

★ ★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程
网络强国建设

学术中国 · 空间信息网络系列

Architecture and Applications of Space Information Networks

空间信息网络 体系架构及其应用

任勇 姜春晓 杜军 王景璟 著

国工信出版集团

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程

网络强国建设

学术中国·空间信息网络系列

空间信息网络 体系架构及其应用

Architecture and Applications of
Space Information Networks

任勇 姜春晓 杜军 王景璟 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

空间信息网络体系架构及其应用 / 任勇等著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2019.1
ISBN 978-7-115-46586-3

I. ①空… II. ①任… III. ①卫星通信系统—研究
IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第292847号

内 容 提 要

本书围绕空间信息网络体系架构及其应用,探讨了空间信息网络拓扑理论、协议体系、资源动态配置、安全管理和半实物仿真等主要问题。本书基于现有的空间信息网络体系和近几年对空间信息网络关键技术的研究进展,提出了基于时变图的空间信息网络建模、高吞吐量可靠性传输、业务自适应的资源动态配置和重构、安全防护资源和网络流量管理等方法 and 理论,解决了现有空间信息网络时空频覆盖存在盲区、协作规划能力有限等问题,实现了空间信息网络中信息的有效获取、高效传输和可靠处理。最后,本书介绍了当前受到广泛关注的空间信息网络半实物仿真方法,及其在气象灾害预测预报上的应用。

本书可供高等院校通信与网络、计算机等专业的师生作为教学参考书,也可供信息类相关领域的研究和实践工作者参考。

◆ 著 任 勇 姜春晓 杜 军 王景璟

责任编辑 代晓丽

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 17

字数: 315千字

2019年1月第1版

2019年1月河北第1次印刷

定价: 138.00元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

于 全 中国工程院院士

王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授

王建民 清华大学软件学院院长

王哲荣 中国工程院院士

王 越 中国科学院院士、中国工程院院士

尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授

邓宗全 中国工程院院士

甘晓华 中国工程院院士

叶培建 中国科学院院士

朱英富 中国工程院院士

朵英贤 中国工程院院士

邬贺铨 中国工程院院士

刘大响 中国工程院院士

刘怡昕 中国工程院院士

刘韵洁 中国工程院院士

孙逢春 中国工程院院士

苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士

- 
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

作为国家重要基础设施、科学前沿以及战略制高点，空间信息网络对发展国民经济、提升国际竞争力具有重要作用。为解决现有空间信息网络时空频覆盖存在盲区、协作规划能力有限等问题，亟须开展高效组网机理、资源动态配置、可靠性传输等理论方法研究，从而提高网络化的信息获取、传输与处理能力。本书围绕空间信息网络体系架构及其应用，研究空间信息网络拓扑理论、协议体系、资源动态配置和安全管理等主要问题，并介绍了半实物仿真方法及其应用。半实物仿真系统为空间信息网络相关理论的仿真实现提供了一种有效的手段。

作者在“十一五”“十二五”和“十三五”期间先后承担了多项与信息共享理论及其关键技术相关的国家级和省部级项目。通过国家自然科学基金重大研究计划重点项目“空间信息网络体系架构及其在气象灾害研究中的应用”，研究了空间信息网络体系架构及其协议体系，提出了多星协作的资源动态配置与重构方法，搭建了空间信息网络半实物仿真系统，并验证所提出的理论模型在台风和强对流两类典型自然灾害观测和预报上的应用。通过山东航天创新基金项目“空间信息网络路由技术研究”和“空间信息网络移动管理技术研究”，研究了空间信息网络可靠传输机理，提出了基于多源业务预测的空间信息网络移动管理方法。通过 CAST 创新基金项目“空间信息网络系统体系架构及关键技术研究”，研究了空间信息网络高效组网机理，探索了适合空间信息网络高动态、长时延、间歇性中断特性的协议体系架构。

本书以任勇教授指导的多名博士、硕士的学位论文及相关研究成果为内容基础。全书共分为 7 章。第 1 章为绪论，介绍了空间信息网络的发展信息，以及空间信息网络基本架构和协议体系。第 2 章，空间信息网络拓扑理论，介绍了空间信息网络时变图模型及时间累积时变图模型，提出了一种空间信息网络复杂度分析方法，基



