



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

Cooperative Transmission and Resource Management in Space Information Networks

空间信息网络 协同传输与资源管理

匡麟玲 靳瑾 姜春晓 吴胜 陆建华 于全 著



中国工信出版集团



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 协同传输与资源管理

Cooperative Transmission and Resource
Management in Space Information Networks

国麟玲 靳瑾 姜春晓 吴胜 陆建华 于全 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

空间信息网络协同传输与资源管理 / 匡麟玲等著

— 北京：人民邮电出版社，2019.1

ISBN 978-7-115-50259-9

I. ①空… II. ①匡… III. ①卫星通信系统—数据传
输②卫星通信系统—资源管理 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第265577号

内 容 提 要

本书针对空间信息网络动态拓扑下的传输和资源优化理论与方法展开研究,面向国家自然科学基金委员会“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划涉及的第二个科学问题,即空间动态网络高速传输理论与方法。本书重点关注了3个关键基本问题:空间频谱资源使用和共享方法、空间多星多波束信号协同处理方法,以及空间资源管理和优化。全书共12章,分为3个部分:首先研究空间信息网络不同轨道星座之间以及空间网络与地面网络之间的同频干扰特征规律,分析空间信息网络频谱使用与共享方法;在此基础上,进一步研究空间信息网络中多星多波束间的干扰机理及协同处理机制,提出星间与星地的协同干扰消除方法;最后讨论了空间信息网络无线资源优化配置问题,研究了空间多类资源的相互耦合和约束关系,建立异构网络资源统筹规划模型,提出星地一体化资源管理方法。

本书可作为空间信息网络相关专业研究生的教材,也适合从事相关领域研究的科研工作者阅读与参考。

◆ 著 匡麟玲 靳 瑾 姜春晓 吴 胜 陆建华 于 全

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: 710×1 000 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: 128.00 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

空间信息网络是以空间运动平台（包括卫星、飞艇和飞机）为载体，实时获取、传输和处理空间信息的网络系统，向上可支持深空探测，向下可支持对地观测、通信传输、时空基准等应用。空间信息网络具有不依赖地面站点、全球化广域覆盖、带宽分配灵活、业务应用多样、网络可拓展性强等独特优势。为了抢占未来网络的发展先机，各大国纷纷启动了空间信息网络相关的研究项目，研究涉及空间信息系统的基础理论和关键技术、相关的基础设施以及系统应用等各个层面。

与地面信息网络相比，空间信息网络仍处于早期研究阶段，尚未形成特定的网络体系架构。发展空间信息网络的困难在于大时空尺度下的网络与信息理论尚未建立，面临受限空间资源下的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科学挑战。其核心基础难题在于大时空跨度下的空间信息网络建模和动态组网、时变空变网络的高速信息传输以及稀疏观测数据与连续信息服务的矛盾。此外，空间信息网络的系统容量、响应时间、安全性能等指标设计及优化也面临着新的挑战，迫切需要技术架构、协议体系和应用服务等创新。

在空间信息网络中，信息传输技术是提升信息时效性的重要手段，需要在在大尺度时变、空变的环境下提供端到端高速可靠传输。相比于传统传输理论研究考虑的平稳链路、独立同分布噪声、泊松无记忆业务的场景，空间信息网络中信息传输场景更加复杂：首先在辐射/接收机制方面，由于距离远且方位变化频繁，链路体现出显著的非平稳特性；其次，在网络节点环境，由于空间信息网络的广域覆盖和空间开放等特点，节点的耦合干扰特征显著；最后，在业务需求上，需要从无记忆随机请求模式转变为可规划的过程模式。空间信息网络发展面临新的科学与技术难题，需要突破常规



框架。本书主要研究成果在国家自然科学基金委员会“空间信息网络基础理论与关键技术”重大研究计划支持下完成。围绕空间动态网络高速传输理论与方法的科学问题,从空间动态网络传输和资源优化方法出发,重点关注了3个关键基本问题:空间频谱资源使用和共享方法、空间多波束信号协同处理方法,以及空间资源管理和优化。

