

· 研究进展 ·

# “空间信息网络基础理论与关键技术” 重大研究计划结题综述

于全 王敬超\* 史云放

军事科学院 系统工程研究院, 北京 100141

**[摘要]** 本文介绍了“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划的立项背景、科学目标、总体布局和实施思路,重点阐述了该计划在“空间信息网络模型与高效组网机理”“空间动态网络高速传输理论与方法”“空间信息稀疏表征与融合处理”三个方面取得的突破性创新进展,并提出了下一步发展建议。

**[关键词]** 重大研究计划;空间信息网络;空间信息网络模型;空间信息网络高速传输理论;空间信息稀疏表征

空间信息网络是以天基平台(高、中、低轨卫星或星座)及临近空间平台(平流层飞艇或气球)等空间节点为载体,通过与地面网络的一体化互联,支持海量数据的实时采集、传输、处理和分发,实现体系化信息服务应用的网络基础设施<sup>[1]</sup>。空间信息网络技术涉及信息采集、传输、处理、存储、管理和服务等领域,其专业范畴涉及多个一级学科,包括数学、物理学、天文学、系统科学、电子科学与技术、信息与通信工程、光学工程、仪器科学与技术、测绘科学与技术、控制科学与工程、计算机科学与技术、航空宇航科学与技术等,是涵盖体系架构、协议标准、运维管控、应用服务等等的综合性技术。

随着人类步入信息社会以及空间系统的高边疆优势,空间信息网络相关研究日益受到高度关注,世界各航天大国在全球范围内掀起了一轮轮的航天产业热潮。国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)组织专家论证、预判技术发展趋势,聚集学术界优势力量,立项“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划,布局空间信息网络领域基础理论与关键技术研发。重大研究计划历时 8 年研究探索,提出了适合我国国情的空间信息网络发展路线,建立了针对空间信息网络节点多样、结构复杂等特点的体系架构,探索出新理论和新方法,提升了



于全 中国工程院院士,军事科学院系统工程研究院研究员,国家自然科学基金“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划指导专家组组长, *Journal of Communication and Information Networks* 期刊创刊主编。主要研究方向为无线自组织网络、软件无线电、认知无线网、空间信息网络、基于网络孪生(Cybertwin)的云原生网络体系架构等。

我国在空间信息领域总体技术水平。

## 1 项目实施情况

### 1.1 立项背景

随着空间信息技术的发展进步,通信、导航、遥感等各种空间应用系统得以在全球范围内普及,正广泛、深入、潜移默化地改变着人类的生产生活方式,空间信息技术已然成为推动经济社会发展不可或缺的组成部分。

国外对空间信息网络的大规模研究起始于 20 世纪 90 年代,以欧美为代表的西方国家相继提出了一系列的空间信息网络计划,并开展网络体系架构设计及相关项目的演示验证。美国空间信息网络发展水平处于世界领先地位,美国军方从 2000 年起致力于建设“全球信息栅格”<sup>[2]</sup>“转型卫星通信系统(Transformational Satellite Communication System,

TSAT)”<sup>[3]</sup>和“全球立体观测网”，2018年成立太空司令部后，于2021年推出了以空间传输层为核心的七层“国防太空体系”，以低轨星为主体，集指挥控制、侦察监视、通信导航为一体，为空天地海作战平台提供广覆盖、低时延的信息传输服务；NASA也提出了“一体化、可扩展空间通信架构”的概念，启动空间传感网计划，建立一体化、网络化的新型空间体系。欧洲提出了建设一体化全球通信空间基础设施（Integrates Space Infrastructure for Global Communication, ISICOM）<sup>[4]</sup>系统。随着同步轨道卫星发展进入平缓期，2010年前后，OneWeb、SpaceX、Google等企业纷纷提出打造包括数百乃至数万颗小卫星的低轨星座<sup>[5-7]</sup>，开启新一轮空间信息系统建设热潮。大规模低轨星座能够填补现有系统在通信速率、接入、覆盖能力等方面的不足，为空天地海用户提供广覆盖、低时延、大容量、低成本服务，成为当前发展主流。

可以看到，空间信息网络作为信息时代的国家公共基础设施，将成为保障“海洋远边疆、太空高边疆、网络新边疆”的重要支撑，是各国竞相争夺的战略制高点。经过多年的研究论证，2013年自然科学基金委立项“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划，以空间信息网络为核心开展交叉学科研究，探索空间信息网络模型与高效组网机理、空间动态网络高速传输理论与方法、空间信息稀疏表征与融合处理等科学问题，为未来空间信息网络构建和空间信息系统建设提供新理论、新方法，从而为我国空间技术实现高起点、跨越式发展奠定坚实的理论基础。

