

天地一体化网络

刘立祥 著



科学出版社

天地一体化网络

刘立祥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者十多年来在卫星组网、天基网络和一体化网络等方面的研究成果,针对如何构建天地一体化网络的相关理论与技术展开分析和研究,内容新颖、深入、全面,涵盖一体化组网的各个方面。首先,对天基环境的特点及其对网络的影响进行系统分析;然后,对构建一体化网络的关键技术进行深入研究,包括网络流量预测与均衡机制、位置管理策略、网络的 QoS 保证模型、一体化网络体系结构与模型、一体化传输协议和路由协议等。

本书可供网络通信与卫星组网相关领域的科研人员和工程人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

天地一体化网络/刘立群著. —北京:科学出版社,2015.6

ISBN 978-7-03-044567-4

I. ①天… II. ①刘… III. ①通信网—研究 IV. ①TN915

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第124261号

责任编辑:王 哲 董素芹 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏立印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:370 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

太空域和信息域是国家经济发展和军事斗争的两个重要战略制高点,目前我国有近百颗在轨运行空间飞行器,覆盖了导航、通信、遥感、中继、深空探测、载人航天等领域,已配套规模庞大的卫星运控站、测控站、接收站、上行站、监测站等地面系统,形成了广泛应用于军事、行业、区域的卫星应用产业。

近年来,全球卫星产业收入持续增长。据美国卫星工业协会(Satellite Industry Association, SIA)2015年发布的《卫星产业状况报告》,2014年全球航天产业收入为3227亿美元,卫星产业的总收入为2032亿美元,约占全球航天产业收入的63%,2014年全球航天产业增长率为1%,卫星产业收入年增长率为4%。在卫星产业的服务、制造、发射和地面设施4个分支行业中,卫星服务产业所占比例接近60%。

我国非常重视卫星应用技术与产业发展。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》在国民经济和社会全面发展全面提升科技支撑能力的11个重点领域和62项优先主题中,与天地一体化信息网络技术有密切关系的占了相当大的比例。随着空间基础设施的完善和新技术的更新应用,我国卫星应用产业飞速发展,近5年增长率达到20%,智慧城市、物联网、车联网等概念的提出和项目的实施,将极大地促进我国信息化建设的高速发展。未来随着北斗卫星导航系统、高分辨率对地观测系统等重大专项的实施,我国卫星应用体系将不断健全,卫星产业应用将得到更加迅猛的发展。

空间信息资源已成为各个国家的重要战略资源。天地一体化网络以其战略性、基础性、带动性和不可替代性的重要意义,成为发达国家国民经济和国家安全的重大基础设施,其所具有的独特位置与地域优势以及特有的信息服务能力,可带动我国新兴产业的发展,形成具有巨大潜力的核心竞争力和民族创造力。另外,随着信息技术的迅猛发展,未来信息服务行业对多维综合信息资源的需求日益提高,国家安全、航空航天、环境监测、交通管理、教育医疗卫生、工农业、反恐、抗灾救援等领域的战略信息服务将在空、天、地多维空间上展开,任何单一维度上的信息利用都无法满足全方位的需求。空、天、地跨维度服务成为未来全方位服务的主要形式,其要求密切配合、深度协同,而前提是充分的信息统筹获取、快速的信息传输、高效的任务协同处理。在此需求下,天地一体化网络应运而生。

天地一体化网络由深空网络、天基网络、空基网络和地面陆基、海基网络组成,天基网络是其中最核心的组成部分,起到了枢纽的作用。天地一体化网络是一个复杂异构的巨系统,涉及多个学科领域,包括数学、信息、通信、计算机等诸多学科的长期知识积累和最新发展理论。其中,组网技术是保障一体化网络信息安全可靠传输的关键基石。

本书是作者及其天基网研究组在长期研究实践、国际学术交流的基础上撰写而成的,全书分为两篇,共10章,上篇包括第1~4章,重点对天基链路业务进行分析,第1章介绍天地一体化网络的概念、特点和存在的问题,第2~4章分别介绍空间链路模型、空间业务流量预测与均衡模型以及天地一体化网络QoS保证模型。下篇包括第5~10章,重点对天地一体化网络的体系结构和协议进行设计,天地一体化网络的核心是提供好的网络体系架构,因此本书第5章提出天地一体化网络的架构模型,并对天地一体化网络进行建模,通过模型可以对网络的不同特性进行分析,第6章提出一种新型的网络体系——构件化协议体系,可以支持不同应用的QoS。第7~10章对未来天地一体化网络的关键技术提出初步的解决方案,并对天地一体化网络仿真基础平台进行介绍,利用该平台架构可以对不同仿真场景下的协议体系性能进行验证。

