



空间激光微波 混合信息网络技术

李勇军 赵尚弘 姜勇 编著

上海科学技术出版社

空间激光微波 混合信息网络技术

李勇军 赵尚弘 姜 勇 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要介绍微波激光空间信息网络的基本概念、组成和国内外发展趋势,从整体组网架构和协议、物理层星座设计和拓扑控制、多址接入、路由交换到资源调度等方面,介绍和阐述了空间信息网络体系架构、CCSDS 空间信息网络协议、一般星座设计方法、空间信息网络动态拓扑控制机制、多址接入方法、星上微波激光混合交换以及混合链路资源调度方法。可供高等院校信息与通信工程专业高年级本科生和研究生、空间信息网络专业科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

空间激光微波混合信息技术 / 李勇军, 赵尚弘,
姜勇编著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2021. 9
ISBN 978-7-5478-3413-8

I. ①空… II. ①李… ②赵… ③姜… III. ①卫星通
信系统—研究 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第178343号

空间激光微波混合信息技术
李勇军 赵尚弘 姜勇 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 25 插页 1

字数 560 千字

2021年9月第1版 2021年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-3413-8/TN·30

定价: 168.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

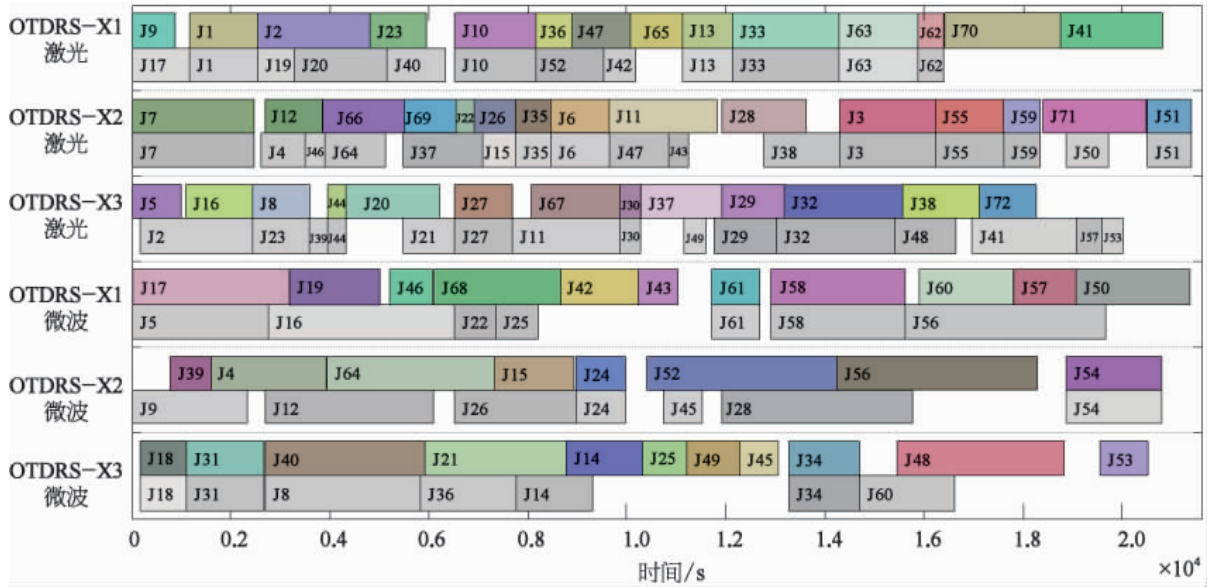


图 9-24 完全重调度方案甘特图

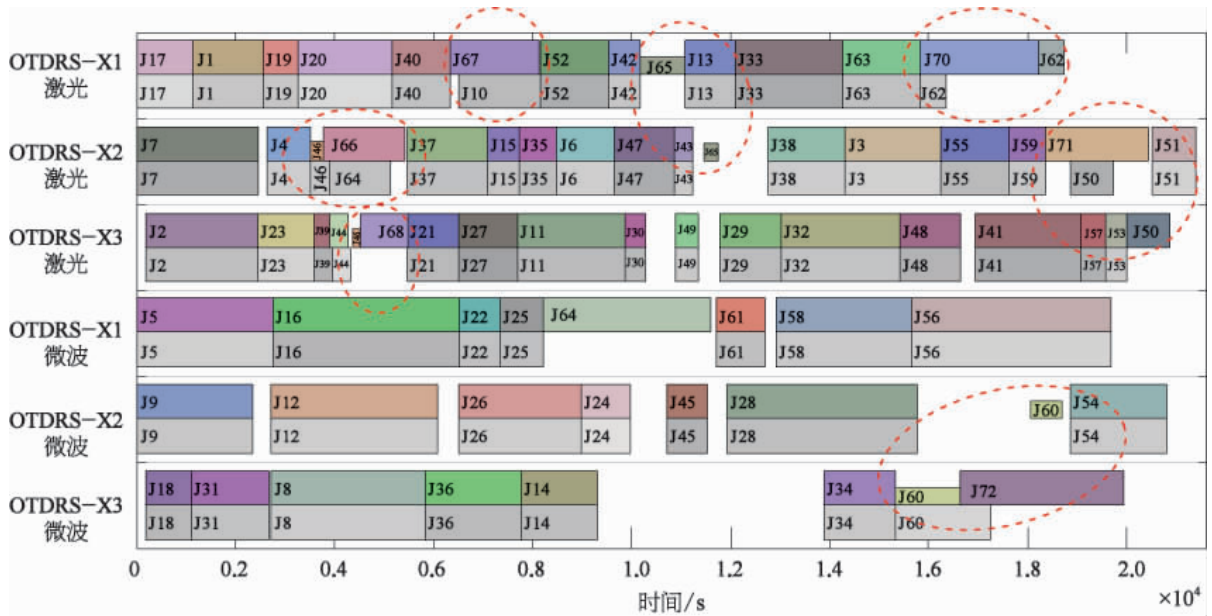


图 9-25 无抢占的快速动态调度算法甘特图

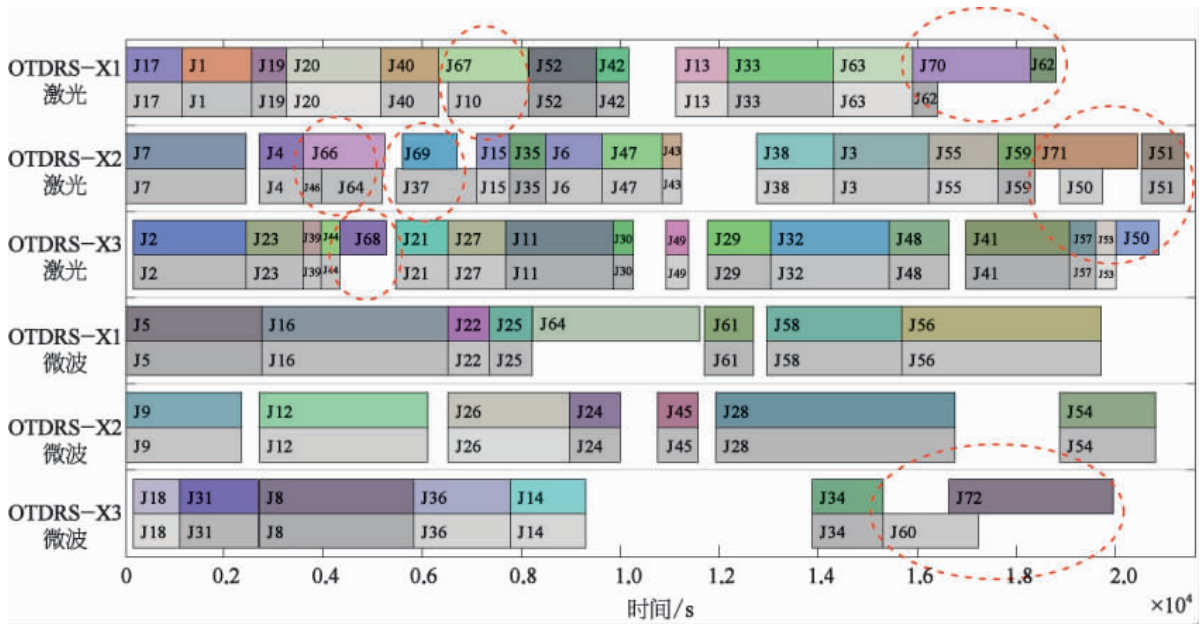


图 9-26 抢占式快速动态调度算法甘特图

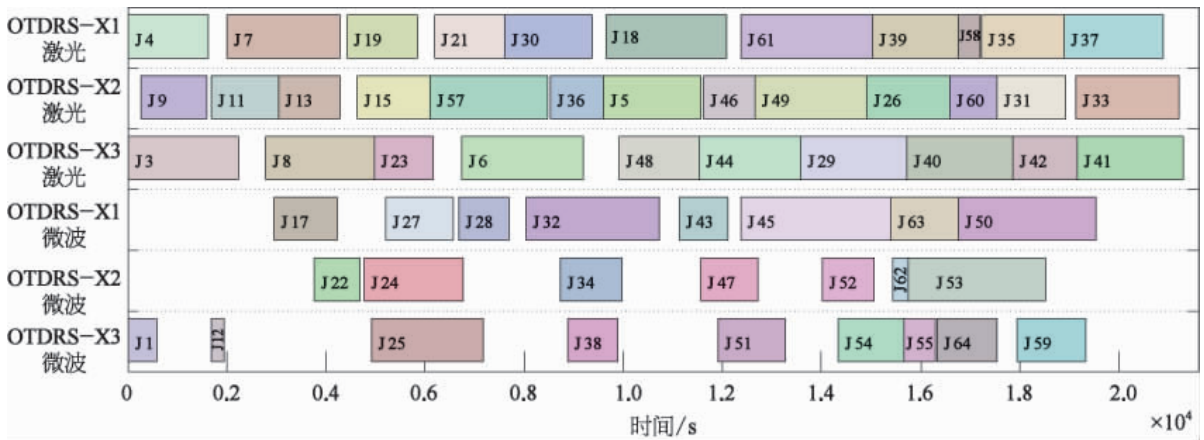


图 9-36 整传调度结果甘特图

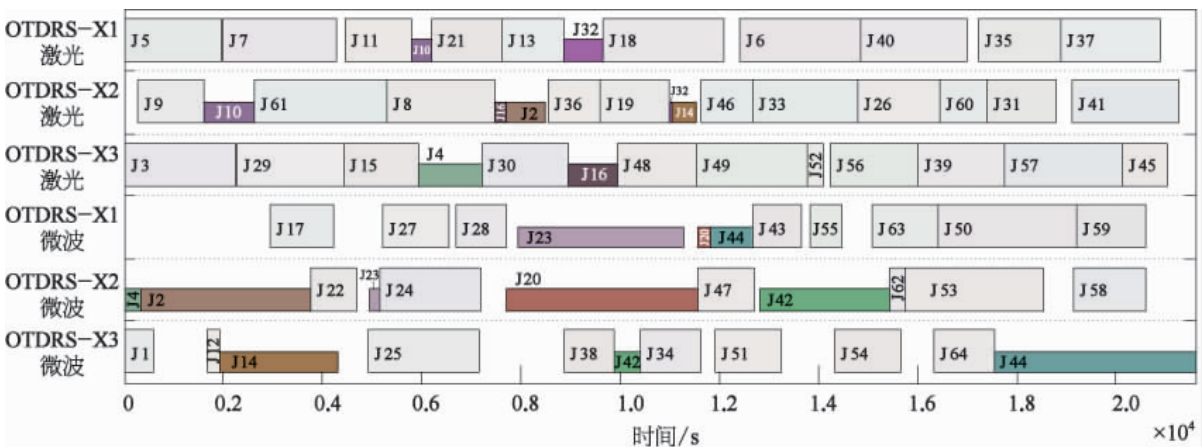


