

对中国建设天、空、地一体化信息网络的几点认识

Construction of Space/Sky/Terrestrial Integrated Information Network in China

顾学迈/GU Xuemai¹
赵康健/ZHAO Kanglian²
贾敏/JIA Min¹
张乃通/ZHANG Naitong¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 南京大学, 江苏 南京 210093)
(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. Nanjing University, Nanjing 210093, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0002-07

摘要: 认为陆地信息系统已无法满足信息化社会及国防信息化广域覆盖与多类信息融合共享的需求, 建立空间信息基础设施是未来信息网络的发展需求。针对中国建设天、空、地一体化信息网络的原因、网络架构、技术难点、演示验证等, 提出了中国建立天、空、地一体化信息网络探索性的认识, 以及对其实施过程中于陆地信息设施不同的技术难点的看法。

关键词: 天、空、地一体化; 信息网络; 天基宽带互联网

Abstract: The terrestrial information system is unable to fully meet the requirement for wide coverage and multi-class information fusion of information-based society and national defense, and the establishment of space information infrastructure is the development needs of the future information network. In this paper, aiming at the reasons, network architecture, technical difficulties and demonstration of the construction of space/sky/terrestrial integrated information network in China, we propose some considerations about the construction of network and some views about technical difficulties which are different from land information facilities.

Keywords: space/sky/terrestrial integration; information network; space-based broadband internet

第三次工业革命使人类进入信息时代, 信息已成为当前社会经济发展的核心驱动力。传统的陆地信息设施与传输体制已满足不了纷繁复杂的信息需求, 必须利用空间高度传输处理信息的优势。空间信息传输相比于陆地信息传输, 在覆盖面积、接入速度、效率、实时性、精度等方面都具有明显的优势, 我们必须充分利用空间信息传输的这些优势, 建设天、空、地一体化的信息网络, 满足日益纷杂的信息需求^[1-5]。

1 空间信息传输的基本概念

1.1 空间的定义

空间按离地球高度可分为两类:

收稿时间: 2016-05-12
网络出版时间: 2016-06-30
基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目(2016-ZD-07)

- 离地球表面 3.6×10^4 km 的静止轨道(GEO)卫星, 又称卫星、太空、外层空间、天基, 我们简称为“天基”。

- 离与月球以远的太阳系行星空间, 即离地球大于约 3.84×10^5 km, 最远到海王星(曾定为到冥王星)的空间, 称为深空。

1.2 空间信息传输条件

(1) 传输性能

由于空间通信系统具有传输距离长、多普勒频移大、信道衰落大等特点, 空间信息传输的传输损耗、时延、误码率、传输速率等性能与传输

距离密切相关^[6]。空间信息传输的链路性能与误码率性能分别如表1和表2所示。

由表1和表2可知, 随着通信端与地球距离的增大, 其传输损耗与传输时延显著增大, 下行链路速率与误码率也显著增大。由此可见, 空间通信的技术难度是发展空间信息传输的主要挑战。

(2) 传输环境

空间信息传输的传输环境, 大体可分为以下几个部分:

- 火星以近, 经大气层一站到达;
- 火星以远, 经大气层→被测星

▼表1 空间信息传输的链路特性

	距离/ 10^6 km	传输损耗/dB	时延
GEO	0.036	183.5(GEO轨道→地球)	256 ms
月球→地球	0.36~0.41	20.7~21.03	1.21~3.5 s
火星→地球	59.6~401.3	64.4~80.9	3.3~22.3 min
海王星→地球	4 304.9~4 694.1	101.6~102.3	239.2~260.8 min
GEO: 静止轨道			

▼表2 空间信息传输的上下行链路速率比与误码率

	天基通信	深空通信	陆地互连网
上下行链路速率比	1:100	1:1 000	1:1
误码率	10^{-4} ~ 10^{-6}	10^{-4}	不大于 10^{-4}
GEO: 静止轨道			

行程空间→被测星、复杂时空环境、复杂空间环境(空间粒子、温度场、电磁场、重力场、真空等)。

由此可见,天基、深空都属于空间范畴,但它们的性能差别还是很大的;月球、火星是属于深空范畴,但不能代表整个深空。因此,我们认为当前天基、深空应先分别研究,而月球、火星作为天基系统的延伸研究,探索合为一体研究的可行性^[7]。

1.3 业务(任务)种类

对于天、空、地一体化的信息网络的业务种类,多种行业提出了多类业务需求,可大概概括为两类:

(1)以整个地球为视点,对陆地、海洋、大气层与生物间的相互作用进行系统综合观察,观测、认识地球,与地球和谐共处;对远程、空中、海洋等目标监测、探测、测绘、监视。这些信息的获取是要通过应用卫星系统的感知(我们统称为对地观测应用卫星系统)。