## 1.2 总体科学目标

本重大研究计划的总体科学目标是：瞄准信息网络科学的学科发展前沿，针对空间信息网络大时空跨度网络体系结构、动态网络环境下的高速信息传输、稀疏观测数据的连续反演与高时效应用等基础性的重大挑战，研究大尺度时空约束下空间网络及空间信息传输处理等机理，重点突破动态网络容量优化、高速信息传输及多维数据融合应用等技术难题，通过传输网络化、处理智能化和应用体系化等方法，将网络资源动态聚合到局部时空区域，解决空间信息网络在大覆盖范围、高动态断续条件下空间信息的时空连续性支持问题，为提升全球范围、全天候、全天时的快速响应和空间信息的时空连续支撑能力，实现我国空间网络理论与技术高起点、跨越式发展，并有效支撑高分辨率对地观测、卫星导航、深

空探测等国家重大专项的发展奠定理论基础。同时通过重大研究计划的实施，培养空间信息网络理论与技术领域领军人才及优秀科研群体。

为了实现上述科学目标，该重大计划提出研究三个核心科学问题：空间信息网络模型与高效组网机理，空间动态网络高速传输理论与方法，空间信息稀疏表征与融合处理。在此基础上，进行面向灾害应急响应和航空智能运输系统的空间信息网络感知、传输、处理与协同应用的集成演示，验证理论成果的有效性，并通过集成升华推动空间信息网络的深化研究。

## 1.3 总体布局和实施思路

“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划按照“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路，面向国家重大战略需求，技术布局方面，围绕空间信息网络模型与高效组网机理、空间动态网络高速传输理论与方法、空间信息稀疏表征与融合处理等核心科学问题开展创新性研究；组织实施方面，贯彻顶层设计的目标导向与科学家自由探索相结合、遴选新项目与整合集成在研项目相结合的要求，凝练出符合我国国情的科学目标，面向创新人才培养，推动跨学科交叉，不断探索新的科研项目管理模式，积极推动我国空间信息网络在理论研究和技术应用上的原始创新和快速发展。

根据申报项目创新思想、研究价值以及对研究计划总体目标贡献，采取“培育项目”“重点支持项目”和“集成项目”三种不同项目类型予以资助，共资助研究项目96项，其中培育项目53项、重点支持项目25项、集成项目10项、战略研究项目8项。8年研究历程划分为三个阶段：第一阶段（2014—2016年）为基础理论创新阶段，重点围绕重大研究计划的三个科学问题部署项目指南和研究课题，发展空间网络理论、空间信息理论，形成网络容量优化、智能协同传输、主动感知与认知等基础理论和方法，为重大研究计划顺利开展奠定理论基础。第二阶段（2017—2018年）是关键技术突破阶段，通过项目布局，建立空间信息网络模型，形成信息传输理论与方法，构建信息表征与处理方法体系，突破相关关键技术，形成基本的算法库和仿真测试平台。第三阶段（2019—2021年）为集成演示验证阶段，本阶段进一步完善仿真测试平台，重点进行项目和成果的集成升华，完成基础理论与关键技术集成演示验证。

## 1.4 总体科学目标的达成情况

本重大研究计划历时八年，解决了空间信息网

络模型与高效组网机理、空间动态网络高速传输理论与方法、空间信息稀疏表征与融合处理等相关的若干关键科学问题与技术难题,初步建立空间信息网络系统与装备的理论体系与技术基础,为高分辨率对地观测、卫星导航、深空探测等国家重大专项的发展奠定了重要理论基础和技术装备支持,全面达成了立项时的科学目标。

在空间动态组网方面,提出了动态网络建模和容量计算、空间动态组网机理和协议、网络体系结构与管理控制等理论与技术,实现了空间动态网络高效组网,解决了大时空跨度下的空间网络业务与资源的动态适配、应用为中心的多层次高时效可靠传输、分层自治动态建链柔性组网等难题;在空间高速传输方面,提出了空间网络新型编码与调制、空间动态链路的高效传输、空间网络多波束多址接入等理论与技术,系统解决了大时空跨度下实时端到端的可靠稳定传输、多用户动态接入的链路建立和通信保持、按需高效的卫星覆盖等难题;在空间信息处理方面,提出了在轨空间数据的实时感知和智能遥感影像服务的新理论,系统解决了在空间信息网络资源有限条件下遥感信息实时服务的难题,突破了海量遥感影像高效智能压缩的瓶颈,实现了面向任务的星地协同在轨处理机制与方法,为我国空天信息实时智能服务提供重要支撑。

## 2 项目取得的主要成果

“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划在人才培养、论文专著、技术奖励、共享平台、重大应用方面均有较大突破,取得丰硕成果。人才培养方面,指导专家组成员或项目承担人中有 7 人当选两院院士(含外籍院士 1 名),4 人入选 IEEE Fellow,项目承担人中有 5 位国家杰出青年科学基金获得者,7 人入选国家科技人才计划,14 人入选国防领域优秀人才计划,培育 2 个国家自然科学基金创新研究群体;论文专著方面,在国际国内期刊发表学术论文 3 000 余篇,获授权专利 741 件,出版空间信息网络领域专著 68 部;技术奖励方面,相关成果获得多项国家级、省部级奖励,包括国家科技进步一等奖 2 项、国家技术发明奖二等奖 6 项、国家科技进步二等奖 4 项以及省部级奖励 58 项;共享平台方面,设计遥感影像专用深度学习框架 LuoJiaNet<sup>①</sup>,发布全球规模最大的遥感图像标注数据库