本书的写作和出版得到了中国科学院支撑技术课题“综合信息系统关键理论与技术”、国家自然科学基金重大项目“空间信息网络基础理论与关键技术”、国家863计划“空间信息网关键技术”的支持。在成稿过程中,感谢多位与我一起工作的博士研究生,他们是王路、李向群、陈静、陈建州、孙浩良等,他们的辛勤工作对本书的完成起到了至关重要的作用。最后,对支持和指导我们的领导、专家、学者和参与共同研究的项目组同事表示衷心的感谢。

本书是作者前期工作的总结,由于水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年2月

目 录

前言

上篇 链路分析与业务分析篇

第 1 章	概 论	2
1.1	天地一体化网络的特点	2
1.1.1	国内外研究发展现状与趋势	6
1.1.2	国内现有技术基础	22
1.2	天地一体化网络主要问题分析	23
第 2 章	空间链路建模与分析	26
2.1	空间环境对链路的影响分析	26
2.1.1	大气损耗	26
2.1.2	天气对通信链路的影响	26
2.1.3	链路建模	29
2.1.4	能见分析	30
2.1.5	建链时间分析	31
2.1.6	链路建立、保持和断开	33
2.1.7	链路计算	34
2.2	空间环境对误码率的影响分析	47
2.2.1	空间环境对星地链路的影响分析	47
2.2.2	空间环境对星间链路的影响分析	49
2.2.3	EIRP 与数据传输速率对空间链路误码率的影响分析	50
2.2.4	仿真分析结论	52
2.3	误码率对协议的影响分析	52
第 3 章	空间业务流量预测与均衡模型	56
3.1	流量模型	56
3.2	基于自回归积分滑动平均模型的流量预测	57
3.3	基于计算智能方法的流量预测与控制	59
3.3.1	T-S 模糊模型	60
3.3.2	隶属函数的辨识	61
3.3.3	局部子空间模型的辨识	61
3.4	基于公平性的主动队列管理	62

3.4.1	卫星网络主动队列管理算法设计思想	62
3.4.2	天基卫星网络 AQM 算法设计	63
第 4 章	天地一体化网络 QoS 保证模型	69
4.1	天地一体化网络 QoS 保证体系	69
4.1.1	天地一体化网络 QoS 业务参数及影响因素	69
4.1.2	天地一体化网络 QoS 保证级别	70
4.2	天地一体化网络 QoS 保证算法	72
4.2.1	分组分类机制	72
4.2.2	主动队列管理技术	76
4.2.3	区分服务中的队列管理算法	81
4.3	天地一体化网络 QoS 保证体系评估	87
4.3.1	天地一体化网络 QoS 体系性能评估标准	87
4.3.2	天地一体化网络 QoS 性能评估	92

下篇 网络体系结构与协议篇

第 5 章	天地一体化网络体系结构与模型	100
5.1	天地一体化多级网络体系结构	100
5.2	天地一体化网络模型分析	102
5.3	天地一体化网络系统单星理论模型	104
5.3.1	连续的单星模型	105
5.3.2	离散化的单星模型	106
5.4	天地一体化多星网络模型	107
5.5	天地一体化网络分析指标	108
5.5.1	天地一体化网络基本特性分析指标	108
5.5.2	天地一体化网络抗毁性分析指标	110
5.5.3	天地一体化网络信息中心性评估测度	113
5.6	仿真分析	119
5.6.1	对通信任务支持的仿真分析	119
5.6.2	抗毁性仿真分析	120
5.6.3	网络信息中心性分析	121
5.7	小结	126
第 6 章	天地一体化网络新型协议模型	127
6.1	引言	127
6.2	构件化的可重构网络体系结构	129
6.2.1	构件化协议系统模型	129