于复杂网络理论和动态矩阵乘积算法对空间信息网络关键节点进行了分析。第3章, 空间信息网络协议体系, 介绍了基于 CCSDS 的空间信息网络协议体系, 提出了适合空间信息网络高动态、长时延传输层拥塞控制方法。第4章, 空间信息网络资源配置, 介绍了基于认知的空间信息网络动态资源配置方法, 基于业务特性的空间信息网络动态资源配置方法和空间信息网络移动性管理。第5章, 空间信息网络安全管理与可靠性分析, 介绍了基于任务规划的可靠性分析与优化方法, 探讨了空间信息网络安全防护资源分配机制和网络流量管理机制, 提出了一种高可靠结构化数据构建方法。第6章, 空间信息网络半实物仿真系统及其应用, 介绍了半实物仿真系统及其在气象灾害预测预报上的应用。第7章, 结论与展望。

本书的撰写汇集了很多人的辛勤劳动。任勇教授负责全书的内容规划和体系架构搭建, 以及撰写过程中的组织和协调工作, 杜军、王景璟、张泽琦、张鑫、关桑海等参加了相关章节的初稿编写, 杜军、王景璟、关桑海等参加了终稿编写; 此外, 本书引述了姜春晓、杜军、王雪霞、王景璟、张泽琦、张鑫、孟越等的前期工作。全书由王景璟统稿, 段瑞洋、张凯、关桑海、侯旭阳、胡泰龙、王超等对全书进行了校对。在此一并表示衷心的感谢。

本书的撰写得到了国家自然科学基金委员会的大力资助。同时, 感谢人民邮电出版社对本书的出版给予的关心和支持! 同时也感谢在本书撰写前后, 很多前辈、同行和学者对于空间信息网络体系架构研究的热情参与, 以及给予我们的鼓励。

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2018年9月于清华大学



目 录

第 1 章 绪 论	001
1.1 空间信息网络及其发展概述	002
1.2 空间信息网络业务和资源简述	005
1.3 空间信息网络体系架构概述	007
1.4 本书章节安排	010
参考文献	012
第 2 章 空间信息网络拓扑理论	015
2.1 引言	016
2.2 空间信息网络时变图模型	017
2.2.1 时变图模型	018
2.2.2 时变连接和时变路径	019
2.2.3 时变距离	020
2.3 基于复杂理论的空间信息网络时间累积时变图	021
2.3.1 空间信息网络高动态建模	023
2.3.2 基于时间累积时变图的空间信息网络复杂性分析	025
2.3.3 基于 C-TVG 的复杂性分析在空间信息网络中的应用	030
2.3.4 仿真分析	031
2.4 空间信息网络关键节点分析	036
2.4.1 关键节点与网络抗毁性	036
2.4.2 时变介数中心性	039
2.4.3 时变介数计算方法——动态矩阵乘积算法	041
2.4.4 仿真分析	045
2.5 本章小结	050
参考文献	050
第 3 章 空间信息网络协议体系	055
3.1 引言	056
3.2 基于 CCSDN 的空间信息网络协议体系	057



3.2.1	CCSDS 简介	057
3.2.2	基于 CCSDS 的协议体系架构	057
3.2.3	CCSDS 主网业务	061
3.3	SCPS 协议简介	064
3.3.1	SCPS-NP	066
3.3.2	SCPS-SP	067
3.3.3	SCPS-TP	067
3.3.4	SCPS-FP	068
3.4	基于 TCP/IP 的空间信息网络协议体系	068
3.4.1	TCP/IP 协议体系	068
3.4.2	空间信息网络路由技术介绍	070
3.4.3	CCSDS 与 TCP/IP 结合的协议体系	071
3.5	基于 DTN 的空间信息网络协议体系	072
3.5.1	DTN 简介	072
3.5.2	DTN 协议特点	073
3.5.3	束协议	076
3.5.4	汇聚层协议	076
3.6	空间信息网络传输层协议	078
3.6.1	TCP 及其改进	078
3.6.2	空间信息网络传输层协议	080
3.6.3	针对空间信息网络 TCP 的改进	086
3.7	本章小结	093
	参考文献	095
第 4 章	空间信息网络资源配置	099
4.1	引言	100
4.2	基于认知的空间信息网络动态资源配置	101
4.2.1	空间信息网络高动态建模	103
4.2.2	基于认知的中继协作机制与资源动态分配协议	108
4.2.3	基于系统稳定的中继资源优化分配	110
4.2.4	仿真分析	114
4.3	基于业务特性的空间信息网络动态资源配置	120
4.3.1	系统模型	122
4.3.2	基于离散小波分解的 BP 神经网络流量预测系统	126