图 9-37 续传调度结果甘特图

序 | Foreword

我国正处于天地一体化信息网络发展进程的关键时期,鸿雁、虹云系列移动互联网星座,中星系列通信卫星,高分辨率对地观测卫星,天链系列数据中继卫星,载人航天与探月、探火工程各类航天器系统,均呈现出全域覆盖、网络扩展和协同应用的发展趋势。其对空间数据传输速率和实时性要求不断提高,单通道速率达每秒千兆比特量级,超出了当前微波传输的能力极限,激光已成为空间高速数据传输的新兴载体。因此,未来天地一体化信息网络必将是微波和激光两者优势互补建立的混合链路信息系统,以此构建可实现空间海量信息高速传输、实时处理以及各类用户随遇接入的空间信息基础设施。

作者及其所在团队长期从事空间激光通信及组网技术的研究,特别是针对空间信息网络中激光和微波链路融合问题,开展了细致深入的研究,取得了富有特色的研究成果。工作之余,研究团队将多年的研究成果编著成册,与国内外同行进行交流展示,有助于推动空间信息网络的工程化应用。我有幸先看了书稿,全书以激光微波混合链路为出发点,从网络体系架构、组网协议、拓扑控制、多址接入、路由交换到资源调度6个方面进行论述,系统介绍了相关理论、技术和方法,既有前人研究成果,亦有编者的研究心得,非常值得学习和借鉴。