6.2.2	与 TCP/IP 网络体系的融合	131
6.2.3	数据包格式设计	131
6.2.4	构件划分	132
6.3	构件化协议栈模型数据处理流程	136
6.4	系统设计	137
6.4.1	系统方案论证	137
6.4.2	服务类型分类	138
6.4.3	接口总体设计	139
6.5	构件化协议栈的实现	141
6.5.1	套接字管理部分的实现	141
6.5.2	构件函数的实现	142
6.5.3	服务构件接口的实现	150
6.5.4	构件化体系结构的实现	151
6.6	小结	152
第 7 章	天地一体化网络传输技术	154
7.1	基于网络编码的传输方法	154
7.1.1	引言	154
7.1.2	网络编码方法介绍	155
7.1.3	理论分析	158
7.1.4	动态重传的网络编码传输方法	160
7.1.5	与网络编码结合的拥塞控制算法	163
7.1.6	仿真实验与结果分析	164
7.1.7	小结	169
7.2	跳到跳的传输控制方法	170
7.2.1	卫星链路特性对传输的影响	170
7.2.2	理论分析	170
7.2.3	跳到跳传输协议	173
7.2.4	仿真实验与结果分析	177
7.2.5	小结	179
第 8 章	天地一体化网络路由技术	180
8.1	引言	180
8.2	无收敛多测度路由算法	181
8.2.1	基于地理位置的路径选择	181
8.2.2	路由选择的测度	183
8.2.3	避免路由环路	185

8.3	显式负载均衡机制	187
8.4	编码感知路由算法	189
8.5	双层星座中负载均衡路由协议	192
8.5.1	基本路径选择策略	193
8.5.2	邻间负载均衡	195
8.5.3	区域负载均衡	196
8.6	中低轨道双层卫星网络分布式多播路由	200
8.6.1	引言	200
8.6.2	MEO/LEO 卫星网多播路由协议	203
8.7	基于“路由拼接”的一体化异构网络互连方法研究	207
8.7.1	引言	207
8.7.2	网络层汇聚架构与路由方法研究	207
8.7.3	汇聚架构的拼接路由方法部署研究	215
8.7.4	拼接路由方法仿真分析	217
8.8	小结	218
第 9 章	天地一体化网络接入与切换技术	220
9.1	研究背景	220
9.2	天地一体化网络移动管理策略研究	220
9.2.1	小区覆盖模式	221
9.2.2	天地一体化网络位置管理策略研究	223
9.2.3	天地一体化网络切换管理策略研究	228
9.3	用户动态接入技术	239
9.3.1	用户动态接入技术综述	239
9.3.2	多星接入策略	240
9.3.3	呼叫接入控制策略	246
9.3.4	多址接入技术	247
9.4	天地一体化网络无缝软切换技术	259
9.4.1	引言	259
9.4.2	传输层无缝切换算法	261
9.4.3	标识与地址分离编址方式	264
9.4.4	网络层无缝软切换算法	266
9.4.5	理论分析	269
9.4.6	仿真实验与结果分析	270
9.5	小结	275

第 10 章 天地一体化网络仿真平台	277
10.1 仿真工具分析	277
10.2 天地一体化网络仿真环境	278
10.2.1 天地一体化网络仿真拓扑设计	278
10.2.2 天地一体化网络仿真环境整体框架	280
10.2.3 天地一体化网络路由协议仿真平台模型	281
10.2.4 仿真平台实现	284
10.3 小结	287
参考文献	288

上 篇

链路分析与业务分析篇

第 1 章 概 论

1.1 天地一体化网络的特点

随着技术的发展和应用需求的多样化,功能单一、结构规则、运行依赖于地面、相互之间孤立的卫星网络系统已经不能满足人们实时性、综合性的服务需求,具有多种功能、轨道互补、智能性高、自主运行、便于扩展的异构卫星组网成为新的发展方向。目前,世界上主要航天国家在调整并制定 21 世纪航天发展战略时,也把下一步发展目标定位在完善卫星系统种类和提高卫星系统功能的基础上,发展并建立网络化的新型综合性卫星系统体系。例如,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的天基通信导航网(Space Communication and Navigation, SCaN)计划主要负责为整个太阳系中的空间飞行任务提供通信与导航服务^[1,2],SCaN 未来的构想是建立并保持一个便于扩展、可缩放的综合基础设施,提供全面的、健壮的、经济有效的、更高量级数据速率的天基服务,以实现 NASA 的科学探索任务。俄罗斯也提出建立军民两用卫星综合信息网——多功能卫星通信和远程地球监视系统(Resttelesat)^[3],该系统由 115 颗卫星构成,通过星间链路将侦察与通信融为一体,可同时完成通信和对地观测的任务,以提高系统的快速反应能力和信息利用的时效性。