4.3.3 基于预测背压的服务资源分配	131
4.3.4 仿真分析	135
4.4 空间信息网络移动性管理	141
4.4.1 基于时变图模型的空间信息网络高效地址绑定新方法	141
4.4.2 基于信号强度、QoS 历史信息及运动模型的空间信息网络切换综合 判决方法	151
4.4.3 仿真分析	157
4.5 本章小结	159
参考文献	161
第 5 章 空间信息网络安全管理与可靠性分析	167
5.1 引言	168
5.2 空间信息网络任务规划的可靠性分析与优化	176
5.2.1 对地观测卫星任务规划问题建模	177
5.2.2 基于冗余度分配的可靠性优化模型	179
5.2.3 任务规划的可靠性优化问题建模与求解	181
5.2.4 仿真分析	187
5.3 空间信息网络传输的可靠性分析与防护策略	191
5.3.1 通信网络节点模型和流量模型	193
5.3.2 基于防护资源分配的网络传输可靠性优化模型	196
5.3.3 仿真分析	203
5.4 空间信息网络流量管理机制	206
5.4.1 基于时变介数中心性的流量调度机制	207
5.4.2 时变介数中心性均衡路由算法	209
5.4.3 仿真分析	213
5.5 空间信息网络高可靠结构化数据构建	216
5.5.1 生成对抗网络	218
5.5.2 基于 LSTM 网络的气象灾害观测数据链式特征学习模型	221
5.5.3 基于 GAN 和 LSTM 网络的气象灾害结构化数据构建	227
5.5.4 仿真分析	230
5.6 本章小结	232
参考文献	233



第 6 章 空间信息网络半实物仿真系统及其应用	239
6.1 引言	240
6.2 半实物仿真系统组成	240
6.2.1 STK	240
6.2.2 STK 与 MATLAB 联合仿真	241
6.2.3 半实物仿真系统整体架构	243
6.3 仿真系统工作原理——卫星信道建模	244
6.4 应用：灾害事件的时空协同信息感知	247
6.4.1 台风数据	248
6.4.2 拓扑分析	248
6.4.3 基于链路预测的协同转发方法	248
6.4.4 仿真结果	250
6.5 本章小结	252
参考文献	252
第 7 章 结论与展望	253
名词索引	257



第1章 绪 论

空间信息网络,是以空间平台(如同步卫星或中低轨卫星、平流层气球、飞机等)为载体,结合地面网络节点,完成空间信息的获取、预处理、传输、再处理任务的网络化系统。其网络模型和体系架构的研究,一直备受国内外学术界、工业界和国防应用领域关注。本章介绍空间信息网络基础概念和国内外研究现状。



| 1.1 空间信息网络及其发展概述 |

空间信息网络,是以空间平台(如同步卫星或中低轨卫星、平流层气球、飞机等)为载体,结合地面网络节点,完成空间信息的获取、预处理、传输、再处理任务的网络化系统。作为国家重点发展的基础设施之一,空间信息网络在全球变化、防灾减灾、应急救援、远洋航行、导航定位、航空运输、航天测控等重大应用中发挥着越来越重要的作用,特别是在大空间尺度时空关联数据的获取方面,有着不可替代的重要作用。空间信息网络在节点功能、网络结构和应用驱动等方面,有着与地面网络不同的特点。第一,网络节点具有感知和传输双重功能,而且空间载荷能力受限;第二,网络具有异构高动态拓扑结构及其不可预知的时变性;第三,节点间传输延迟动态范围大,而且空天电磁环境复杂,导致传统的 TCP 协议失效;第四,空间信息网络的工作状态与应用紧密相关——节点探测能力、传感器时空协同、网络拓扑结构、网络协议体系之间,存在着紧耦合的关联关系,网络具有动态配置、按需任务聚合与协调控制重构等能力。相比之下,地面网络的主要功能则在于信息的存储和转发,本质上是一个单纯的通信网络。对于这样一个复杂的信息系统的网络模型和体系架构的研究,是国内外学术界、工业界和国防应用领域一直关注而尚未解决的热点。研究在一定程度上解决这一难题,具有极其重要的理论意义和实际应用价值。



从20世纪90年代起,世界各国普遍重视并大力发展空间信息网络。美国、俄罗斯等国及欧盟针对不同需求已规划研发了一系列天基监测系统。在空间信息网络体系架构方面,最具代表性的是美国国家航空航天局在2004年提出的星际互联网(Interplanetary Internet, IPN)^[1]体系架构和国际组织空间数据系统咨询委员会(CCSDS)协议体系。美国在全球各地都能部署地面站,航天器的探测数据可以随时发送给最近的地面接收站,通过地面网络进行传输处理。

1998年,美国喷气推进实验室(JPL)启动的星际互联网项目,主要研究地球以外使用互联网实现端到端通信的方案。该项目已完成相关体系架构、数据格式的初步定义,形成了相关互联网工程任务组(IETF)协议草案。