总体看,全书内容丰富、结构严谨、论点新颖,非常适合空间信息网络专业学生、老师和初入该领域的科研人员。我愿向关心和志在献身空间信息网络的各位推荐此书,也衷心希望国内同行加强合作交流,推动空间网络不断向前发展,尽快进入工程化应用阶段。



哈尔滨工业大学航天学院教授

前言 | Preface

激光微波混合是我国未来空间信息网络的基本形式,它是以同步轨道卫星或分布式星群为中继节点,以激光、微波为主要传输手段,具有稳定可靠的高速信息传输能力、全球化覆盖能力、智能化运行管理能力、标准化体系规范的空间信息基础设施。要建立激光微波混合空间信息网络,激光与微波链路必然要由简单并存向深度融合演进,由此给网络组网协议、多址接入方式、光电混合交换和路由选择方法以及资源调度算法等带来了新的挑战。

笔者及其团队长期从事卫星光通信及组网技术方面的教学和科研工作,先后承担过国家高技术发展研究计划(863)项目和国家自然科学基金重大计划培育项目,同时承担“卫星光通信”和“空间信息网络”的课程教学,于2010年出版专著《卫星光网络技术》。笔者在多年教学讲义的基础上,结合相关论文和课题组的研究成果完成了本书。全书首先介绍了空间信息网络的概念内涵,然后分别从组网协议、拓扑控制、多址接入、路由交换和资源调度等方面系统介绍了激光微波混合信息网络的关键技术。由于激光链路组网还未真正进入大规模组网应用阶段,有些章节主要借鉴微波信息网络组网方法,有些章节从混合链路组网的角度去分析,期望给初涉该领域的研究者和相关专业的研究生、本科生提供一个较为系统的入门读物。

全书共9章,分为两个部分。第一部分为第1~3章,介绍基本概念和组网架构及协议。第二部分为第4~9章,主要介绍关键技术,分别从物理层的星座设计和拓扑控制、数据链路层的多址接入技术、路由层的光电混合交换方法以及混合链路资源调度方法4个方面进行论述。

李瑞欣老师承担了第8章的撰写;研究生郑永兴参与了第5、第6章的撰写;研究生李信、李海、彭聪、黄蓝峰等参与了全书的资料整理和图表绘制工作,在此一并表示感谢。

由于本人知识水平有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

第1章 概论	001
1.1 基本概念和特点	001
1.2 组成和结构	002
1.2.1 空间段	004
1.2.2 运控段	004
1.2.3 用户段	004
1.3 空间信息网络组网方式	005
1.4 国外研究进展	006
1.5 国内研究进展	018
1.6 发展趋势	023
第2章 空间信息网络体系架构	025
2.1 数据链路层协议	026
2.1.1 FDMA/DAMA 数据链路层协议	026
2.1.2 MF - TDMA 数据链路层协议	028
2.1.3 卫星 ATM 网络数据链路层协议	032
2.1.4 CCSDS AOS 数据链路层协议	034
2.2 网络层路由协议	036
2.2.1 空间信息网络路由协议分析	036
2.2.2 单播路由协议适应性分析	038
2.2.3 组播路由协议适应性分析	041
2.2.4 典型卫星网络路由解决方案及优化	042
2.3 传输层 TCP 协议增强技术	050
2.3.1 TCP 流程及传输控制机制	050
2.3.2 TCP 在卫星网络中的适应性分析	053

2.3.3	卫星网络 TCP 增强技术	055
2.4	应用层协议增强技术	064
2.4.1	应用层协议及星上适应性分析	064
2.4.2	HTTP 协议及卫星适应性分析	066
2.4.3	常用 HTTP 增强技术	069
2.4.4	HTTP 增强技术在卫星网络中的应用及优化设计	076
第3章	CCSDS 空间信息网络协议	079
<hr/>		
3.1	CCSDS 空间通信协议历史	079
3.2	CCSDS 协议分层	080
3.3	CCSDS 空间通信协议的主要特征	083
3.4	CCSDS 空间通信协议配置实例	086
3.4.1	使用 CCSDS 定义的分组实现端到端前向传送	087
3.4.2	端到端路由的 IP over CCSDS	087
3.4.3	端到端前向传输的 CFDP	088
3.5	TC 数据链路层协议	089
3.5.1	协议特点	090
3.5.2	寻址	091
3.5.3	TC 服务的基本类型	092
3.5.4	TC 空间数据链路的功能	093
3.5.5	TC 空间数据链路协议数据单元(TC 传输帧)	095
3.6	TM 数据链路层协议	097
3.6.1	TC 传输帧	097
3.6.2	TM 传输帧帧头	098
3.6.3	TM 传输帧数据域	099
3.7	AOS 数据链路协议	100
3.7.1	基本概念	100
3.7.2	服务	101
3.7.3	功能	103
3.7.4	底层服务	105
3.7.5	无 SDLS 的协议数据单元	105
3.7.6	无 SDLS 的管理参数	117
3.7.7	支持 SDLS 的协议规范	118
3.8	Proximity - 1 数据链路层协议	119