天地一体化网络(Space-Ground Integrated Network, SGIN)是综合利用新型信息网络技术,以使命为导向,以任务为驱动,以信息流为载体,充分发挥空、天、地信息技术的各自优势,通过空、天、地、海等多维信息的有效获取、协同、传输和汇聚,以及资源的统筹处理、任务的分发、动作的组织和管理,实现时空复杂网络的一体化综合处理和最大有效利用,为各类不同用户提供实时、可靠、按需服务的泛在、机动、高效、智能、协作的信息基础设施和决策支持系统。天地一体化网络的目标是对事件进行全面高效协同的处理。利用多维信息,协同各个工作模块,增强事件的处理能力;结合空、天、地各类网络和系统各自的优势,实现功能互补,扩大可处理事件的范围;利用空、天、地一体化网络综合信息系统强大的机动性能、广泛的覆盖范围、全局的协作能力和对信息的智能处理能力,实现对事件和任务的高效处理。

天地一体化网络,简称一体化网络,是由通信、侦察、导航、气象等多种功能的异构卫星/卫星网络、深空网络、空间飞行器以及地面有线和无线网络设施组成的,通过星间星地链路将地面、海上、空中和深空中的用户、飞行器以及各种通信平台

密集联合。地面和卫星之间可以根据应用需求建立星间链路,进行数据交换。它既可以是现有卫星系统的按需集成,也可以是根据需求进行“一体化”设计的结果,具有多功能融合、组成结构动态可变、运行状态复杂、信息交换处理一体化等功能特点。

天地一体化网络以卫星网络作为骨干,由深空网络、邻近空间网络、地面网络共同构成。其中,卫星骨干网一般称为天基网,包括各个轨道层面执行不同任务的卫星,深空网包括航天飞机、火星探测器等其他节点;邻近空间网络称为空基网,包括飞机、热气球、飞艇、直升机、无人机等低空飞行器;地面网则包括轮船、潜艇、火车、汽车、坦克、手机等地面节点。天地一体化网络的组成如图 1-1 所示。这种高度综合性的异构网络系统打破了各自独立的网络系统间数据共享的壁垒,能够有效地综合利用各种资源(包括轨道资源、载荷资源、通信资源等),不仅可以为作战提供一体化的侦察、导航、作战指挥等服务,也可以为海—陆—空通信、海洋气象预报、导航、应急救援等提供全方位的支持。