LuoJiaSet<sup>②</sup>、遥感场景语义分割数据与算法集 GID、遥感场景分类数据与算法集 AID 等 11 个开源数据集,研制发射“双清一号”科学实验卫星,打造面向全国科研人员开放的科研基础设施,为遥感领域科研成果在轨验证提供可重构平台环境,推动空间信息网络相关学科领域的发展。重大计划取得成果应用于我国星网工程、对地观测、深空探测等国家重大任务以及火箭测控、智慧天网、C919 通信系统、飞船飞行验证等重要型号系统,为国家重大工程实施和系统建设提供了重要支撑。本重大研究计划取得的主要创新性成果和实质性贡献如下:

### 2.1 空间信息网络模型与高效组网机理

空间信息网络区别于地面静态拓扑,以动态大时空跨度拓扑为本质特征。作为一个大容量、多层次异构网络,承载海量、多维、多节点协同信息,要求适应实时、高动态通信环境;空间信息网络体系结构中将包含多个异构异质子网络,每个子网络具有相对自治性,网络节点具有高动态性,网络行为表现方式复杂。需要发展动态图模型与优化理论、可扩展的异质异构组网关键技术、空间动态网络容量理论等。

#### 2.1.1 动态网络建模和容量计算

系统探究了动态时变网络的图模型与相关理论,针对空间信息网络的面向任务和典型业务应用特征,提出了包含节点、边、时间和资源的 4 元组扩展时变图模型  $G=(V, E, t, r)$ ,精确描述与建模空间网络<sup>[8]</sup>。同时,基于扩展时变模型,刻画和描述空间信息网络资源在时空两个维度上的关联性和冲突关系,构建了动态业务和服务模型,如图 1 所示。通过将信息容量求解问题转化为资源时变图上的最大多流问题,建立了空间信息网络容量计算模型,形成一个容量计算的最大多流优化问题,突破了传统扩展时变图的容量计算难题;推导了单层低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星网络、LEO/中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)双层卫星网络的容量上下界,揭示了链路带宽、卫星数目、卫星高度等参数对网络容量的影响;提出了对地观测系统的逼近网络容量的资源管理方法,实现了观测、压缩、数传一体化的资源管控。

#### 2.1.2 空间动态组网机理和协议

开展空间动态网络的业务协议与传输控制机制设计,针对大尺度空间网络环境复杂性和动态性带

① <https://github.com/MiZhangWhuer/luojianet>

② <http://geos.whu.edu.cn/luojiaSet/home>

来星间星地链路的长变时延和不稳定性难题,提出业务驱动的时空结构化信息高时效性传输机制,设计多源业务流量智能预测与自适应的星地融合网络资源协作动态分配理论与方法<sup>[9]</sup>。针对空间信息网络立体多层、异构动态的特点,建立了空间信息网络的分层自治域模型,解决了子网间动态耦合性和整网可控性难题。针对大尺度空间网络复杂电磁干扰、长变时延等带来的网络传输可靠性和稳定性问题,提出了联合可靠用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)和喷泉码的快速响应协

议与弹性可靠视频传输协议,如图2所示,实现了对抗和极端网络环境下业务高质量、高可靠、高效率获取与传输。

### 2.1.3 网络体系结构与管理控制

针对我国面临的轨道位和频率资源少、地面布站受限、平台能力相对弱等特殊挑战,提出了由高、中、低轨卫星和各类升空平台及地面设施等组成的空间信息网络系统架构<sup>[10]</sup>,解决了面向全球非均匀业务需求的系统规模及构型设计难题,实现网络的时空不间断覆盖。建立了网络规模、卫星高度等