(2)应急增强,快速响应。这些信息的获取可用入网灵活,可多次使用的飞机、飞艇等组成的高空平台及由微小卫星组网完成。

1.4 对空间信息设施的技术要求

为解决陆地信息传输的瓶颈,建立空间信息传输系统势在必行,其设施的技术要求主要有3点:广域覆

盖,信息共享,适应多种行业、多类业务的需求。

2 在轨应用卫星(航天器)概况

2.1 在轨卫星数及其分布

截至2015年,全球在轨应用卫星数及其分布情况如下:

(1)当前在轨卫星1 311颗,通信、导航与对地观测合计占87%。

(2)军、民、商卫星的比例分配为29%、26%、45%;通信卫星中商业卫星占74%,占在轨卫星的40%。

(3)呈现“一超多强”格局,美、

俄、欧、中居前列(“十二五”期间在轨卫星数为:美国445颗,俄罗斯146颗,欧洲131颗,中国129颗,日本47颗,印度23颗,其他国家或地区123颗)。

2.2 在轨应用卫星系统存在的问题

虽然近几十年来卫星通信技术得到了长足的发展,在轨卫星数呈逐年增多的趋势,但对于建设天、空、地一体化的信息网络仍然存在很多亟待解决的问题,主要表现为以下几个方面:

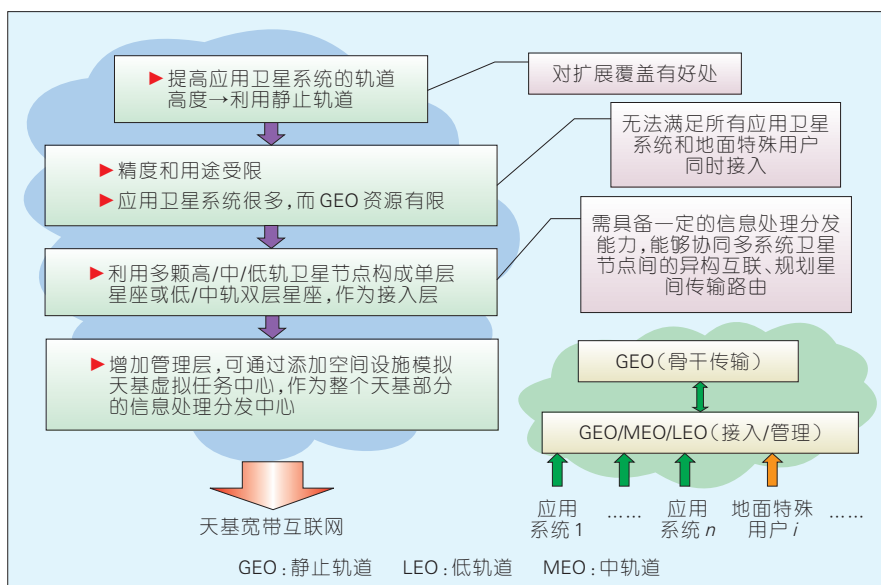
(1)为了满足获取信息的准确度,基本采用低轨制来“量身定制”开发,能够实现独立使用,标准化程度低,彼此相互独立,并呈现出“烟囱林立”的景象。

(2)不具备中继传输链路,只能在过顶时才能获取信息,不能满足广域覆盖需求。

(3)信息遵循先落地后共享的模式,获取的共享信息有时延,很难实行在全球建立地面站,获取共享信息受限。

3 天基信息网络

天基宽带互联网的发展思路,如图1所示。为满足广阔的覆盖范围,



▲图1 天基宽带互联网发展思路

提高应用卫星系统的轨道高度,我们需要在骨干传输层主要利用 GEO。由于 GEO 卫星资源受限,无法满足所有应用卫星系统和地面特殊用户的同时接入,使对地探测、侦察、监视精度大大下降,我们就需要在骨干传输层下方,利用多颗高/中/低轨卫星节点构成单层星座或低/中轨双层星座,作为接入层。另外,我们还需要增加管理层,通过添加空间设施模拟天基虚拟任务中心,作为整个天基部分的信息处理分发中心。

3.1 解决问题的途径

应用卫星系统由于基本上采用低轨(特别是遥感卫星与侦查卫星)及量身定制而使空间信息不能满足技术要求,我们若采用 GEO/同步轨道(GSO)卫星为应用卫星系统星座,仍不能满足探测、测试精度要求;同时 GEO 轨道资源有限,满足不了多种用户、多类业务的需求。为此,既考虑利用空间静止轨道资源,又保有应用卫星系统的现有功能,我们可以采用:以中继卫星在 GEO/ GSO 组网形成骨干层;骨干层辅以非同步轨道的中轨道(MEO)/低轨道(LEO)星座共同组成接入层、管理层,这两层联合构成天基互联网,如图 2 所示。