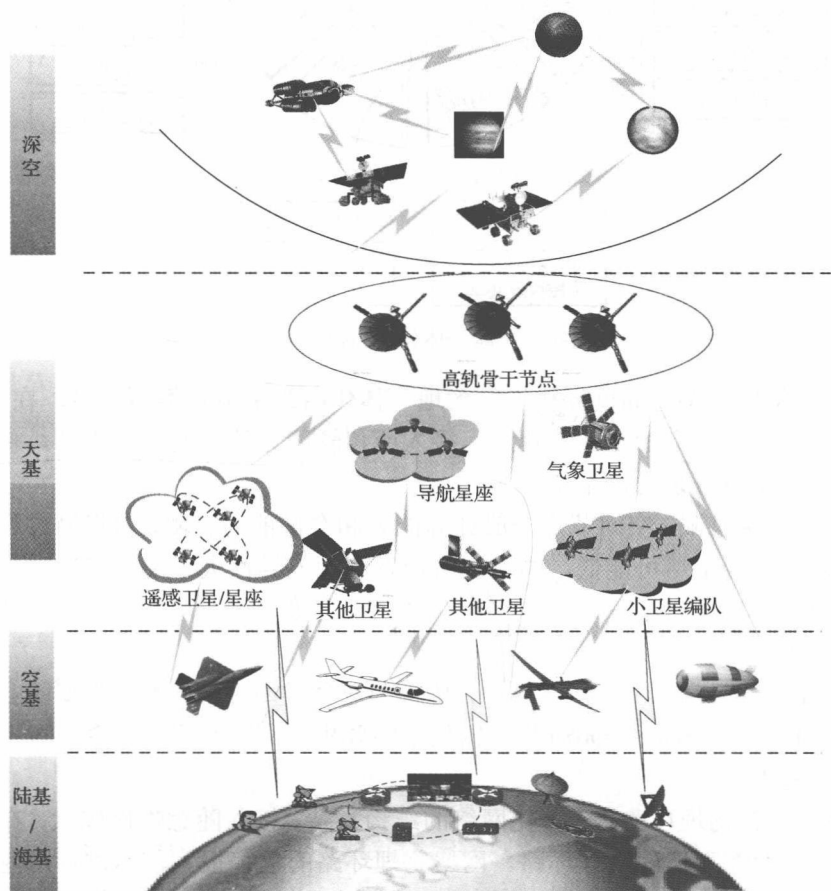


图 1-1 天地一体化信息网络组成示意图

从组网、传输和路由等方面看,天地一体化网络具有典型的大时空尺度属性,是一个大时空尺度网络,具有以下几个鲜明特征^[4],如图 1-2 所示。

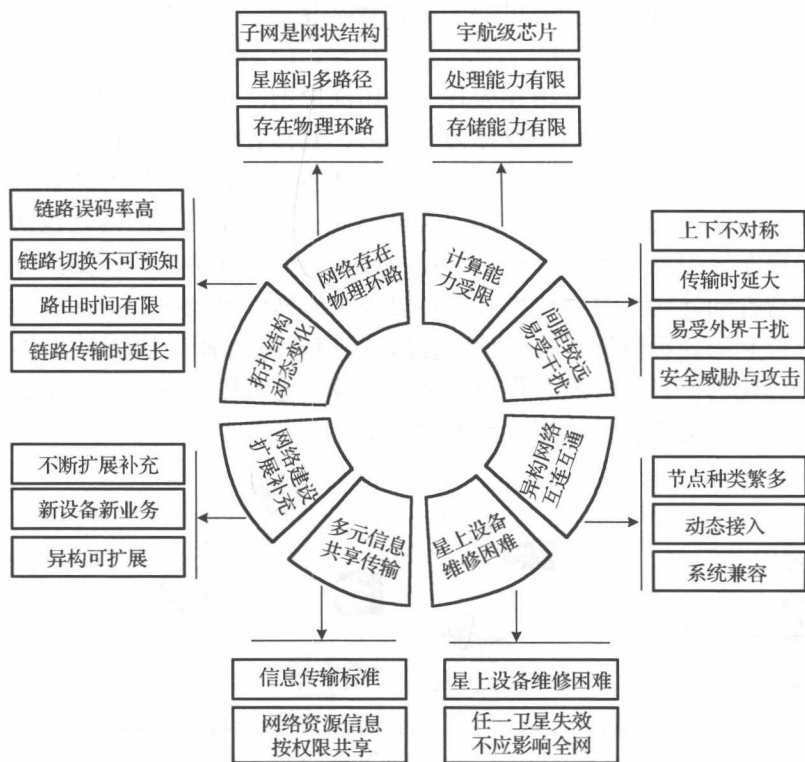


图 1-2 天地一体化网络典型特征

(1) 网络结构动态与高度异构性。天地一体化网络中节点类型众多,在天、空、地、海运行的不同节点的功能、轨迹、接入或传输能力等方面差异显著,使网络成为高度异构、动态复杂的巨系统。

(2) 网络资源有限。空间节点一般计算能力和存储能力有限,对组网过程中协议或算法的复杂度要求尽可能低,同时网络带宽资源差异性大,高带宽链路(星—地、星—星等)和窄带链路(星—地、空—地等)共存,需要有差异性、有针对性地利用网络的带宽资源。

(3) 支撑业务多样。一体化网络中,传输的业务类型多样,不同类型的业务对服务质量(Quality of Service, QoS)与传输效率的要求不同,网络需要有应对不同应用需求的保障能力。

(4) 网络存在物理环路。一体化网络的结构复杂,接入随意性比较大,在网络节点密集的环境存在天然的物理环路。网络物理环路的危害很大,当进行网内信息广播时,有可能不断恶性循环产生广播,严重的会导致区域网络中断。

(5) 间距较远易受干扰。由于地面设备、卫星与其他航天航空设备距离较远,它们之间的通信时延较大。通信链路也容易受到来自外界的干扰,如宇宙射线、大气层电磁信号等都有可能增加信号传输的误码率。