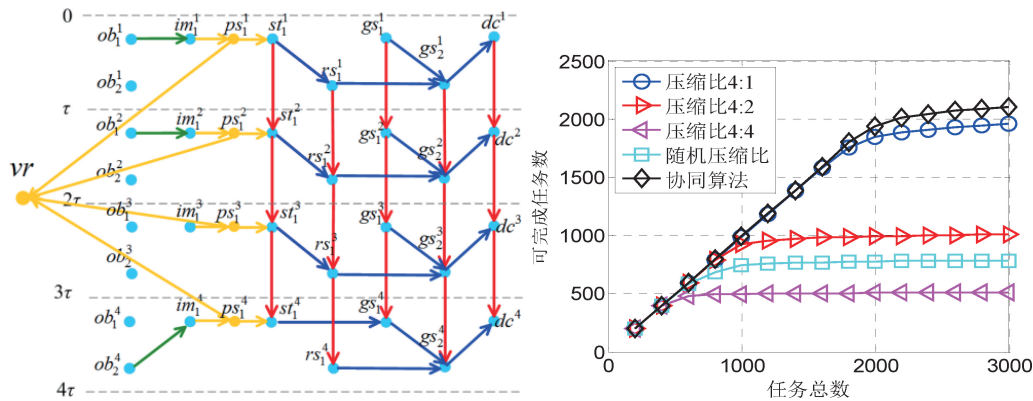


图1 时变图模型及网络容量增益

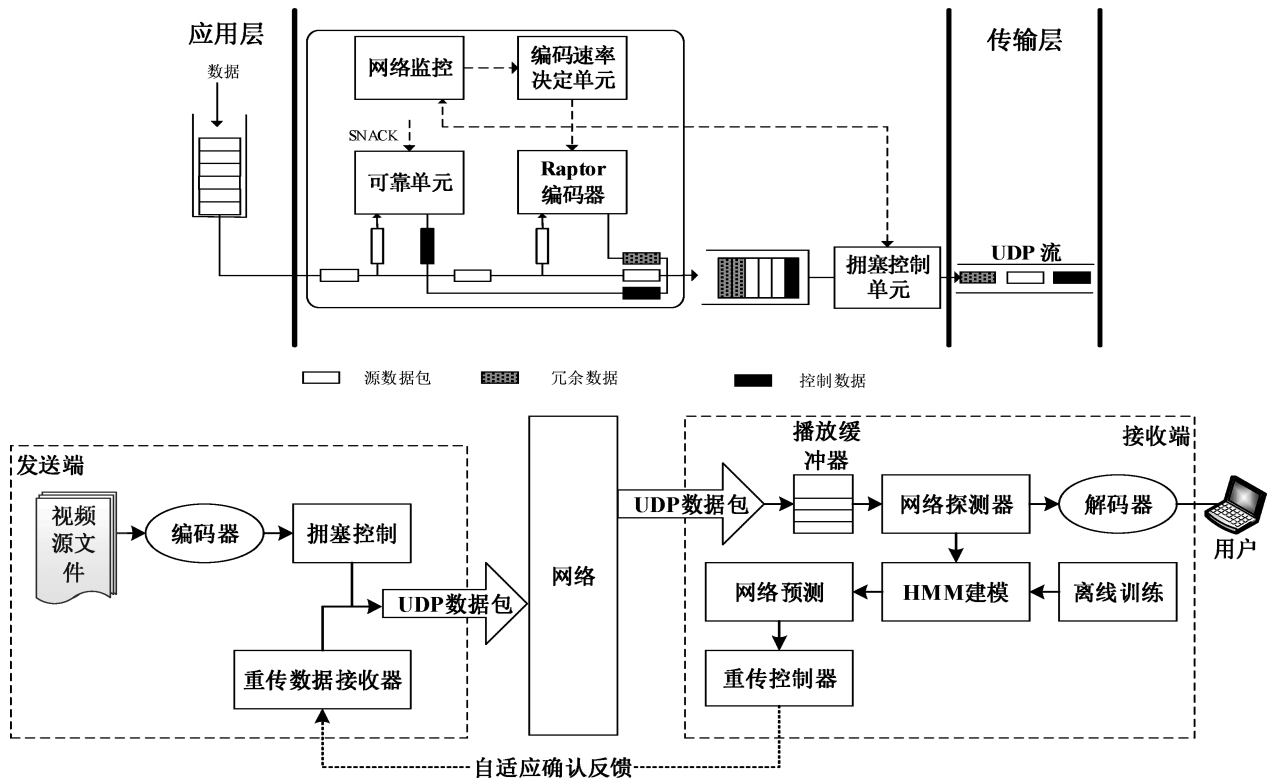


图2 应用驱动的传输协议

约束下的最优控制器部署数量和位置的数学关系，管控信令响应时间达到秒级<sup>[11]</sup>。针对通—导—遥业务多样性与传输计算存储资源多维度带来的网络资源调度与管理控制的复杂性难题，提出了时空聚合的任务—资源一体表征方法、面向常规任务的观测和数传一体化联合任务编排方法<sup>[12, 13]</sup>；研制了面向复杂多任务的动态资源管控原型系统，如图 3 所示，提出全面、显式、可表征网络重要性能和衡量其运行情况的关键指标(Key Performance Indicator, KPI)评估体系<sup>[14]</sup>。

### 2.2 空间动态网络高速传输理论与方法

空间信息网络的信息传输是大幅提升信息时效性的有效手段，面临的主要挑战是时变空变环境下的端到端可靠高速传输。需要针对远距离、高动态及异构异质等网络特点进行功率、频谱、时间、空间综合优化利用和传输。