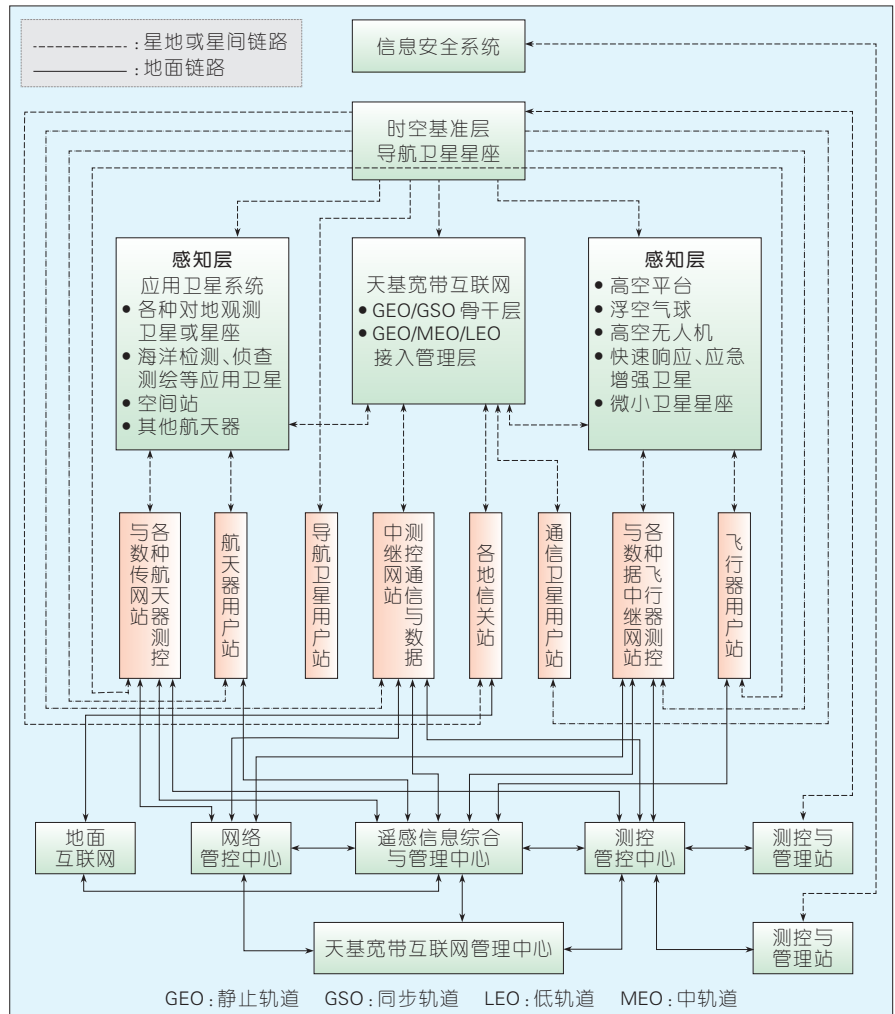
(1) 骨干层的功能

- 空间信息网的核心,需具备全球覆盖、结构稳定、宽带承载、接入便捷,以及支持多类型业务和异构网互联等能力。

- 骨干层中继卫星通过星间链路与星地链路、通过网关和地面互联网互联,形成天地一体的传输网。

(2) 接入、管理层的功能

- 接入层的功能为:GEO/GSO 及非 GEO 的 MEO/LEO 均可独立或联合地构成接入管理层星座,可将其看成是一个数传网。其任务是管理部分确定的网络拓扑结构,建立用于业务数据传输的网络物理链路,完成高实时业务数据端到端的快速运输,以及非实时业务数据的处理、产品生成,



▲ 图 2 天基宽带互联网架构

并提供产品信息的共享服务、分布式运行。

- 管理的功能为:解决网络(拓扑)管理、网络物理链路建立和网络数据传输的问题。

骨干层与接入、管理层共同组成天基宽带互联网。

可见,天基感知层获取的信息有两条传输通道:对于满足广域覆盖与信息共享要求的信息,可以经过一条从感知层经过天基互联网到地面的通道;另一条是应用卫星感知到的,专用信息直接到地的通道(即保留了原应用卫星系统的功能)。

3.2 天、空、地一体化信息网络架构

一体化的天、空、地信息网络,基

本组成如下:

(1) 以天基宽带互联网为核心,应用卫星系统(天基感知系统)为源端,组成天基信息网络。为满足未来空间应用体系的相关要求,应用卫星系统应梳理成若干性质的“应用子网”,实现可以用网、全面用网、高效用网的目标。