(6) 网络建设扩展补充。天地一体化网络对系统的可扩展性提出了更高的要求。天地一体化网络的建设是一个逐步完善的过程,中间需要不断地扩展、补充,如几大全球卫星定位系统的建立都是耗时二三十年才完成的。此外,各种新的航天航空器、新型的用户、新型的业务需求都会不断出现。对于现有的成熟网络体系,天地一体化网络要有能力与其进行互连互通,有时甚至将其作为异构的通信子网接入,这就要求天地一体化网络有很强的可扩展性。

(7) 异构网络互连互通。天地一体化网络中的节点类型繁多,需要实现多种不同网络的互连;卫星运行的规律性使空间信息网与地面无线网络和固定的有限网络均有不同;开放性的网络设计要求、网络节点的动态接入都带来了新的挑战。天地一体化网络的设计需要考虑与多个系统兼容、多种平台互通、多种网络互连。

(8) 多元信息传输共享。天地一体化网络结构复杂,网内传输的信息呈现多元化,信息表示的多样性、信息数量的巨大性、信息关系的复杂性,以及要求信息处理的及时性、准确性和可靠性都是前所未有的。在空间信息网中,针对多元化信息需要制定对应的信息传输标准,需要对不同的网络资源信息按照权限实现共享。

(9) 面临蓄意攻击与破坏等安全威胁。天地一体化网络的无线传输特性、复杂组网结构、软硬件设计和实现缺陷、节点的处理和存储能力有限、空间环境恶劣等特点,使得它更易受到敌方的窃听、假冒、信息重放以及破坏和攻击,这些都是天地一体化网络的主要脆弱点。

(10) 星上设备维修困难。卫星和深空设备一旦发射升空就难以检测维修。任何一个卫星节点或深空节点的失效不应影响到整个网络的正常运行。

从天地一体化网络的应用角度看,天地一体化网络具有以下鲜明的特征。

(1) 泛在性:综合空、天、地、海多种网络实现泛在覆盖和多重覆盖。

(2) 机动性:能够依据任务要求对系统进行动态调整。

(3) 协作性:空、天、地网络之间协同工作,融合为统一的一体化网络系统,系统各个模块之间能够进行协同工作,实现对事件更快更好的处理。

(4) 智能性:能够智能产生事件激励和任务,无论应对突发事件还是正常任务的执行,均能进行智能控制 and 处理。

(5) 高效性:天地一体化网络综合信息系统具有对事件和任务的快速反应能力与高效的处理能力。

综上所述,天地一体化使得网络具有鲜明的特征。建设天地一体化网络,将对我国的国民经济、国防安全和科学研究产生深远的影响,主要包括以下三个方面。

(1) 天地一体化网络是未来国家电子信息系统的重要基础设施。天地一体化网络系统建设关系到国家经济和国家安全发展战略,是国家竞争实力和生存能力的重要

组成部分,也是突破西方发达国家高技术封锁、对抗霸权主义、捍卫国家主权与领土完整的有力保障,将成为国家电子信息系统的重要基础,西方国家已经充分认识到天地一体化网络在 21 世纪国际军事竞争和国民经济发展中的重要作用,相关研究和应用的投入急速增加。该领域内相关的学术会议从 1998 年的少数几个,增加到目前的每年数十个。在主要期刊上发表的相关研究论文也从 1998 年前的十余篇发展到目前每年上百篇的规模。

(2)天地一体化网络是实现多系统、多信息融合和协同的重要平台。天地一体化网络是大容量、多层次异构网络,承载海量、多维、协同信息,适应实时、高动态通信环境,它是构建空间信息从获取、处理到应用的快速、高效的信息走廊。在天地一体化网络条件下,空间信息的获取涉及卫星、邻近空间飞行器、航空器等多种平台,有光学、红外、雷达、高光谱等多种手段,空间信息多源、多维、异质,其时间、空间和谱段分辨率不同,信息数据量庞大,存储模式、处理模式、信息服务时效性要求各异。天地一体化网络已经成为具有超前性和创新性的交叉研究前沿领域,科学意义和战略意义重大。