#### 2.2.1 空间网络新型编码与调制理论

系统探究了空间网络新型编码与调制理论，针对空间太赫兹波的高速调制，提出了微带电路(电子学“路”的方法)+有源人工微结构(光子学“场”结构)的全新思路，设计开发了太赫兹空间光阵列型调制器、片上化高速直接调制芯片、太赫兹直接调制通信系统，实现了国际首个 1 Gbps 太赫兹直接调制的器件，性能达到国际领先；解决了太赫兹调制器件芯片化、高速率的难题，首次研制出片上集成化太赫兹高速直接调制芯片。此外，突破太赫兹射频直接调制技术，提出适用于空间链路的高效编码技术<sup>[15]</sup>，发展了一种极简型太赫兹无线通信系统，无需高速 AD/DA 转换，有效降低系统体积和功耗，为空间高速无线通信提供了新途径，设计国际首个  $64 \times 64$  太赫兹智能超表面，率先实现 10 Gbps 自由空间太赫兹的幅度调制，如图 4 所示<sup>[16]</sup>。



图 3 天基网络服务系统及动态资源管控原型系统

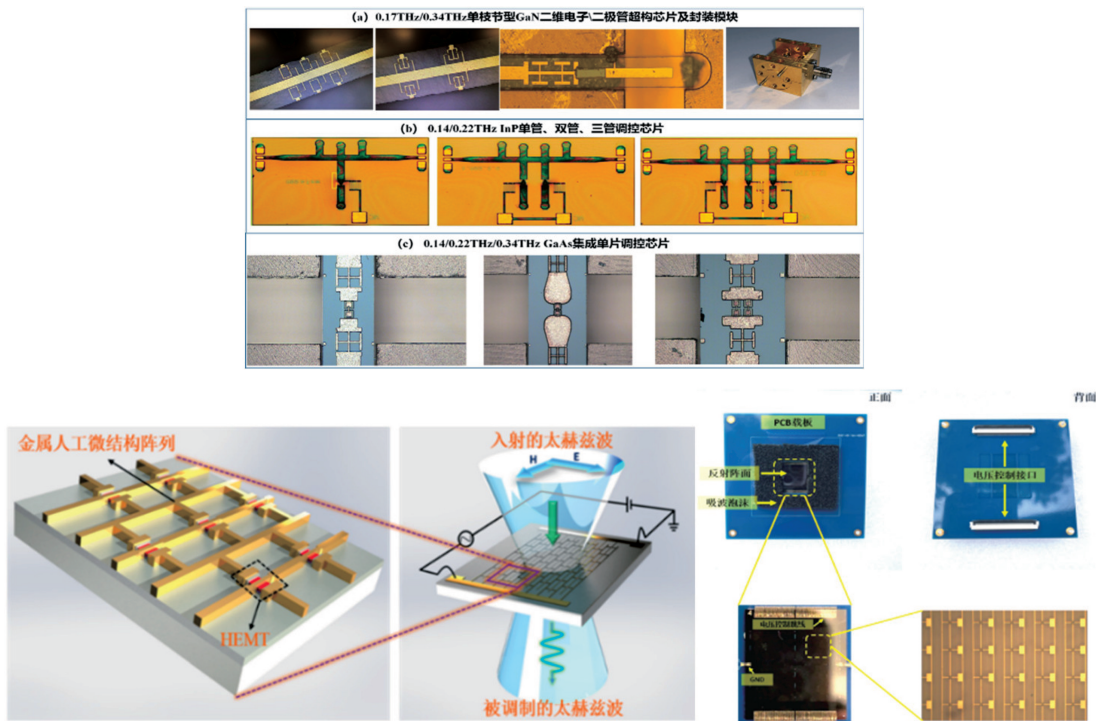


图 4 国际首个 1Gbps 太赫兹直接调制的器件

### 2.2.2 空间动态链路的高效传输方法

开展激光通信机理研究和多址接入组网体制设计,针对多点同时激光通信光学原理、技术实现难题,提出“水平全方位,垂直大角度”“一对多同时激光通信”的光学原理与总体方案,设计多点同时激光通信捕获、对准、跟踪(Acquisition, Pointing, Tracking, APT)控制方法,挖掘反射镜转角与平台运行轨迹、相机脱靶量的关系、以及相邻反射镜之间的协同运动关系,设计实现了以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构作为系统光学天线,并进一步研制出“一对多”激光通信原理验证装置,实现高精度测姿和定位。突破传统二维转台激光通信系统体积大、重量重、对卫星平台影响大的技术问题,采用旋转双棱镜扫描技术,突破双棱镜的精确求解理论难题,成功研制了基于旋转双棱镜的超小型多功能激光通信系统。

### 2.2.3 空间网络多波束多址接入技术

系统研究多波束按需覆盖、按需业务驱动卫星通信架构、阵列天线多波束混合预编码、多星多波束干扰建模与联合处理等关键核心技术<sup>[17, 18]</sup>;提出一种星载相控阵天线低复杂度精确控制方法,并进一步完成波束控制星上处理架构和适应细粒度资源块的星地链路帧结构设计,解决了广域用户通信需求与时空频多域资源按需匹配的核心科学问题;提出

大时空尺度下的业务与资源匹配机制,研制快速匹配用户空间分布与业务速率的资源管理软件;提出一种高效天线阵设计与混合预编码机制,发明可重构电磁表面控制算法与相控阵波束赋形方法,能够极大降低天线阵列硬件复杂度。