3.8.1	Proximity - 1 协议概述	119
3.8.2	Proximity - 1 协议定义的术语	119
3.8.3	Proximity - 1 协议栈	120
3.8.4	各层功能	121
3.8.5	服务	124
3.8.6	协议数据单元	125
3.8.7	Proximity - 1 编码与同步层协议	129
3.9	IP over CCSDS	131
第4章 星座设计方法		133
4.1	星座设计目标及约束条件	133
4.2	卫星节点特性	135
4.2.1	卫星轨道参数	135
4.2.2	卫星轨道方程	138
4.2.3	卫星轨道分类	141
4.2.4	星下点轨迹	143
4.3	星座参数	144
4.4	区域覆盖星座设计	145
4.4.1	GEO 卫星	145
4.4.2	IGSO 星座	145
4.4.3	24 星 LEO 星座	170
4.5	全球覆盖星座设计	174
4.5.1	GEO 星座	174
4.5.2	NGSO 星座	174
4.6	卫星节点空间连通及覆盖特性	194
4.6.1	坐标转换	194
4.6.2	可见性分析	197
4.6.3	覆盖性分析	199
4.7	卫星拓扑结构	203
4.7.1	单层卫星网络拓扑	205
4.7.2	极轨道卫星星座	205
4.7.3	倾斜轨道卫星星座	207
4.7.4	编队卫星	209
4.7.5	多层卫星网络拓扑	210

4.8	国内外典型星座系统	211
4.8.1	低轨道卫星星座系统	211
4.8.2	中轨道卫星星座系统	214
4.8.3	GEO 轨道卫星系统	216
第5章 加权代数连通度最大化空间信息网络拓扑控制方法		218
<hr/>		
5.1	引言	218
5.1.1	加权代数连通度的概念	218
5.1.2	研究现状	219
5.2	系统模型	221
5.3	问题描述	222
5.3.1	网络初始化问题	222
5.3.2	网络重构问题	224
5.3.3	松弛问题的半正定规划形式	225
5.4	基于矩阵摄动的启发式贪婪算法	225
5.4.1	网络初始化问题中的边移除算法	226
5.4.2	网络重构问题中的边增加算法	227
5.4.3	算法复杂度分析	228
5.5	仿真结果及分析	228
5.5.1	仿真环境设置	228
5.5.2	网络初始化中边移除算法仿真	228
5.5.3	网络重构中边增加算法仿真	232
5.6	小结	233
第6章 最小生成树空间信息网络拓扑控制方法		234
<hr/>		
6.1	引言	234
6.1.1	最小生成树的概念	234
6.1.2	研究现状	235
6.2	系统模型	236
6.3	问题描述	237
6.4	分布式最小生成树算法	237
6.4.1	生成树的构建	238
6.4.2	链路平均权重最小化	241

6.4.3	算法复杂度分析	242
6.5	基于最小生成树的节点连通度优化算法	242
6.5.1	算法描述	242
6.5.2	算法复杂度分析	244
6.6	仿真结果及分析	244
6.7	小结	249
 第7章 空间信息网络多址接入技术		250
<hr/>		
7.1	引言	250
7.2	多址方式分类	250
7.3	空间信息网络特点对多址接入的影响	251
7.4	空间信息网络多址接入技术	252
7.4.1	基于竞争的分布式接入控制多址方式	252
7.4.2	基于无冲突的集中式分配多址接入方式	255
7.4.3	混合型多址接入方式	258
7.5	多址技术系统容量	262
7.5.1	FDMA 多址系统容量	263
7.5.2	TDMA 多址系统容量	263
7.5.3	CDMA 多址系统容量	264
7.5.4	纯 ALOHA 协议的系统容量	265
7.5.5	MF - TDMA 多址系统容量	269
7.5.6	NOMA 多址系统容量	269
7.6	小结	270
 第8章 星上激光/微波混合交换技术		273
<hr/>		
8.1	星上电交换技术	275
8.1.1	透明转发方式	275
8.1.2	星上 ATM 交换	275
8.1.3	星上 IP 交换	276
8.1.4	星上 MPLS 交换	277
8.1.5	星上电突发交换	277
8.2	星上波长交换技术	278
8.3	星上光突发交换技术	280