(3)天地一体化网络可以带动信息电子、航空宇航、空间科学、光学、材料、仪器等相关学科的发展。天地一体化网络是人类利用空间的基础,利用天地一体化网络可以实现多维、多源、精细空间信息的一体化获取、传输、处理、网络化共享与应用服务等应用需求,涉及信息电子、航空宇航、空间科学、光学、材料、仪器等多个学科。大量的研究表明:空间宽带网络将形成巨大的空间产业;航天信息直接支持作战有赖于网络化支持;天地一体化网络所具有的独特位置与地域优势可形成特有的信息服务能力,带动新兴产业的发展,具有形成核心竞争力的巨大潜力。其研究成果将为未来天地一体化网络的建设提供理论支撑,对推动相关学科的发展具有重要的科学意义。

1.1.1 国内外研究发展现状与趋势

从研究发展角度来看,天地一体化网络逐渐从单层拓扑结构向多层复杂结构演变,尤其是大椭圆轨道卫星、邻近空间飞行器、深空探测器等网络节点的出现,使网络拓扑不再局限于低、中、高轨卫星和地面站组成的传统星座结构;路由方式由面向连接式转为面向非连接式,并寻求与 Internet 无缝对接的可扩展路由方式;传输策略从基本的单测度、最短路径策略向多测度、多路径、自适应策略转变,综合考虑网络吞吐、负载均衡等整体性能;对信息传输 QoS 的优化,从单目标代价函数值最小化算法向启发式多目标优化算法演变;同时,网络层与其他层间的交互也逐渐得到了增强,并且出现了非层次协议结构下的设计方案。

下面从网络结构与协议体系、传输控制协议和路由协议三个方面对国内外研究现状进行分析和总结。

1. 网络体系结构与协议体系研究

随着卫星获取信息数量的急剧增加,不同系统之间的信息不能及时共享和综合利用,航天设施重复建设问题严重。面对这种情况,美国在继续完善卫星系统种类和提高卫星系统功能的基础上,开展了天基系统一体化的网络结构与协议体系的研究工作,其目的是充分利用各类卫星资源,建立一体化、网络化的新型空间通信体系。

2002年,这项工作得到NASA的资助。2004年,Bhasin等^[5]提出了一种一体化空间通信体系(Integrated Space Communication Architecture, ISCA),其网络协议架构如图1-3所示,它是SCaN(主要包括空间网络(Space Network, SN)、近地网络(Near Earth Network, NEN)和深空网络(Deep Space Network, DSN))的主要组成部分。ISCA按功能分为主干网、接入网、星座或编队飞行网络、近距离无线网络。该架构模型给出了ISCA系统的结构组成,并分析了该架构模型在不同的星际任务中的演化,但是模型描述缺乏形式化的表达形式,无法对系统进行性能分析。

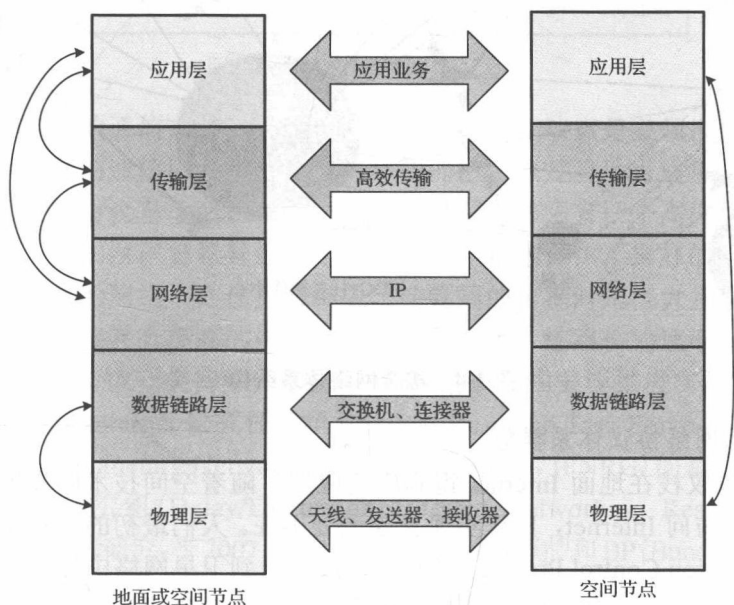


图 1-3 空间通信网络体系示意图

此外,NASA综合业务网(NASA Intergrated Services Network, NISN)作为地面通信网络,主要用来支持SCaN的三个子网地面段和NASA所属相关机构之间的地面通信。几十年来,三个子网一直按照各自的路线独立发展,相互之间的集成和互操作性水平尚存在很大的不足。

为了满足未来空间任务的需求,NASA已经规划了一个具有综合网络管理和标