及发展战略思考. 中国科学: 信息科学, 41(S): 1-9) DOI: 10.1360/zf2011-41-suppl-1]
- Zhao J, Meng L J, Wang Q, Guo D and Shen Z Q. 2022. Development of China high-resolution earth observation system. *Satellite Application*, (11): 8-13 (赵坚, 孟令杰, 王琦, 郭丁, 申志强. 2022. 中国高分辨率对地观测系统建设与发展. 卫星应用, (11): 8-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2022.11.005]
- Zhao W B, Li S, Li B, Wei Z, Hou Y K, Shen Z Q, Yan W, Yu L J, Gong R, Chen H and Qi F R. 2021. Development strategy of the new-generation effectiveness-oriented earth-observation system. *Strategic Study of CAE*, 23(6): 128-138 (赵文波, 李帅, 李博, 卫征, 侯宇葵, 申志强, 闫伟, 于龙江, 龚燃, 陈虎, 戚发轫. 2021. 新一代体系效能型对地观测体系发展战略研究. 中国工程科学, 23(6): 128-138) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.020]

## Challenges and research on remote sensing satellite application technology in the Giant Constellation Era

KANG Lihong, TIAN Jing, JIANG Bitao

*Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China*

**Abstract:** Since the 1970s, China has made remarkable achievements in the field of remote-sensing satellite systems. It is moving toward the era of intelligent and networked giant remote-sensing satellite constellations. The realization of networking and intelligence of giant remote sensing satellite constellations is not a one-off process. The development of the national remote sensing satellite industry in China hinges on the current opportunity period of historical development, careful resolution of technical challenges, direction of future technological breakthroughs, and preparations for the era of remote-sensing satellite constellation. This paper reviews the development history of China's remote-sensing satellite systems and analyzes the technical challenges faced by the development of a giant remote-sensing constellation. First, owing to the massive data processing problem in the remote-sensing constellation, this paper focuses on on-orbit data preprocessing and intelligent information extraction methods, analyzes the problems through on-board intelligent processing, and proposes an on-board processing mode supported by the ground. Second, complex problems in the management of tasks in a large constellation and the current status of on-board autonomous mission planning capabilities are analyzed, and a digital twin-based integrated intelligent mission management and distributed intelligent collaboration model is proposed. Overall, China is currently in the stage of limited intelligent processing, particularly on-board and ground-based processing, and is entering the stage at which it can perform simple mission control on board and ground-based control. Driven by advancements in intelligent processing capabilities on board, the development of remote-sensing constellation systems toward the ideal "organic giant constellation" can be divided into three stages, that is, giant remote-sensing constellation 1.0–3.0. The integrated design and technical laying out of the intelligent giant remote-sensing constellation system as a whole, combining space and ground elements, must be carried out as early as possible. Key technical research on highly efficient and reliable intersatellite communication technologies should be undertaken. Furthermore, the performance of algorithms interpreting remote sensing data based on random sample data, digital twin-based integrated intelligent mission planning technology for space and ground, on-orbit unsupervised continuous self-learning theories, methods for the intelligent processing of remote sensing satellite data, and event-driven rapid task allocation technologies for large-scale constellations should be evaluated and optimized. These efforts can promote the development of national remote-sensing satellites for a new era of intelligence.

**Key words:** giant remote sensing constellation, development history, intelligent, networked, application technology, satellite constellation mission control, data processing, development plan