### 2.3 空间信息稀疏表征与融合处理

空间信息网络应用面临信息获取的时空离散性与观测目标时空连续性应用需求之间的矛盾,以及应用服务因时空跨度大而难以满足信息用户的时效性要求等问题。一方面,由于现有的空间信息表征方法在面临海量空间信息时无法高效实现数据下行,因此发展高效表征新方法尤为迫切;另一方面,空间平台时空基准不同、获取数据特征/分辨率不同,造成融合处理难度,需解决处理时效性瓶颈。需从常规大数据量获取转变为主动感知与稀疏表征,信息获取需要从单时空基准序列变革为多时空基准矢量,信息融合需要从单源低维处理转变为时空关联、多源多维融合处理。

#### 2.3.1 多维信息时空同化与融合处理

围绕高光谱与多源遥感协同观测共性关键技术、多元异质特征表达与融合应用以及高维稀疏数据星上快速处理技术开展研究,建立了任务驱动的高光谱协同观测理论方法和技术流程<sup>[19]</sup>,成功应用在我国多颗遥感卫星(图6),突破了海量遥感影像

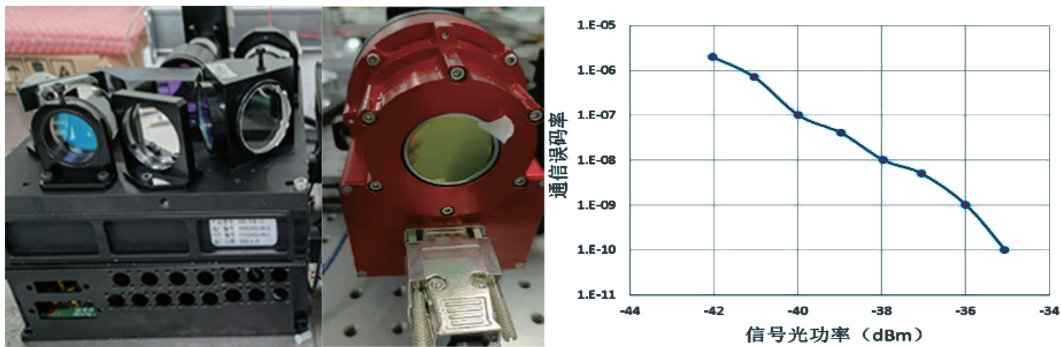


图5 超小型多功能激光通信系统

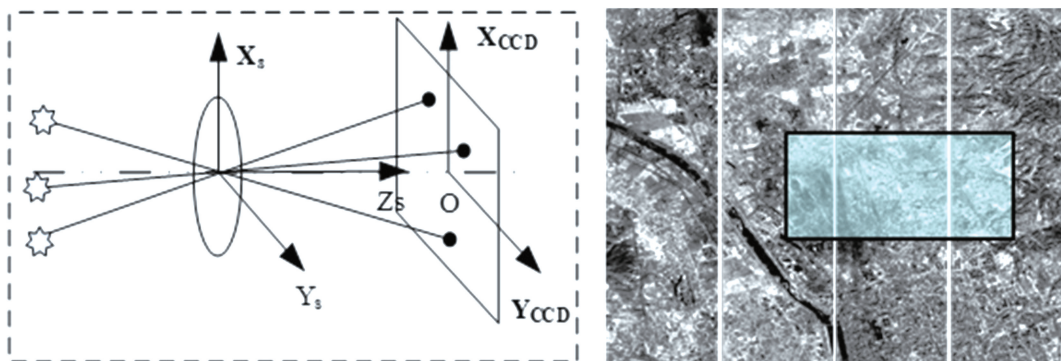


图6 超高精度姿态确定及光学卫星全谱段融合

高效智能压缩的瓶颈,为空间信息网络有限带宽资源条件下,海量遥感影像“快”“准”“灵”的高精度智能实时终端应用服务提供支撑。

### 2.3.2 空间信息智能提取与知识发现

面向典型目标实时智能提取,提出基于先进深度卷积神经网络的目标特征学习与分类鉴别算法<sup>[20, 21]</sup>,构建适应在轨运行环境的智能目标检测轻量级网络模型,实现了对目标特征的自主学习与稀疏表征能力(图 7),为海量遥感信息在轨获取和应用终端遥感信息实时精准智能服务奠定基础。针对在轨智能目标检测任务,设计基于智能检测算法的“地面算法训练—星上更新并检测—地面反馈更新”应用联动框架;通过开展各种典型静/动态目标在轨实时智能检测集成与验证研究,建立了在轨智能检测的统一算法框架与评估指标体系。

### 2.3.3 空间信息稀疏表征与高倍智能压缩

针对星地协同处理环境下数据传输通道远不能满足星上数十 Gbps 海量数据的实时传输要求的问题,基于遥感影像稀疏特性,设计提出基于稀疏表征、字典学习以及神经网络的高倍率智能压缩方法<sup>[22]</sup>。在星上验证阶段,基于星上硬件平台受限条件下分析算法可行性,提出星载高性能影像和视频压缩算法以及软硬件优化、加速方法。在轨演示与集成验证证明,达成高倍静态影像压缩比优于 30 倍、动态视频压缩比优于 200 倍、峰值信噪比优于 35 dB 的能力指标,并支持在轨动态部署与近实时处理。