(2) 应急增强、快速响应由微小卫星分布组网及高空平台实现,与应用卫星系统共同组成天基感知网。

(3) 从空间地理角度看,海上平台是地基部分,但从信息传输角度看,需借助天基互联网才能有效实现其功能。

(4) 卫星导航、定位系统提供天基、地基的时空基准及服务范围,涵

盖各类卫星、高空平台、地面站、机载、舰、手持终端等。

(5)天基信息安全体系。由于天基信息是开放的、难于保密的,因此必须研究天基信息安全体系。

(6)陆地(基)基础网络。陆地是卫星遥感的对象,同时也是天基信息网络的最终用户,必须构建具有多系统空间信息收发和数据融合能力的新型卫星控制中心(直接接收过顶卫星的数据)及信息管理中心,建设具有中继下行、上行数据接收和发送功能的关口站。

天、空、地一体化信息网络的基本网络架构如图3所示。总体的网络结构主要由天基和陆基两部分组成:在天基部分,以天基宽带互联网为核心,以应用卫星系统(天基感知系统)为其源端,组成天基信息网络;在陆基部分,以地面互联网为核心,以各类地面站、机载、舰、手持终端、地面移动用户为其源端,组成陆基信

息网络。

4 天基信息传输的技术难点

天基信息传输系统是空间信息链的纽带,其独特的空间环境使其具有显著优势。同时,天基信息传输系统也不可避免地存在技术难点,这是由天基系统所处的空间环境所决定的,这些技术难点也会相应地带来传输性能的下降,主要表现为以下3个方面。

(1)信息传输距离远,星上处理能力受限

该技术难点带来以下两个问题:

- 端到端传输时延大,传输损耗大(见表1),链路质量差。这是传统卫星通信研究中就一直关注的问题,但是随着网络节点数量的增长,解决这一传统问题的方案可能不再局限于点对点的方式,而可以通过多节点协同加以解决。

- 时延、误码(见表2)、中断等区

别于地面链路的问题对组网也带来了全新的挑战。

(2)节点高度动态变化

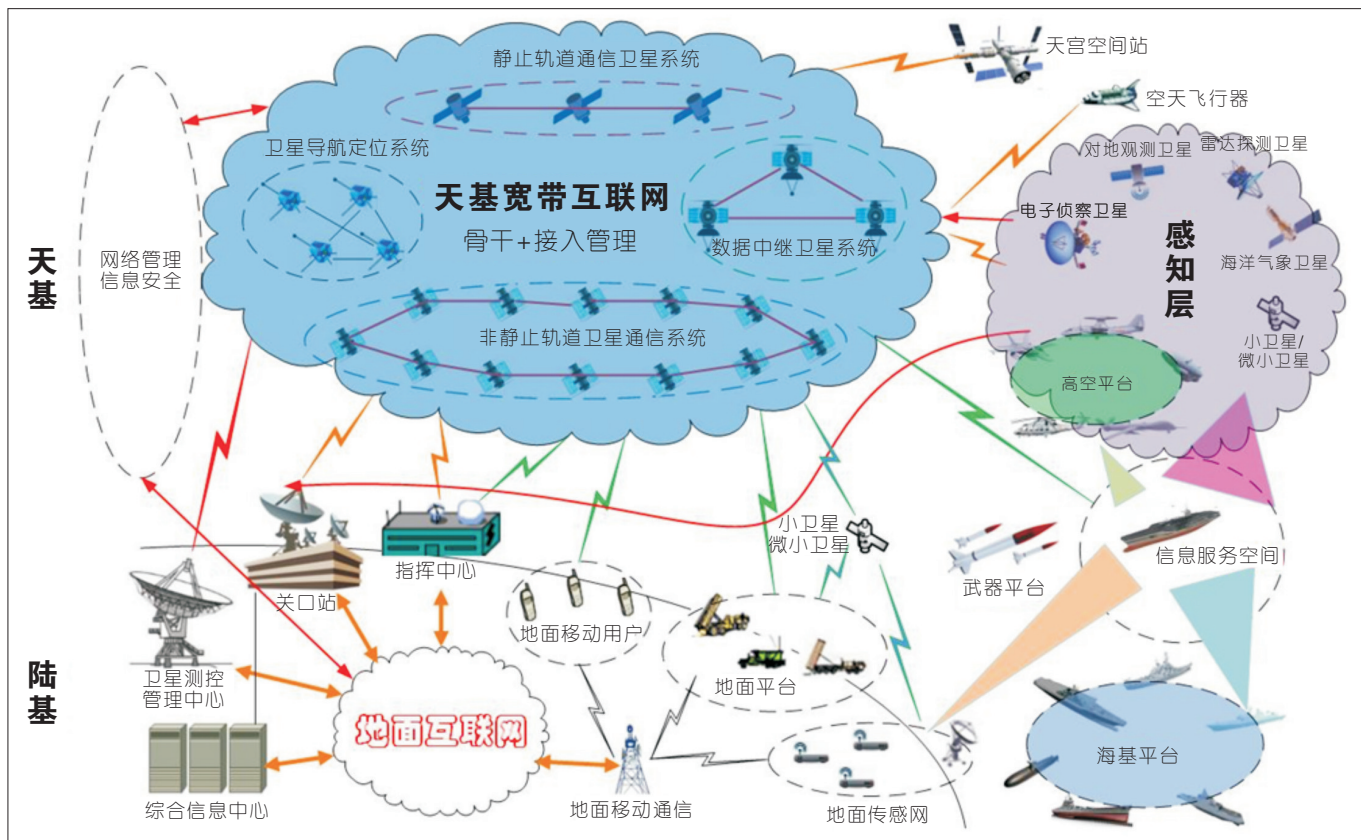
- 构成天基网络的各节点由卫星组成,并有一定的时间规律。如果考虑快响、应急加强的高空平台及微小卫星等节点,由于其运动特征通常不具备规律性,则会使天基互联网动态异构。

