

论我国空间信息网络的构建

李德仁^{1,2} 沈欣^{1,2,3} 龚健雅^{1,2} 张军^{2,4} 陆建华^{2,5}

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 地球空间信息技术协同创新中心,湖北 武汉,430079

3 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

4 北京航空航天大学电子信息工程学院,北京,100191

5 清华大学电子工程系,北京,100084

摘要:空间信息网络是以空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星、平流层气球和有人或无人驾驶飞机等)为载体,实时获取、传输和处理空间信息的网络系统。空间信息网络通过组网互联,实时采集、传输和处理海量数据,实现卫星遥感、卫星导航和卫星通信的一体化集成应用与协同服务。介绍了空间信息网络的基本概念,分析了空间信息网络的主要功能和特点;在总结相关领域的国内外研究进展的基础上,论述了我国构建空间信息网络的重大意义,并对我国空间信息网络的研究目标和科学问题进行了论述。

关键词:空间信息网络;卫星组网;信息传输;协同观测;在轨处理

中图分类号:P208

文献标志码:A

上百颗卫星、上万架有人、无人飞机运行在地球上空,如何最大效率地发挥它们的作用,支持人类社会可持续发展,是一个尚待解决的新命题。空间信息网络是以空间平台(如同步卫星或中、低轨道卫星、平流层气球和有人或无人驾驶飞机等)为载体,实时获取、传输和处理空间信息的网络系统。空间信息网络通过组网互联,实时采集、传输和处理海量数据,实现卫星遥感、卫星导航和卫星通信的一体化集成应用与协同服务。

构建空间信息网络,不仅需要提高空间设施的数据获取能力^[1,2],提升高动态条件下网络节点的通信能力,扩大服务范围,还需研究和建立一套性能良好、安全可靠、可灵活重构、开放互联、支持互操作的新型信息网络系统,以实现信息资源的综合利用和统一管理^[3,4]。智慧地球时代的物联网^[5]应当从地面向空间扩展。

1 空间信息网络的能与特点

1.1 空间网络的功能

通过天基、空基和地基网络的互联互通,空间

信息网络具有信息获取、处理、分发的一体化服务能力,可实现信息的高效智能服务。

1) 遥感与导航数据快速获取与处理服务。通过多平台协同观测、星地协同处理和星地快速传输,实现全天时、全天候、近实时获取、处理遥感、导航等多种数据,将信息及时推送给用户。

2) 地面移动宽带通信服务。空间信息网络能够克服地面网络覆盖范围不足的局限,可为全球任意位置的用户提供安全、可靠、高速的通信和数据传输服务。

3) 航天器测控、通信与导航。利用空间信息网络能够为各类航天器实时传输数据、图像和语音信息,部分取代地面测控设施转发航天器测控数据,并为深空探测航天器提供导航、数据中继等服务。

1.2 空间网络的主要特点

1) 一星多用,兼顾其他。空间信息网络通过通信、遥感、导航等载荷与平台高效集成,进行协同观测、在轨处理和一体化组网传输,实现空天资源按需配置和灵性服务。

收稿日期:2015-01-20

项目来源:国家自然科学基金资助项目(91438203);中国博士后科学基金资助项目(2014M562006);武汉大学自主科研资助项目(2042014kf0059)。

第一作者:李德仁,博士,教授,博士生导师,中国科学院院士,中国工程院院士,国际欧亚科学院院士,主要从事以RS、GPS和GIS为代表的空间信息科学的科研教学工作。E-mail:drli@whu.edu.cn

通讯作者:沈欣,博士。E-mail: xinshen@whu.edu.cn

2) 结构复杂,技术难度大。由于时空跨度大,信息维度高,空间信息网络面临海量数据传输、信息实时处理等难题,特别是在资源受限、时空约束条件下,空间信息网络的负载能力与可靠性成为突出的瓶颈问题。

3) 网络多源异构,节点动态变化。空间信息网络涉及星间、星地和地面网络,对网络的拓展性和兼容性提出了更高的要求。由于卫星等平台处于高速运动状态,因此网络拓扑结构具有高动态性。

4) 覆盖范围大,应用前景广阔。空间信息网络的覆盖范围从陆地拓展到全球乃至外太空,其应用涵盖空间观测、信息传输、处理及应用等多个领域,是人类认识空间、利用空间、进入空间的支撑手段,也是孕育战略性新兴产业的重要载体。