## 2.4 成果应用

重大研究计划取得成果支撑了国家重大科学和工程,其中:自主研发的天智协议栈成功应用于“行云”系统,并应用于“星网”网络体系论证和卫星网络验证,推进了我国航天测控网的资源调度管理二期系统建设,保障了“天智一号”在轨试验;于国内外首

次提出自由空间一对多同时激光通信原理与方案,应用于“智慧天网”星间链路激光终端、“中科院先导星”;多星多波束高效传输与弹性聚焦服务关键技术应用于智慧天网工程试验卫星“天网一号”,实现我国中轨移动通信卫星波束成形服务的突破;高精度定位与融合处理、在轨信息提取与智能处理、稀疏表征与高倍智能压缩等技术应用在我国对地观测、月球探测、深空探测等国家重大工程领域,保障了天宫二号、天问一号、高分十一号 01/02 星、环境二号、天绘三号等在轨处理任务,实现了我国星上智能处理从无到有的跨越。

## 3 展望及发展建议

当前,世界范围内空间信息网络领域发展方兴未艾;面向领域学科前沿,低轨巨星座、新频段新体制通信、分布式协同探测等技术不断发展;面向国家重大现实应用急需,一带一路建设、国防安全网络发展等都自主可控韧性安全的空间系统提出了迫切要求。当前,美国 Starlink 星座已有 4 000 多颗卫星在轨运行,为全球上百万用户提供宽带互联网服务,初步具备商用能力,并在俄乌冲突中凸显出较高的军用价值。空间信息网络作为信息时代无法取代的信息基础设施,必将是未来很长一段时期大国竞争博弈的焦点。

空间信息网络正由天基组网向各类空间信息要素一体融合发展,建议突出空间信息网络领域技术创新,以低轨星座系统为重点,面向构建以近地为基础、向深空迈进的智能、安全、泛在、融合的自主可控空间信息网络,以全球信息保障、空间信息获取与处理、空间安全防护为重点,发挥举国体制组织优势,突破相关理论与技术,为数字地球构建以及经略海洋、网络强国等国家战略推进实施提供支撑。发展重点建议如下:

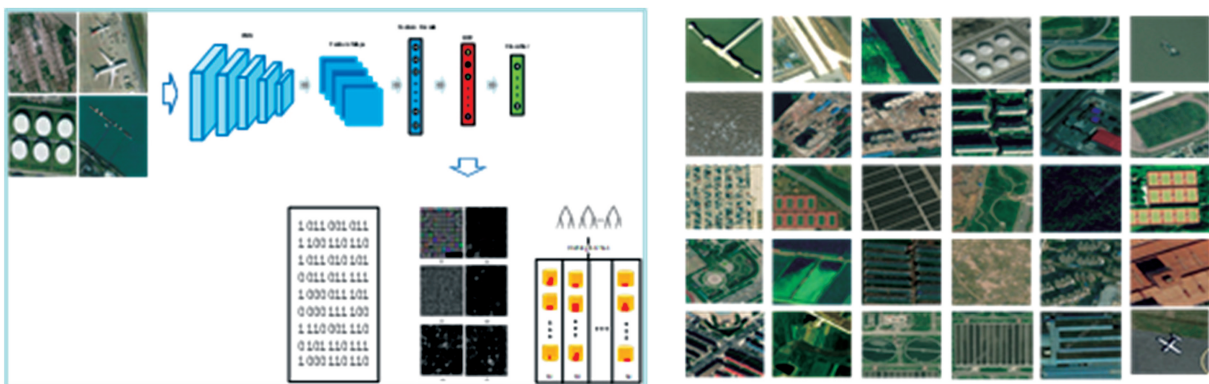


图 7 轻量级深度卷积网络与智能目标检测

(1) 全球信息实时通联。建议面向国家战略利益拓展对全球信息实时通联要求,以频率轨位临近饱和下的全球大范围空间信息时空连续性支持,高效费比下的全球范围、全天候、全天时的快速响应能力供给,高动态条件下多目标宽带通信保障等为重点,开展空间频率和轨道资源多维发掘模型与方法、与地面网络一体融合的确性服务质量保障机制与技术、复杂空间环境下异构卫星网络智能运行监管理论与技术、大规模相控阵天线快速波束形成与协同优化理论、大时空多源不确定性业务网络弹性服务等基础理论与关键技术研究。

(2) 空间信息高效获取。面向形成全域全谱综合探测与应用能力,以全域全谱段感知、多模式融合处理,全球大范围、高动态事件的实时观测与智能分析,异构多载荷高维数据的稀疏表征与智能压缩,时空分辨率提升等为重点,开展在轨信息压缩、目标识别与跟踪,分布式协同智能电磁感知,多源信息几何校正与自动配准,基于语义空间信息稀疏表征,超分辨率重建等基础理论与关键技术研究,满足全球空间无缝感知需求。