- 高度动态的特性在物理层则表现为高中断率和高误码率,卫星链路可以成功传输时的误码率达 10^{-6} ,而地面互联网中误码率仅为 10^{-8} 。

- 在链路层则要求节点能够动态接入、快速切换等。

- 由于节点的高度动态变化,整个网络的拓扑结构也会随之快速变化,形成动态网络拓扑,这将对网络层的路由形成极大的挑战。

- 在传输层,较高的误码率通常造成数据丢失,采用传统传输控制协议(TCP)将明显降低数据吞吐量。



▲图3 天基网络架构

(3) 天基传输中的非对称性

在天基系统中,通常下行链路的速率远大于上行链路的速率(见表2)。因此,TCP/IP协议必须加以不断改进,才能引入到天地一体化信息网络中。

与陆地信息传输系统一样,天、空、地一体化信息网络要满足一定的传输规则,即必须确定其适用的传输协议。

(1)一体化网络协议体系必须对于天基信息传输特殊性进行适配和支持,并能够与地面互联网协议无缝融合。

(2)空间数据系统咨询委员会(CCSDS)网络层、传输层等协议在具体实现上与地面TCP/IP协议是不同的,如何实现互联互通,需要通过关口站实现协议转换。

(3)需要开展各类适应天基网络特殊性的新协议体系(容迟容断网络(DTN)等^[9])及一体化网络协议互联新机制的研究与试验工作。

星际链路、星地链路如何选择传输手段,是采用微波还是激光^[9]?还是两者混合?它们又如何适应卫星对载荷的要求?以上这些是我们必须解决的关键技术问题,否则从技术上来讲就无法构成天基信息网络。

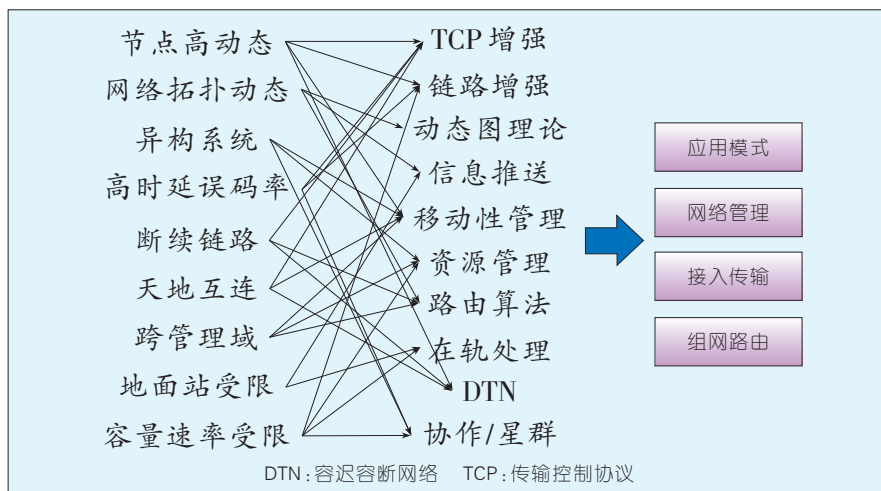
图4给出了天、空、地一体化信息网络的难点。

5 天地一体化信息网络仿真设想

天、空、地一体化信息网络具有规模庞大,结构复杂,网络高动态,异构,不规则,链接不稳定,分布式,自组织等特点,建设天、空、地一体化信息网络需克服大量技术难题,耗时较长,投资巨大。因此在实施建设前,需在半实物仿真平台的基础上通过实验测试网络架构、性能、技术难点、兼容性等。

5.1 仿真系统架构

仿真测试平台天基信息网(含天



▲图4 天、空、地一体化信息网络难点

基互联网、天基感知网及地基信息网),如图5所示^[10],在半实物仿真平台中部署虚拟任务中心、控制平台和各类虚拟空间节点,运行文中设定的天空地一体化协同通信任务,验证多卫星系统和多网络协同的概念。