2 空间信息网络的发展现状

2.1 国外研究现状

空间信息网络将极大地拓展科学研究的空间和时间尺度,世界各国充分认识到空间信息网络在国际竞争和国民经济发展中的重要作用,空间信息网络的相关理论和技术研究取得了长足的发展。

围绕空间信息网络,西方国家相继实施了一系列研究计划。1996年,美国NASA将其主要卫星测控通信网合并,建立了NASA综合业务网

(NASA integrated services network, NISN)^[4]; 1998年,NASA的JPL实验室启动了星际互联网(interplanetary network, IPN)项目^[6],旨在为深空探测任务提供通信、导航服务,目前该项目已完成相关体系机构和协议的制定,正在推进仿真验证工作;2000年,JPL开展了下一代空间互联网(next generation space internet, NGSI)的项目^[3],研究利用通用通信协议(IP协议、CCSDS(consultative committee for space data system)建议)实现对地观测卫星与地面网络的互联;2002年,美国国防部、NASA等共同启动了转型通信研究(transformation communication architecture, TCA)^[7],旨在改进其全球军事卫星通信体系结构,实现空天宽带数据传输;2006年,NASA将空间通信活动划归空间通信与导航网络(space communication and navigation, SCaN)^[8]管理(如图1所示,见<http://spaceflightsystems.grc.nasa.gov/sopo/sco/SCaN-Testbed/Payload/Design/>),整合原有的天基网络、近地网络和深空网络的通信与导航任务;2007年,美国国防部又将太空互联网路由器(internet routing in space, IRIS)计划^[9]列入财政预算,研究通过高轨通信卫星携带的路由器缩短卫星通信时延。

2004年,NASA公布了一份关于空间信息网络的报告^[10],介绍了NASA空间探索、科学考察

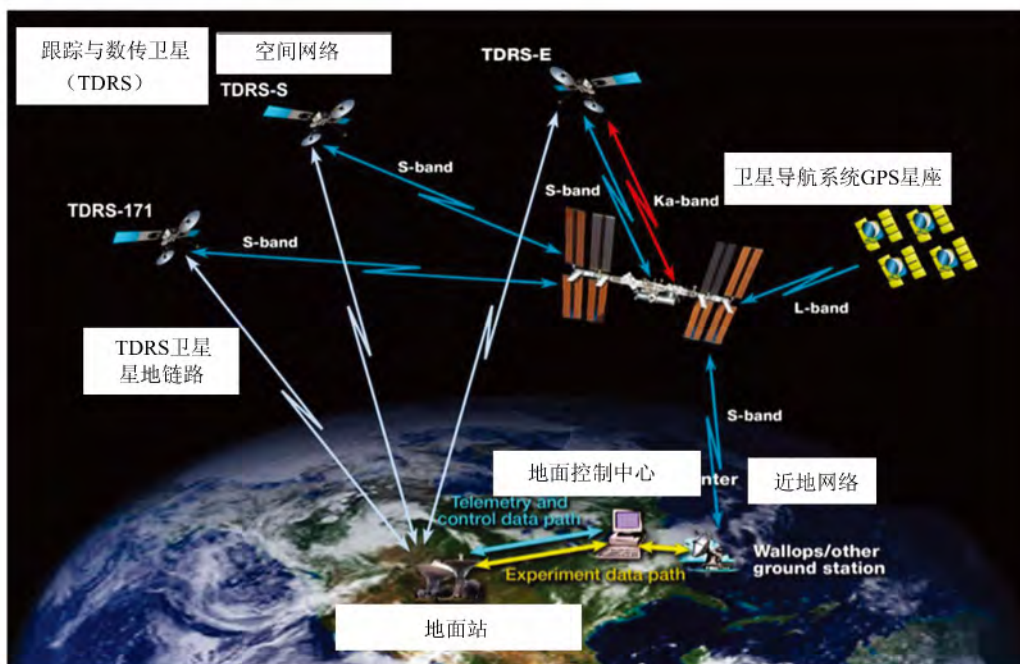


图1 SCaN结构示意图

Fig. 1 Structure of SCaN

的规划,其中设计了天地一体化网络的构架,包含构架的组成、接口、网络层次模型等内容;2006年,NASA的空间通信体系工作组(space communication architecture working group, SCAWG)给出了2005~2030年NASA空间通信与导航体系结构及相关6大关键技术领域的建议^[11],以指导未来的空间通信与导航能力及技术的发展建设,满足未来各种航天任务的需要。