2000年10月,JPL开展了名为下一代空间互联网(NGSI)的项目研究。NGSI下设4个工作组,分别研究动态利用空间链路、多协议标签交换协议、移动IP和安全问题。考虑到CCSDS建议是专为空间链路设计、经过多次航天任务考验的,并考虑到保护已有的投资及国际互联网,NGSI在数据链路层仍使用CCSDS建议,对现有的多协议标签交换协议、移动IP进行了适合空间任务的扩展。通过概念研究、部分硬件开发和仿真试验,NGSI提出了一套基于CCSDS的空间互联网有关建议。

2001年,美国哥达德航天中心开展了名为OMNI(Operating Mission as Nodes on the Internet)^[2-3]的研究项目,主要研究利用地面商用IP协议实现空间通信的方案。OMNI利用IP网络、数据中继卫星(TDRSS)开展了地面试验,并在航天飞机上进行了飞行搭载试验。OMNI证明了在空间使用地面IP协议的可行性。

2004年,美国集合包括宇航局、大气与海洋局、国家科学基金、环保局、能源部、陆海空三军、国务院以及白宫在内的18家单位联合编制了美国集成对地观测系统(IEOS)^[4]的战略计划,该计划为美国对地观测系统的未来发展提供一个整体性的框架,美国全球对地观测系统(GEOSS)^[5-6]十年执行计划将按这一框架来制定和执行。作为IEOS计划的近期目标之一,美国已在2007财年计划中启动了自然灾害预警系统研究发展计划。

2004年,欧洲共同体通过了全球环境与安全监测(GMES)执行计划^[7-8]。该计划将卫星数据和地面数据进行有机结合,包括一体化对地观测网络的整体发展框架,为欧洲环境与安全决策系统提供支持,同时也提供面向对象的对地观测服务。

目前,美国、俄罗斯,以及欧盟等国针对不同探测需求已规划、研发了一系列



天基监测系统,代表性的系统包括:美国的天基监测系统(SBSS)^[9]、天基雷达(SBR)系统^[10]、天基红外系统(SBIRS)^[11],欧盟规划的数据中继卫星星座(EDRSS),俄罗斯的全球预警探测系统等。除了这些针对军事目标的监测系统,如前所述,多国也制定了一系列对地观测发展规划^[12]。

我国始终把发展航天事业作为国家整体发展战略的重要组成部分,在“十一五”“十二五”“十三五”期间投入了相当的人力、物力、财力进行空间科学技术的研究开发。我国在一系列重大研究计划、科技工程的推动下,近年来在航天运输系统、人造地球卫星、载人航天、深空探测、航天发射场、航天测控等领域取得了若干重要成果。目前已基本建成“风云”“海洋”“资源”“遥感”“天绘”等卫星系列和“环境与灾害监测预报小卫星星座”。这些卫星获取的探测数据在相关领域的研究中发挥着越来越重要的作用。例如,“风云”卫星系列实现对台风、雨涝等灾害的监测,提升了气象预报和气候变化监测的能力;“遥感”“天绘”卫星系列在国土资源普查、地图测绘等领域发挥了重大作用;“北斗”“天链”等重大工程项目的实施,也为我国空间信息网络建设的大力推进奠定了一定的基础。

空间信息网络体系架构研究是空间信息网络研究和建设的重要基础,在空间信息网络体系架构方面,最具代表性的研究成果是美国国家航空航天局在2004年提出的星际互联网体系架构^[13],该体系包括主干网络、接入网络、星座或编队组网、近距网络这4类要素。从目前国际航天任务中空间信息网络协议体系的研究和应用情况来看,主要有4种协议体系^[14]:基于CCSDS的协议体系^[15]、基于TCP/IP的协议体系、将CCSDS与TCP/IP结合的协议体系、基于容延迟/中断网络(Delay/Disruption Tolerant Networks, DTN)^[16-17]的协议体系。我国在空间信息网络的体系架构和协议等方面也进行了大量的研究,已有一定的技术积累,我国航天测控领域专家沈荣骏院士也提出了与“星际互联网”类似的天地一体化航天互联网体系架构^[18]。

此外,与地面网络不同,空间信息网络是一个大容量、多层次异构复杂网络化系统,承载海量、多维、时空协同信息,适应实时、高动态通信环境。因此,空间信息网络需要实现高动态的网络配置与重构。这方面的研究主要针对具体空间信息网络应用问题^[19-20]。以气象灾害应用为例^[21],我国气象工作者开发完成了卫星天气应用平台(SWAP)以及卫星遥感监测分析系统(SMART),两者包含了台风、对