5.2 仿真要素

仿真平台应实现的各类仿真要素,主要包括:

(1) 传输环境要素

- 传输环境,包括传输衰减、干扰、相应的误码率等;
- 物理层非理想特性,包括传播时延、方位角、掩星等。

(2) 网络设置要素

- 网络节点设置,包括节点数量、轨道、拓扑变化;
- 节点设备设置,包括指向、处理功率和存储空间大小、发射功率和设置的速率、其他空间节点约束。

(3) 管理设置要素

- 带宽、存储资源限制;
- 密钥分发管理、链路安全设置。

5.3 仿真实验平台

(1)仿真平台总体方案如图5所示,分为3个层面:实验逻辑平面、控制平面和数据平面。

- 实验逻辑平面:设计需要开展相关实验的天地一体化信息网络功

能应用方面的特定场景(场景可变换);

- 控制平面:依据实验逻辑平面需求配置仿真平台软硬件各项参数,负责实验过程的监控和数据的记录;

- 数据平面:结合软硬件半实物设备(条件许可情况下可利用小卫星或空间站等)实现全系统网络仿真。

(2)对天基特殊性的仿真,也分为3个层面。

- 软件模拟:利用计算机软件模拟天基网络物理层面、网络层面和管理层面的特殊性;

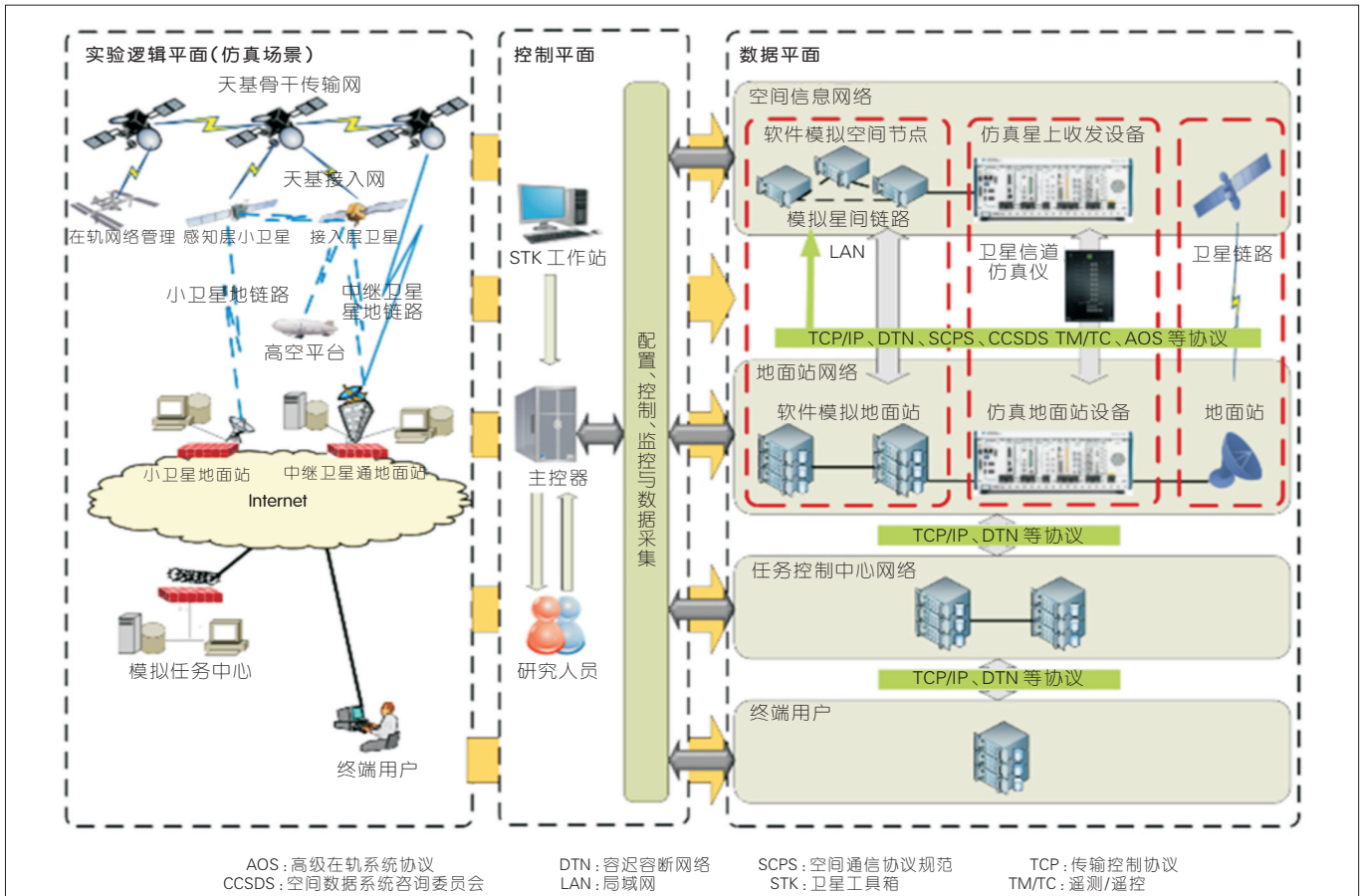
- 半实物仿真:由软件模拟产生相关数据,实物设备(收发机等)结合信道硬件模拟器实现物理层特性的仿真;