本书的第一部分为空间信息网络频谱共享。第2章介绍系统间同频共存的相关无线电规则框架及同频干扰分析模型;第3章主要研究 GEO 与 N GEO 通信系统的频谱共享问题;第4章讨论 N GEO 通信系统间的同频干扰问题;第5章针对 GEO 系统、感知 N GEO 系统和干扰 N GEO 系统共存的场景,考虑卫星通信系统多级功率控制的实际工作方式,研究了频谱感知技术的应用。第二部分为空间信息网络多用户信号协同处理问题。第6章建立空间信息网络多波束模型;第7章介绍多波束多用户协同信号处理方法,提出反向波束内和波束间干扰处理技术;第8章研究星地协同网络中的干扰估计与消除方法。第三部分为空间信息网络资源管理与优化。第9章以中继卫星系统为例,研究了空间天线资源的任务调度问题;第10章研究了空间异构网络一体化资源管理方法;第11章研究空间信息网络用户的资源竞争行为,提出了基于重复博弈的资源管理架构;第12章针对星地协同网络的联合资源管理问题,提出了两种星地协同网络资源分配方法。

本书作者所在的科研团队多年来一直致力于空间信息网络协同传输与资源管理等方面的相关研究工作,具有较好的理论及工程实践基础。

在此,我们要感谢一起奋斗的同事们,包括葛宁研究员、殷柳国研究员、晏坚副研究员、倪祖耀副研究员等,他们对本书的完成给予了诸多建议和帮助。此外,还要特别感谢为本书的整理及校对而辛勤工作的学生们,包括张弛、朱向明、贾浩歌、王磊、林新聪、钟远智、李婷等。

另外,感谢国家自然科学基金项目(编号:91438206, 91538203, 91638205, 61621091, 91738101)对本书的资助。

最后,十分感谢家人对作者工作的大力支持和理解。

由于作者水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬请读者批评指正。

作者



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 空间信息网络的概念与内涵	002
1.2 国内外发展现状	002
1.3 空间信息网络发展面临的科学和技术难题	005
1.4 本书内容	005

第一部分 空间信息网络频谱共享

第 2 章 空间信息网络频谱干扰特征与模型	011
2.1 ITU 空间信息网络频谱相关规则	012
2.1.1 频谱划分	012
2.1.2 频谱共享约束	014
2.1.3 卫星频率协调	016
2.2 同频干扰建模方法	018
2.2.1 卫星系统间干扰分析数学模型	018
2.2.2 干扰分析软件建模的相关介绍	021
2.3 频谱干扰规避方法及策略	022
2.3.1 空域分隔	022
2.3.2 功率控制	023
2.3.3 其他方法	023
2.4 本章小结	024
参考文献	024

第 3 章 GEO 卫星通信系统与 N GEO 卫星通信系统频谱共享	027
3.1 引言	028
3.2 单个 N GEO 卫星对 GEO 卫星系统的干扰分析	029
3.2.1 系统干扰仿真分析流程	029
3.2.2 干扰仿真模型建立	032
3.2.3 干扰仿真结果分析	035



3.3 相轨迹分析方法	043
3.3.1 相轨迹分析方法步骤	044
3.3.2 干扰建模仿真	047
3.3.3 干扰仿真分析结果	048
3.4 频谱共享方法分析	054
3.4.1 系统模型	054
3.4.2 角度隔离	056
3.4.3 保护区	059
3.4.4 仿真分析	063
3.5 本章小结	066
参考文献	067
第4章 N GEO 卫星通信系统间的频谱共享与分析方法	069
4.1 引言	070
4.2 OneWeb 卫星通信系统对 O3b 卫星通信系统的干扰仿真建模分析	071
4.2.1 OneWeb 卫星通信系统对 O3b 卫星通信系统的干扰仿真分析结果	073
4.2.2 干扰量级和时间分布	074
4.3 链路夹角概率分析方法	076
4.3.1 链路夹角限值阈值计算方法	076
4.3.2 有害干扰概率计算	078
4.3.3 N GEO 星座间干扰的仿真结果	079
4.4 本章小结	082
参考文献	082
第5章 N GEO 卫星通信系统和 GEO 卫星通信系统中的频谱感知技术	085
5.1 引言	086
5.2 频谱感知场景和系统模型	087
5.2.1 下行链路场景	087
5.2.2 上行链路场景	090
5.3 频谱感知策略	093
5.3.1 下行链路场景	093
5.3.2 上行链路场景	100
5.4 算法性能仿真分析	102
5.4.1 下行链路场景	103