8.3.1	基本原理	280
8.3.2	基于报文突发交换技术的星上交换方式	284
8.3.3	基于 Round - Robin 的星上光突发交换混合门限组装算法	285
8.3.4	基于突发流的卫星突发交换网络资源预留算法	293
8.3.5	基于突发流的星上光交换核心节点信道算法	299
8.4	星上混合交换技术	302
8.4.1	混合交换概述及应用情况	302
8.4.2	星上混合交换需求分析及研究现状	307
8.5	星上交换所面临的难题与挑战	309
第9章	混合链路中继卫星网络任务调度方法	312
<hr/>		
9.1	混合链路中继卫星系统资源调度原理	312
9.1.1	中继卫星网络基本组成	312
9.1.2	混合系统资源调度特点	314
9.2	混合系统静态初始资源调度模型	315
9.2.1	数据中继业务分类	315
9.2.2	静态调度模型参数定义	315
9.2.3	多目标约束规划模型	316
9.3	多目标优化方法	317
9.3.1	多目标优化基本原理	317
9.3.2	多目标问题求解方法	319
9.3.3	优化搜索算法	321
9.4	基于先验信息的静态初始调度算法	322
9.4.1	基于偏好信息的多目标优化策略	322
9.4.2	改进小生境遗传算法设计	324
9.4.3	基于时间窗口更新的调度优化策略	324
9.4.4	基于精英保留的自适应小生境遗传算法	326
9.4.5	调度算法性能	329
9.5	多目标优化的静态资源调度方法	332
9.5.1	基于 Pareto 优化的多目标搜索策略	333
9.5.2	改进 NSGA - II 的优化算法设计	334
9.5.3	仿真设计与性能分析	337
9.6	混合链路中继卫星网络抢占式快速动态资源调度方法	340
9.6.1	混合链路中继卫星网络动态资源调度模型	341

9.6.2 抢占式快速动态调度算法	343
9.6.3 基于理想解的多目标决策处理	346
9.6.4 仿真实验与结果分析	348
9.7 基于多目标蚁群算法的数据续传资源调度算法	352
9.7.1 混合链路数据续传约束规划模型	352
9.7.2 基于多目标蚁群算法的模型求解	354
9.7.3 多目标蚁群算法设计	355
9.7.4 仿真实验与结果分析	357
9.8 小结	362
参考文献	363
附录 主要英文缩写	380
索引	385

第 1 章 概 论

1.1 基本概念和特点

空间信息网络是以空间平台(如同步卫星,中、低轨道卫星,平流层气球,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,其基本构成如图 1-1 所示。