- 在轨系统载荷仿真:在仿真系统中结合小卫星、天链中继星或空间站等实现部分在轨系统载荷实验,其中天链中继星可提供真实中继链路特性,小卫星或空间站可实现真实通信载荷,对动态接入特性、网络协议等可以开展实际测试,通过空间站还可以研究在轨网络管理,实现天基网络自主运行。

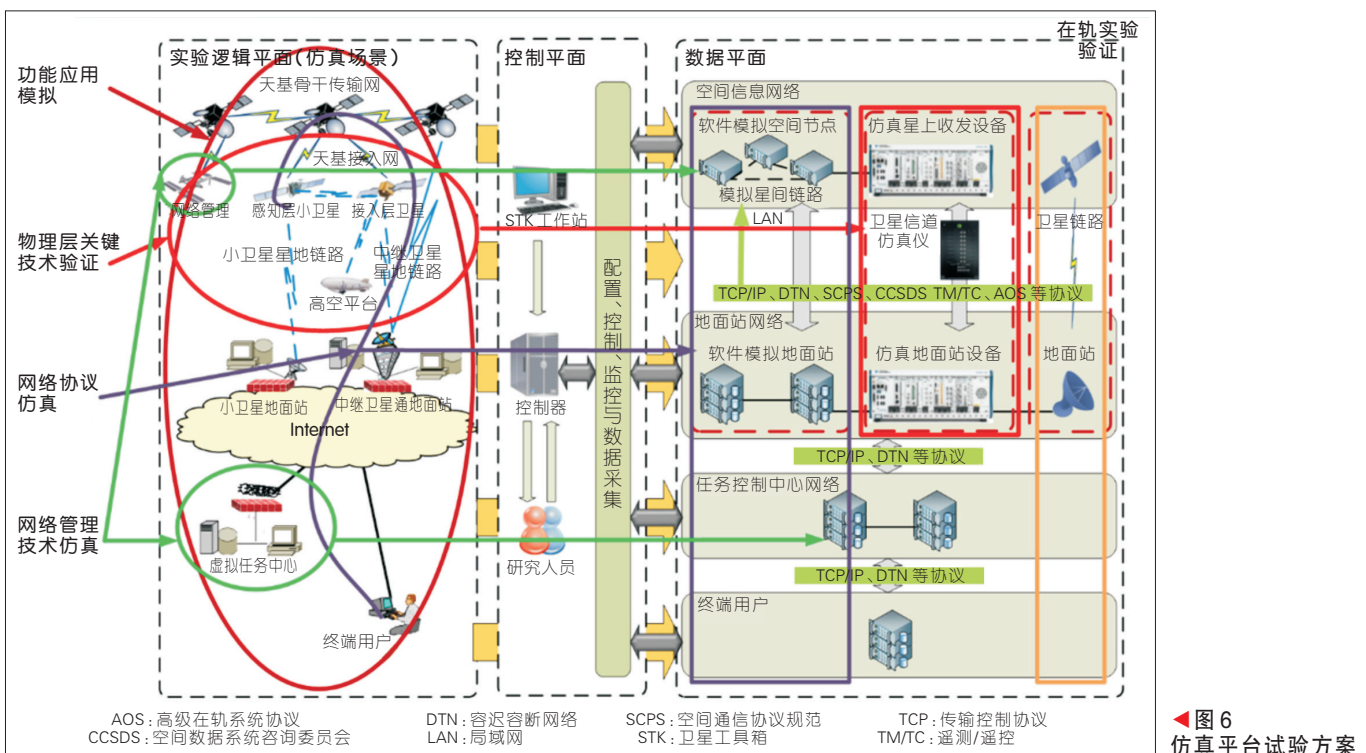
(3) 拟开展的研究工作

平台各部分可支持开展针对不同研究内容的仿真实验,实验方案如图6所示,主要包括五大方向。

- 功能应用模拟:主要集中在实



▲ 图5 仿真系统架构



▲ 图6 仿真平台试验方案

验逻辑平面,针对未来天地一体化信息网络能够支撑的网络业务与服务模型,提出各种基于通信基础架构的网络功能与应用场景,重点开展基于虚拟任务中心的任务控制执行技术的研究,在网络管理技术、网络协议技术、物理层关键技术等支撑下验证天地一体化信息网络的整体现状。