5.4.2 上行链路场景	105
5.5 本章小结	107
5.6 本部分小结	108
参考文献	109

第二部分 空间信息网络多用户信号协同处理

第6章 空间信息网络多波束干扰模型	115
6.1 研究意义	116
6.2 模型特性分析	118
6.3 干扰分析	119
6.3.1 全景多波束干扰特征	119
6.3.2 动态多波束干扰特征	120
6.3.3 混合多波束干扰特征	120
6.4 信道建模	121
6.4.1 自由空间损耗	121
6.4.2 小尺度衰落	122
6.4.3 波束辐射方向增益	122
6.5 本章小结	124
参考文献	124
第7章 多波束多用户协同信号处理方法	127
7.1 反向链路多用户及多波束干扰处理技术	128
7.1.1 CDMA 多用户干扰的影响分析	128
7.1.2 反向波束内 CDMA 多用户干扰处理	130
7.1.3 反向波束间干扰处理技术	139
7.2 前向链路多波束干扰处理技术	149
7.3 本章小结	155
参考文献	156
第8章 星地协同网络的干扰估计与消除方法	157
8.1 研究背景	158
8.2 基于位置信息的星地协同网络的干扰协调方法	159
8.2.1 星地协同通信系统框架	159



8.2.2 基于位置信息的干扰协调方法	161
8.2.3 干扰协调方法精度分析	163
8.2.4 仿真结果	166
8.3 基于信道信息的星地协同网络干扰协调方法	167
8.3.1 系统模型与框架	167
8.3.2 拉格朗日对偶方法	169
8.3.3 仿真结果	170
8.4 本章小结	171
8.5 本部分小结	171
参考文献	172

第三部分 空间信息网络资源管理与优化

第9章 中继卫星系统任务调度	177
9.1 引言	178
9.2 任务特征	179
9.3 任务需求预处理	181
9.4 资源管控总体架构与任务调度模型	183
9.5 任务调度算法	186
9.6 本章小结	191
参考文献	192
第10章 空间异构网络的资源管理与应急资源调度服务	195
10.1 空间异构网络一体化资源管理方法	196
10.1.1 空间异构网络一体化资源管理架构	196
10.1.2 空间异构资源管理服务	198
10.2 空间异构网络中的应急资源调度	202
10.2.1 应急调度策略	203
10.2.2 资源调度模型	205
10.2.3 资源调度算法	207
10.2.4 场景设置与仿真	210
10.3 本章小结	212
参考文献	212



第 11 章 空间信息网络资源竞争行为协调方法	215
11.1 引言	216
11.2 问题描述与建模	217
11.3 用户资源竞争行为分析	219
11.4 用户合作机理	221
11.5 有限惩罚与宽容策略	223
11.6 本章小结	229
参考文献	230
第 12 章 星地协同网络的联合资源管理方法与技术	233
12.1 引言	234
12.2 星地协同网络中的功率分配	235
12.2.1 星地协同网络系统框架	235
12.2.2 最优功率分配策略	237
12.2.3 仿真结果	239
12.3 基于云处理的星地协同网络中的资源分配方法	241
12.3.1 基于云处理的星地协同网络框架	241
12.3.2 最优子信道和功率分配方法	244
12.3.3 仿真结果	247
12.4 本章小结	249
12.5 本部分小结	250
参考文献	251
名词索引	255