(3) 空间信息安全防护。空间信息网络处于无国界、开放暴露空间,易受到监听、截获、干扰、摧毁等各类风险。针对空间信息网络传输信道开放、威胁形式多样带来的安全防护难题以及空间信息网络安全韧性运行的内在要求,开展抗毁抗扰动态重构、多域感知多元驱动的空间信息网络抗干扰、空间信息网络内生安全、低复杂度差异化网络安全互联与隔离等基础理论与关键技术研究,以支撑实现空间信息的安全获取、传输与处理。

### 参 考 文 献

- [1] Yu QA, Wang JC, Bai L. Architecture and critical technologies of space information networks. *Journal of Communications and Information Networks*, 2016, 1(3): 1—9.
- [2] Libicki MC. Who runs what in the global information grid: ways to share local and global responsibility. Rand Corp Santa Monica CA, 2001.
- [3] Vanderpoorten J, Cohen J, Pino R, et al. Transformational Satellite Communications System (TSAT) lessons learned: perspectives from TSAT program leaders. MILCOM 2012-2012 IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA. IEEE, 2013: 1—6.
- [4] Fogliati V. ISICOM: integrated space infrastructure for global communications. 2008 4th Advanced Satellite Mobile Systems. IEEE, 2008: 13—15.
- [5] Henri Y. The OneWeb satellite system. *Handbook of Small Satellites*. Cham: Springer, 2020: 1—10.
- [6] McDowell JC. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 892(2): L36.
- [7] Macedo R. Effective communication: satellite system poised to improve information flow. *Nickle's Daily Oil Bulletin New Technology Magazine*, 2009: 15.
- [8] Zhang T, Li JD, Li HY, et al. Application of time-varying graph theory over the space information networks. *IEEE Network*, 2020, 34(2): 179—185.
- [9] Sheng M, Wang Y, Li JD, et al. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: resource management architecture and strategies. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 127—133.
- [10] Cao X, Yang P, Alzenad M, et al. Airborne communication networks: a survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 1907—1926.
- [11] 陈锐志, 蔚保国, 王甫红, 等. 联合少量地面控制源的空间信息网轨道确定与时间同步. *测绘学报*, 2021, 50(9): 1211—1221.
- [12] Wang L, Jiang CX, Kuang LL, et al. Mission scheduling in space network with antenna dynamic setup times. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(1): 31—45.
- [13] Wang Y, Sheng M, Zhuang WH, et al. Multi-resource coordinate scheduling for earth observation in space information networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(2): 268—279.
- [14] 李德仁. 展望 5G/6G 时代的地球空间信息技术. *测绘学报*, 2019, 48(12): 1475—1481.
- [15] Zhao YC, Wang L, Zhang YX, et al. High-speed efficient terahertz modulation based on tunable collective-individual state conversion within an active 3 nm two-dimensional electron gas metasurface. *Nano Letters*, 2019, 19(11): 7588—7597.
- [16] Wang L, Guo X, Zhang Y, et al. Enhanced THz EIT resonance based on the coupled electric field dropping effect within the undulated meta-surface. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1071—1078.
- [17] 匡麟玲, 晏坚, 陆建华. 6G 时代的按需服务卫星通信网络. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- [18] Xiao ZY, He T, Xia PF, et al. Hierarchical codebook design for beamforming training in millimeter-wave communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(5): 3380—3392.



- [19] Lin B, Tao X, Xu M, et al. Bayesian hyperspectral and multispectral image fusions via double matrix factorization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5666—5678.
- [20] Xu XD, Li W, Ran Q, et al. Multisource remote sensing data classification based on convolutional neural network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 937—949.
- [21] Zhang B, Chen ZC, Peng DL, et al. Remotely sensed big data: evolution in model development for information extraction point of view. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(12): 2294—2301.
- [22] Lu H, Gui Y, Jiang X, et al. Compressed robust transmission for remote sensing services in space information networks. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(2): 46—54.

## Review of Major Research Plan on “The Fundamental Theory and Key Technologies of The Space Information Networks”

Quan Yu    Jingchao Wang\*    Yunfang Shi

*System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100141*

**Abstract** In this paper, the background, scientific objectives, as well as layout and implementation of the Major Research Plan “The Fundamental Theory and Key Technologies of The Space Information Networks” are reviewed. Major achievements and breakthroughs are summarized in the following three areas: “Spatial information network model and efficient networking mechanism”, “High speed transmission theory and method for spatial dynamic networks”, “Sparse representation and fusion processing for spatial information”. The suggestions of future development in the relative fields are provided.

**Keywords** Major Research Plan; space information networks; spatial information network model; high speed transmission theory for spatial dynamic networks; sparse representation for spatial information

(责任编辑 姜钧译)

---

\* Corresponding Author, Email: wangjc.2000@tsinghua.org.cn