• 物理层关键技术验证:拟着重破解卫星、飞机、高空平台等网络动态接入,物理资源高效调度等物理层难题,同时为相关上层实验提供参数、要素的支撑,并将相关技术突破(实物或半实物)纳入仿真平台系统,开展集成演示验证。

• 网络协议仿真:针对天、空、地一体化信息网络,特别是天基网络的特殊性,研究能够适应天基网络环境并保证与地面互联互通的可靠高效的网络协议体系,综合研究基于IP over CCSDS协议、TCP/IP协议实现全IP协议体系以及基于DTN网络的覆盖层协议体系等若干方案,在物理层关键技术及网络环境仿真要素的支撑下开展各种仿真实验。

• 网络管理技术仿真:网络管理是未来天空地一体化信息网络高效运行的重要支撑技术,主要研究网络资源的高效配置管理与协调共享,同时研究利用具有资源、人员优势的空间站作为空间网络天基管理节点,探索空间网络的自主运行机制,在物理层和网络层协议相关技术支持下开展仿真实验。

• 小卫星/空间站在轨实验验证:充分利用未来小卫星发射/搭载天宫二号空间站载荷等模式实现前述研究成果的在轨演示验证,特别是将会综合各单位力量争取实现物理层动态接入技术、网络传输协议技术、网络安全与管理技术以及全功能演示等多个层面的在轨验证工作。

6 结束语

天基信息网络与地面信息网络(简称陆基信息网络)共同组成天、

空、地一体化网络。由于地基信息网络经过长期开发经营,目前已能够大规模建设、发展、应用,并且若干大规模信息中心已形成,而天基信息网络虽已有一定的卫星资源,但未形成网,无法实现对空间信息的技术要求。因此,当前天空地一体化信息网络的重点在天基部分。

(1)天基信息网络是由卫星通信系统、卫星导航定位系统、卫星感知系统组成(含对地遥感、海洋观测、测绘、快响/应急加强等卫星系列)。

(2)天基信息网络的建设目标为:建立一套区别于由任何单一任务驱动的、适应于特定要求的垂直基础设施,以网络化、一体化统缆全系统。

• 在不用全球建立专用地面站网络的条件下,实现不间断的天基广域数据获取、处理、传输功能,达到广域覆盖的需求。

• 网络化、一体化统缆全系统,将烟囱式分散或独立的各类感知系统以网络化综合起来,实现互联互通和必要资源共享,原定制系统功能仍保持。

(3)以建立天基互联网及网络化、一体化天基感知系统,实现该系统可以用网、全面用网、高效用网为重点。

参考文献

- [1] 张乃通,赵康健,刘功亮. 对建设我国天地一体化信息网络的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230
- [2] BURLEIGH S, VINTON C, CROWCROFT J, et al. Space for Internet and Internet for Space [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 23(12):80-86
- [3] 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] 李德仁,沈欣,龚健雅,等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 711-715
- [5] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天工程, 2013, 22(5): 1-14
- [6] SUN Z. Satellite Networking: Principles and Protocols [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2005
- [7] Interagency Operations Advisory Group (IOAG) Space Internetworking Strategy Group (SISG). Recommendations on a Strategy for Space Internetworking [R/OL].

- <http://cwe.ccsds.org/iaog/Final%20Products/SISG%20Report%20v1.4%20FINAL.pdf>
- [8] CAINI C, CORNICE P, RIRRINCIELI R, et al. A DTN Approach to Satellite Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 820-827
 - [9] SODNIK Z, FURCH B, LUTZ H. Optical Intersatellite communication [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1051-1057

作者简介



顾学迈,哈尔滨工业大学教授;主要研究领域为无线通信、先进卫星通信技术及个人通信系统;先后主持和参加基金项目20余项,获得7项科研成果奖;已发表论文100余篇。



赵康健,南京大学电子科学与工程学院讲师;目前主要从事卫星通信与空间信息网络协议技术研究;主持和参与国家自然科学基金、江苏省自然科学基金等科研项目多项;已发表论文20余篇。



贾敏,哈尔滨工业大学副研究员、博士生导师;主要研究领域为无线移动通信、卫星通信新技术、认知无线电技术、信号处理与检测及估计技术;主持和参与国家自然科学基金项目(青年及重大计划)、国防基础预研项目、“973”子课题及省部级等科研项目多项,获得2项科研成果奖;已发表论文60余篇。



张乃通,中国工程院院士,哈尔滨工业大学教授,通信技术专家;主要研究领域为集群移动通信、空间通信;先后主持研制成功MPT1327模拟集群移动通信系统并得到实用,打破了其他国家垄断中国专用通信系统市场的局面,获得14项科研成果奖;已发表论文200余篇。