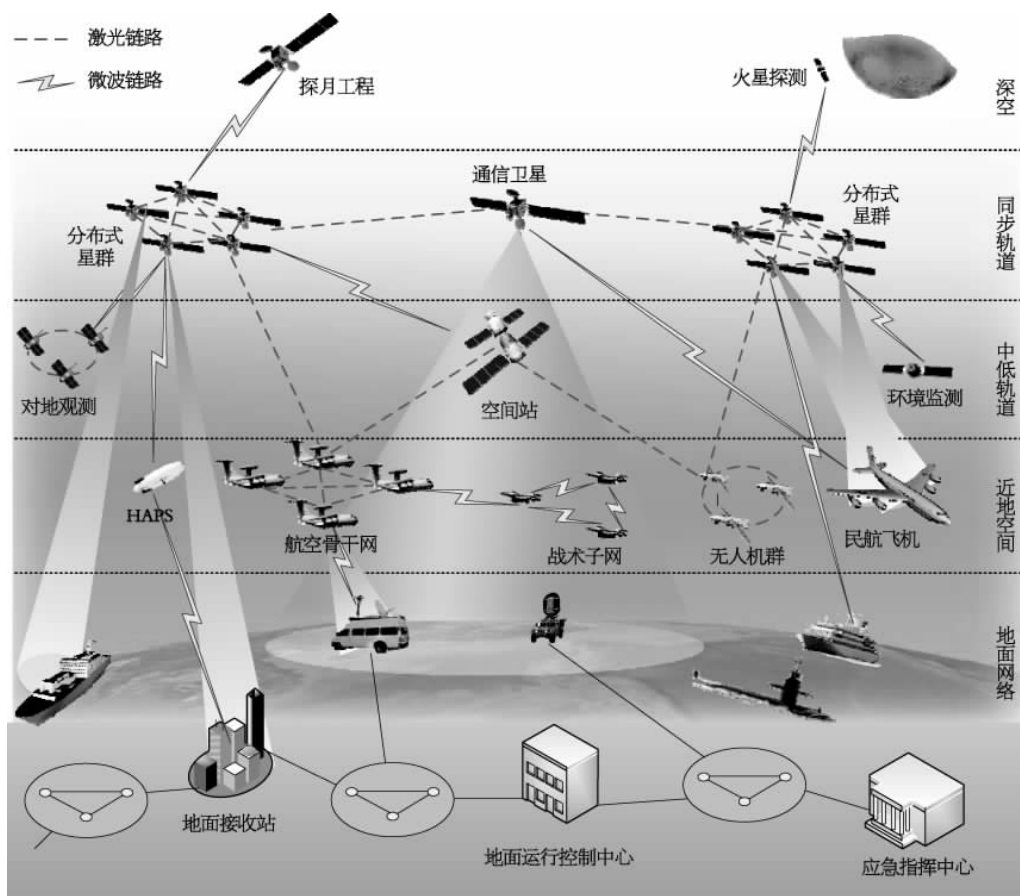


图 1-1 空间信息网络架构

其节点包含各种卫星、空间站、升空平台、有人或无人机,这些平台节点在业务性质、应用特点、工作环境、技术体制等方面均有差异,由此构建的网络具有网络异构和业务异质的典型特征。中继卫星、分布式星群、中低轨卫星星座组建的网络是空间信息网络的核⼼,其向上扩展至深空领域,向下扩展至航空领域,与不同类型的用户或功能各异的子网构成整个空间信息网络。

空间信息网络的特点如图 1-2 所示。要实现空间信息网络高效信息传输与分发,必须要考虑空间信息网络的 3 个最突出特征:网络结构时变、网络行为复杂、网络资源紧张。其中,网络结构时变是指拓扑结构动态变化,网络节点及业务稀疏分布,业务类型和链路性质呈现异构属性,网络业务传输与控制需要在大时空区域内完成;网络行为复杂则表现为服务对象差异巨大,业务的汇聚、疏导与协同呈现出异质属性,基于任务驱动实现功能的可伸缩和网络的可重构;网络资源紧张是由于轨道和频谱等空间资源紧张,使空间链路和平台承载等能力受限。