2.2 国内研究现状

随着我国对空间资源开发和利用的不断深入,空间信息网络的相关研究受到高度关注。我国自“九五”提出了天基综合信息网,在“十一五”期间提出了空间信息网络的概念,并逐步启动了相关领域的基础理论和关键技术研究。《国家科技中长期发展规划》中将空天技术与下一代信息网络关键技术与服务、传感器网络及智能信息处理等作为信息领域的重要发展方向。科技部通过

973计划、863计划开展了相关基础理论和关键技术先期研究。2013年,国家自然科学基金委正式启动了空间信息网络基础理论与关键技术重大研究计划,拉开了系统开展空间信息网络基础理论研究的序幕。

2002年,罗雪山等对空地一体化信息支持系统进行了概念研究^[12],提出构建集成空间传感器、网络基础设施和用户终端的集成系统的设想;2005年,李德仁等从对地观测信息应用角度出发,提出构建智能对地观测系统^[1](见图2),指出多平台协同是未来对地观测系统的发展趋势;2006年,沈荣骏提出了我国的天地一体化航天互联网构想,论述了我国空天一体化互联网的体系构架^[3],为我国空间信息网络建设提供了参考;2012年,李德仁提出以提供快速、精确和实时的空间信息服务为目标,开展对天空地一体化对地观测网络理论与技术的研究^[2],推进数字地球走向智慧地球。

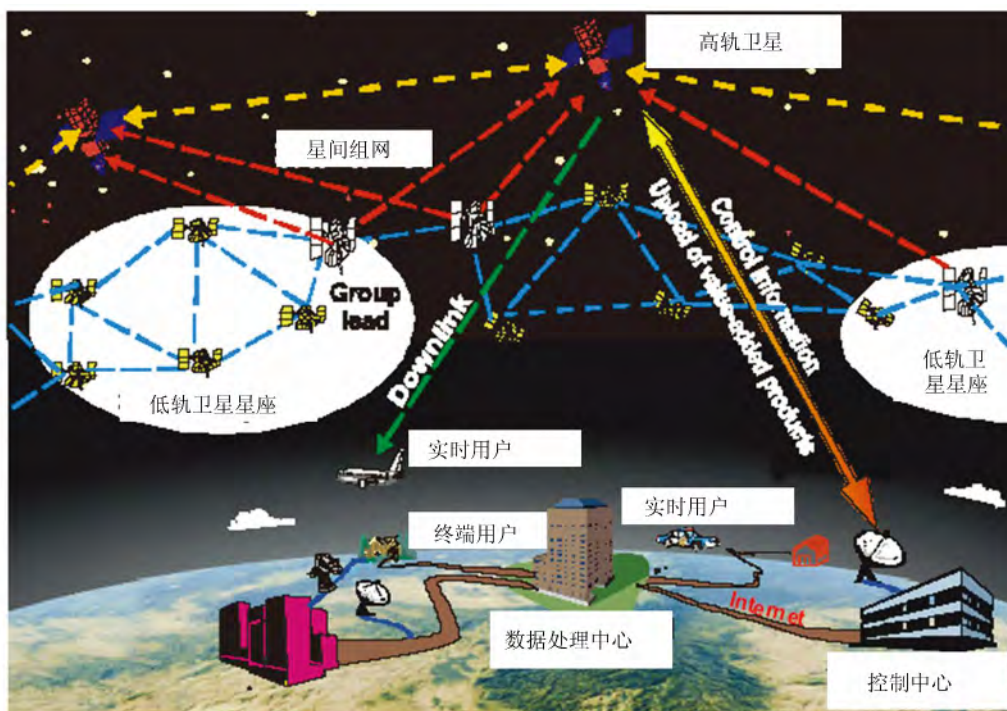


图 2 智能对地观测卫星系统的体系结构^[1]