第1章 绪 论

作为全书的绪论，本章首先介绍了空间信息网络概念和内涵；其次，通过分析国内外的发展现状，指出了当前空间信息网络发展存在的问题，并探究了未来的发展方向；同时，本章还分析了空间信息网络在空间动态网络高速传输方面所面临的科学和技术难题；最后介绍了本书的基本研究内容和总体结构。



| 1.1 空间信息网络的概念与内涵 |

空间信息网络是以空间运动平台（包括卫星、飞艇和飞机）为载体，实时获取、传输和处理空间信息的网络系统，向上可支持深空探测，向下可支持对地观测等应用。空间信息网络具有全球化广域覆盖、带宽分配灵活、业务应用多样、网络可拓展性强等独特优势。空间信息网络向下可支持陆地、海洋、大气空间等全方位应用，向上可延伸到星际科学研究，从而将人类科学、文化、生产活动拓展至前所未有的领域。

与地面信息网络相比，空间信息网络仍处于早期研究阶段，尚未形成特定的网络体系架构。空间信息网络在发展中的困难在于大时空尺度下的网络与信息理论尚未建立，面临受限空间资源下的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科学挑战。其核心基础难题在于大时空跨度下的空间信息网络建模和动态组网、时变空变网络的高速信息传输以及稀疏观测数据与连续信息服务的矛盾。

| 1.2 国内外发展现状 |

地面 Internet 发展 50 年来，已形成以自治互联和 TCP/IP 协议分层为核心的网



络架构。移动蜂窝网发展 30 余年,形成了蜂窝接入网和 IP 核心网相结合的架构。当前,空间信息网络还处于早期研究阶段,尚未形成特定的网络体系架构。

现有卫星移动通信网络提供的业务类型分为固定卫星服务(Fixed Satellite Service, FSS)和移动卫星服务(Mobile Satellite Service, MSS)。FSS 通常扮演着“无线光纤”的角色,如 Spaceway3、WGS、ViaSat、Ka-Sat 等,采用频分多址/时分多址(FDMA/TDMA)技术体制框架,下行多基于 DVB-S/DVB-S2 标准或类似协议,上行采用运营商各自的多频时分多址(MF-TDMA)协议,尚未形成统一标准。MSS 通常扮演着“空间基站”的角色,其技术体制一般基于地面移动通信网络技术经过适应性改进而成,如铱星系统采用类似全球移动通信系统(GSM)的技术体制、全球星采用类似窄带码分多址(NCDMA)的技术方案、海事卫星系统的卫星移动业务采用类似地面移动通信 3G 技术、美国的移动用户目标系统(MUOS)采用宽带码分多址(WCDMA)的技术方案等。

随着全球移动宽带互联需求的不断增长,FSS 正试图将原有的宽带业务移动化,如 WGS、ViaSat 等;MSS 正试图将原有的移动业务宽带化,如铱星二代(Iridium-Next)、Inmarsat-5。实际上,两者也正在逐步融合,以期提供全球化的宽窄带灵活服务。但与地面 Internet 和移动蜂窝网发展不同的是,地面网络正逐步走向协议标准化,而卫星通信服务运营商普遍采用各自的协议,要形成全球统一的空间信息网络协议架构尚待时日,同时也潜在巨大的发展空间。

近年来,世界发达国家正通过商业资本、空间资源和科技优势整合互联网服务与卫星网络资源,大力发展全球化的互联网业务,为在利用卫星提供互联网服务的竞争中占得先机,国际上一些新兴科技公司已纷纷行动起来。2013 年 6 月,谷歌(Google)公司投资的 O3b 卫星网络 8 颗卫星发射入轨,打造服务偏远地区和海洋用户的“空中光纤”,投入商用半年便获得 1 亿美元收入,2018 年 5 月,O3b 星座在轨卫星数升至 16 颗,总容量达到 240 Gbit/s,并计划在 2019 年继续发射下一代 4 颗 mPower 卫星。谷歌公司的商业成功促使了大量科技公司投入空间信息网络这个新兴领域。

2017 年 2 月,美国 OneWeb 公司在其总容量达 5 Tbit/s 的 720 颗低轨卫星星座计划基础上,提出了未来 2 000 颗卫星组成的“星座互联网”计划,这一计划获得了美国联邦通讯委员会(Federal Communications Commission, FCC)的批准,被允许进入美国市场。2017 年 3 月,美国 SpaceX 公司在此前不少于 4 257 颗小卫星的 STEAM 互联网星座基础上,又提出了发展基于 V 频段的由 7 518 颗卫星组成的低