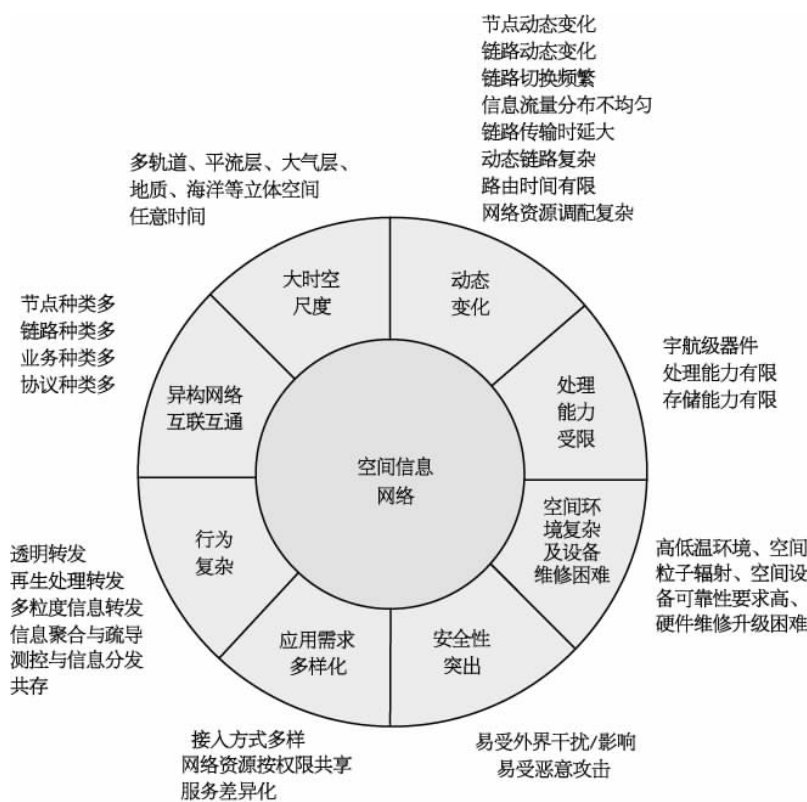


图 1-2 空间信息网络的特点

1.2 组成和结构

空间信息网络是以多种轨道航天器为网络节点,以微波、激光为主要传输手段,具有全

球覆盖能力,网络化信息获取、存储、处理、分发能力,智能化运行管理能力,标准化体系规范的空间基础设施。纵向按节点物理位置可分为天基骨干网、天基接入网和地面网络3大部分。天基网是由各类天基功能卫星节点组成,如骨干中继卫星、遥感卫星、导航卫星、气象卫星、资源卫星等。地基网是由运维管控网络、用户及相关国防基础设施组成。横向按功能可划分为管理层、业务层和支撑层。管理层包括整个网络运行、管理、维护、控制以及安全防护等;业务层为各类业务提供可靠的数据通道,如中继网络、接入网络等;支撑层为整个网络可靠运行提供支撑,包括时空基准同步以及协议体系规范等,如图1-3所示。

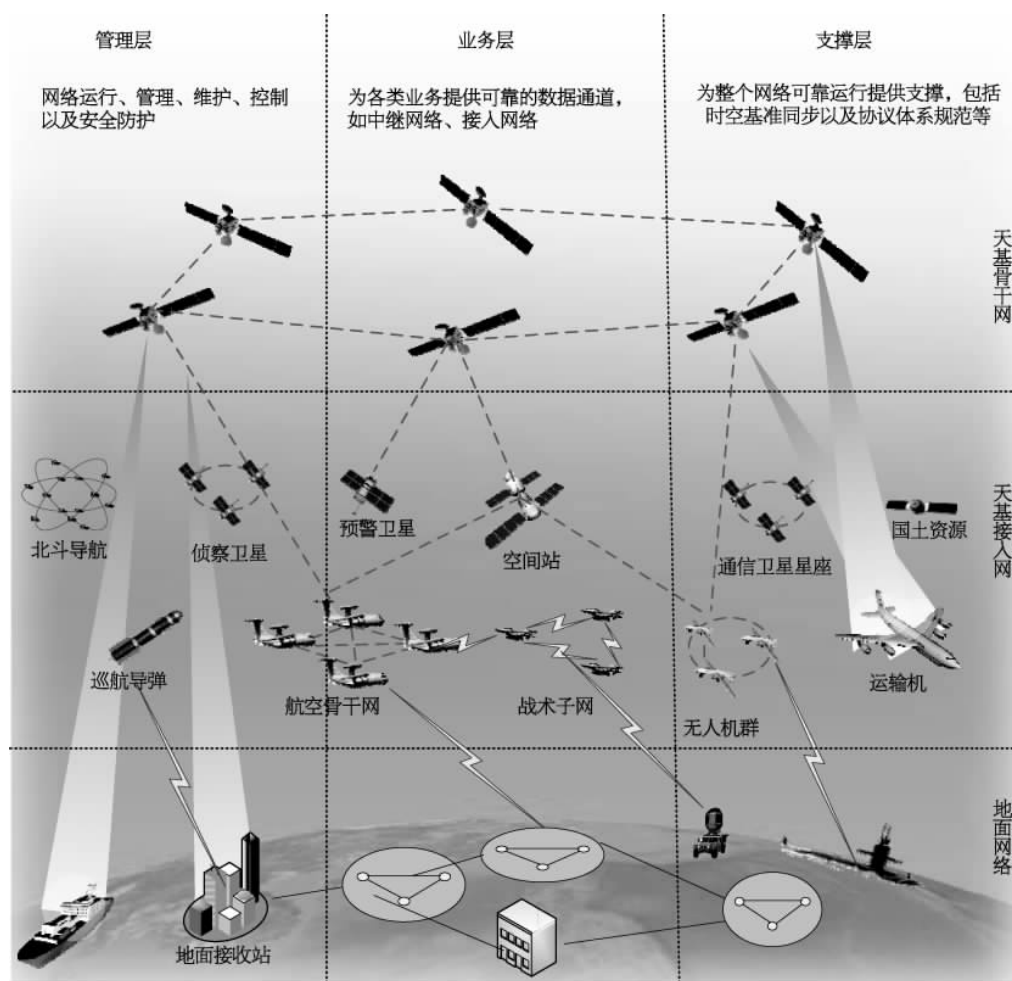


图1-3 空间信息网络纵向/横向分层

1) 天基骨干网

天基骨干网由布设在地球同步轨道的若干骨干节点联网组成,骨干节点具备宽带接入、数据中继、路由交换、信息存储、处理融合等功能,受卫星平台能力的限制,单颗卫星无法完成上述全部功能,采用多颗卫星组成星簇的方式实现多功能综合。一个天基骨干节点由数