Fig. 2 Structure of Intelligent Earth Observation System

3 构建我国空间信息网络的重大意义

空间信息网络是当今世界重要的国际科学前沿和战略制高点。空间信息网络研究高动态条件下空间信息的快速获取、实时传输、协同处理和智能服务问题,将人类科学、生产、军事活动拓展至外层空间,已成为全球研究的热点。2006年,Nature 刊文指出:空间传感器网络首次实现大规模

实时获取现实世界数据,通过空间信息网络发现新问题、验证假设,空间信息网络是触及现实世界的信息科学,将带来深远的影响^[13]。我国空间信息网络研究总体上尚处于概念研究阶段,关键技术以局部跟踪为主,缺乏系统性布局,尚未形成系统的科学理论和技术体系,与国际先进水平差距十分明显。

建设空间信息网络是适应我国国家发展战略的必然要求。空间信息表征地表空间自然、人文、

社会、经济等要素的位置、分布、内容及其变化,是服务经济建设、国家安全、大众民生的战略性信息资源,能够对环境动态监测、灾害及时响应、目标跟踪与打击等提供支撑。随着经济社会的发展和国际形势的变化,我国对空间信息的需求悄然发生变化:在覆盖范围上,随着我国综合国力的不断提升,国家利益的范畴已从领土拓展到全球乃至太空;在速度上,对空间信息的获取-传输-处理的响应速度从离线向实时化转变,在军事行动、灾害应急中尤为突出。然而,由于我国的卫星接收、测控设施仅部署在本土,大多数卫星采用单星独立运营模式,空间信息的覆盖范围仍以服务本土为主,响应时间停留在小时级。建设空间信息网络,准确、实时获取空间信息,对解决日益严重的环境恶化、灾害频发等问题,应对不断升级的领土与海洋争端,具有不可替代的作用。

4 我国空间信息网络的研 究目标与核心问题

4.1 我国空间信息网络的研 究目标

受频谱、轨道、载荷等资源和空间环境的限制,空间信息网络的发展难以通过简单增加节点数量、提高节点能力来提升服务的覆盖范围和响应速度。特别是我国的地面测控接收设施的布局受限,又给空间信息的高效传输、处理应用提出了新的挑战。因此,从根本上提升我国空间信息系统的体系服务能力,亟需系统开展空间信息网络新理论、新技术研究,推动我国空间信息网络理论和技术高起点、跨越式发展,为我国高分辨率对地观测、卫星导航、深空探测等国家重大专项的发展,以及下一代空间基础设施的建设奠定基础。

构建我国空间信息网络面临的主要挑战包括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、空间观测数据的高效处理与应用、复杂空间环境对网络安全的威胁等。针对上述挑战,我国空间信息网络的主要研究目标为:通过传输网络化、处理智能化和应用体系化方法将各类空天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、高动态条件下时空连续性支持问题,提升空间信息的全球范围、全天候、全天时响应能力。具体包括如下几点。

1) 发展新型空间网络新理论。突破传统的信息论和网络理论的限制,发展空间网络理论、空间信息理论,形成高效动态组网、网络容量优化、智能协同传输、信息主动感知与认知等基础理论和

方法。

2) 突破一批关键技术。突破大时空尺度下的网络构建与重构、星地协同处理和认知、空间异构网络融合、低轨卫星增强导航、空间信息安全、多载荷集成与协同服务等技术,实现对全球范围的响应速度从天级到亚小时级。

3) 构建研究创新平台。通过基础理论突破、关键技术算法集成,形成支持空间信息网络的核 心算法库、功能工具包和验证平台,演示验证理论研究成果。

4.2 我国空间信息网络的核 心科学问题

空间信息网络包括五个核心科学问题,分别论述如下。

1) 空间信息网络模型与高效组网方法。空间信息网络是一个按需聚合的新型网络系统,要求网络可重构,能力可伸缩,实现各类空间节点高效组网。需要研究变时空条件下的空间信息网络体系架构、面向服务的空间信息网络模型。空间信息网络动态配置、聚合与重构方法突破可扩展的异质异构节点组网、空间动态网络容量理论、星际互联网络模型与协议、面向任务的组网效能评估等关键问题。

2) 空间动态网络高速传输理论与方法。空间信息网络中网络节点和链路动态变化,信息传输容量随网络拓扑的时变空变而发生变化,为实现各类用户高速无缝接入,不同类型的业务信息在轨快速交换,保障多用户海量数据高速通信,需重点研究时变网络的信息传输理论、网络资源感知与优化配置方法、高动态时变网络资源智能协同方法、海量信息传输的分布式协作传输方法,突破空间信息网络动态接入与交换、超高速通信与互联、空间多波束动态形成与高效传输等关键技术。

3) 空间信息的星地协同处理机制与在轨处理方法。空间信息网络能够一体化调度星地处理资源,满足空间信息的快速精细处理需求。为此,需要在研究任务驱动的遥感信息协同处理机制的基础上,突破多源传感器高质量数据(光学、InSAR)实时获取、高精度实时几何定位、星上数据智能压缩、在轨云检测、遥感数据在轨变化检测与典型目标提取、时空基准与统一表征、星上通用数据处理平台、架构与软件等关键技术。

4) 遥感、导航、通信多载荷集成与协同应用。空间信息网络的显著特色是卫星平台集成不同类型的有效载荷,网络中各个节点以一种用途为主,兼顾其他功能。例如,在低轨卫星上集成 GNSS 数据接收和处理模块,实现对北斗系统的增强;在遥

感卫星上集成通信载荷,构建遥感数据的星间传输网络,其保证遥感大数据的实时传输的同时,还可作为卫星通信网络的有效补充。为此,需要突破多载荷配置与布局协同设计、低轨卫星 CORS 增强、导航网与通信信息网融合、动态导航增强网络架构、多载荷一体化任务规划与调度等关键技术。

5) 空间信息网络的安全与可靠性理论。由于空间信息网固有的开放网络通信环境,网络链路很容易受到宇宙射线、大气层电磁信号或恶意电磁信号的干扰,甚至受到太空武器的攻击。为保障空间信息网络中信息传输的机密性、认证性、完整性和可用性,需要重点研究卫星网络可靠性方法、空间信息网络安全体系、抗毁安全路由协议、空间信息对抗、信息加密、节点动态感知与网络自愈等关键技术问题。

在此基础上,需以灾害应急响应等重大典型应用为想定,开展空间信息网络感知、传输、处理与协同应用的集成仿真演示,验证理论成果的有效性,为我国自主的空间信息网络系统的构建打好基础。

5 结 语

空间信息网络是当今国际科学发展的一个重大前沿和战略制高点,在充分吸收国外先进经验的基础上,开展我国空间信息网络基础理论与方法研究,不仅有望在空间网络模型、网络信息论、空间信息认知、空间网络安全等领域取得理论、方法突破,取得一批国际先进水平研究成果,还将为我国空间信息网络系统的建设奠定基础,推动我国卫星导航、卫星通信、卫星遥感的集成应用。笔者认为,在理论方法研究和关键技术攻关的基础上,适时启动我国自主空间信息网络系统的建设,不仅能够推动我国航天科技事业的跨越发展,而且对推动经济转型发展、维护国家安全和全球利益具有重大战略意义。

参 考 文 献

[1] Li Deren, Shen Xin. On Intelligent Earth Observation Systems[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2005, 30(4): 9-11(李德仁, 沈欣. 论智能化对地观测系统[J]. 测绘科学, 2005, 30(4): 9-11)

[2] Li Deren. On Space-Air-Ground Integrated Earth Observation Network[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(4): 419-425(李德仁. 论天空地一体化对地观测网络[J]. 地球空间信息科学学报, 2012, 14(4): 419-425)

[3] Shen Rongjun. Some Thoughts of Chinese Integrated Space-Ground Network System[J]. *Engineering Science*, 2006, 8(10): 19-30(沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 19-30)

[4] Zhang Jun. Future Space-Air-Ground Integrated Network Technology[N]. *China Aviation News*, 2009-04-07(3)(张军. 面向未来的空天地一体化网络技术[N]. 中国航空报, 2009-04-07(3))

[5] Li Deren, Gong Jianya, Shao Zhenfeng. From Digital Earth to Smart Earth[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 127-132(李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2): 127-132)

[6] Hu Xingyi. Construction of Interplanetary Network of USA[J]. *Space International*, 2007(5): 26-29(胡行毅. 美国行星际因特网的构建[J]. 国际太空, 2007(5): 26-29)

[7] Shi Xibin, Wang Wenyi, Ren Qian. Research of US Military Satellite Communications System[R]. Beijing Research of Relay Transmission Technology of Space Information, Beijing, 2013(史西藏, 王文艺, 任倩. 美国军事卫星通信体系研究[R]. 北京空间信息中继传输技术中心, 北京, 2013)

[8] Space Communication and Navigation Office/NASA. Space Communication and Navigation(SCaN) Network Architecture Definition Document Volume 1 [R]. NASA Headquarters, Washington D C, 2011

[9] Florio M A, Fisher S J, Shaum M. Internet Routing in Space: Prospects and Challenges of the IRIS JCTD[C]. IEEE Military Communication Conference, Orlando, FL, USA, 2007

[10] Bhasin K, Hayden J. Developing Architectures and Technologies for an Evolvable NASA Space Communication Infrastructure[C]. The 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Monterey, CA, 2004

[11] Space Communication Architecture Working Group. NASA Space Communication and Navigation Architecture Recommendations for 2005-2030 [R]. NASA's Glenn Research Center, Cleveland, 2006

[12] Luo Xueshan, Huang Guangqi, Yuan Weiwei. Conceptive Research of Space-Ground Integrated Information Support System[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2002(1): 52-54(罗雪山, 黄光奇, 袁卫卫. 天地一体化信息支持系统概念研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2002(1): 52-54)

[13] Butler D. 2020 Computing: Everything, Everywhere [J]. *Nature*, 2006, 440(7 083): 402-405

(下转第 766 页)

High Precision GPS Tide Measurement Method in a Far-Distance and Transformation Model for the Vertical Datum

ZHAO Jianhu¹ DONG Jiang¹ KE Hao² ZHANG Hongmei³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Based on postprocessor GPS PPK technology, we carried out the research on long-distance tide observation and extraction, the determination of vertical datum and the construction of vertical-datum transformation model. A model for calculating a height series for instantaneous water surface was researched, meanwhile, the best cut-off periods for tidal extraction for anchored and on-the-fly status are proposed. Finally, based on long-term anchor PPK and tide-gauge tidal levels for different situations, a determination of MSL and chart datum as well as the models for calculating their geodetic heights were investigated and proposed. A method to establish a seamless chart datum geodetic height model is presented. An test project showed that the accuracy of GPS tide level reference to chart datum measurement method as presented in paper can be better than 10 cm when the GPS baseline is less than 100 km.

Key words: far-distance GPS tide measurement; GPS tide exaction; chart datum geodetic height

First author: ZHAO Jianhu, PhD, professor, specializes in marine surveying and mapping. E-mail: jhzhao@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376109, 41176068, 40976061; Tianjin Tanggu Science and Technology Development Fund, No. 2012CYH05-04.

(上接第 715 页)

On Construction of China's Space Information Network

LI Deren^{1,2} SHEN Xin^{1,2,3} GONG Jianya^{1,2} ZHANG Jun^{2,4} LU Jianhua^{2,5}

¹ State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China

³ School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

⁵ Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Using space platforms as carriers, spatial information network (SIN) is a new kind of network system that implements real-time data acquisition, fast network transmission and information processing. Through real-time data access/transmission, networks interconnection and cooperative data processing, SIN could realize the integrated application and collaborative service of satellite remote sensing, satellite navigation and satellite communication. Firstly, the concept, function and characteristic of space information network are introduced. Then the significance and necessity of construction of China's SIN are represented after an analysis of development of SIN at home and abroad. Finally, the research objectives and scientific issues for China's SIN construction are discussed.

Key words: space information network; satellite networking; information transmission; collaborative observation; on-board processing

First author: LI Deren, professor, Academician of Chinese Academy of Sciences, Academician of Chinese Academy of Engineering, Academician of Euro-Asia International Academy of Science. He has concentrated on the research and education in geospatial information science and technology represented by RS, GPS and GIS. E-mail: drli@whu.edu.cn

Corresponding author: SHEN Xin, PhD. E-mail: xinshen@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 91438203; China Postdoctoral Science Foundation Funded Project, No. 2014M562006; Independent Research Project of Wuhan University, No. 2042014kf0059.