

关于天基传输网络体系结构的讨论

The Space-Based Transmission Network Architecture

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2016) 04-0053-005

摘要: 认为天基传输网络是天地一体化信息网络的基础设施,其体系结构对整个一体化体系有着重要影响。提出“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构,并对其在星上能力、空中接口、协议体系、路由交换、综合验证等方面需要关注的问题进行了讨论。

关键词: 天地一体化信息网络;天基传输网络;网络体系结构;网络协议

Abstract: The architecture of the space-based transmission network has a substantial impact on the integrated space and terrestrial information network. A two-layered architecture constructed by integrating geostationary orbit (GEO) and low earth orbit (LEO) satellite constellations is proposed for the space-based transmission network, and related issues such as the onboard processing ability, air interface, protocol stack, routing and switching, and systematic verification are discussed.

Keywords: integrated space and terrestrial information network; space-based transmission network; network architecture; network protocol

天地一体化信息网络是一种通过星间、星地以及地面链路,有机联合陆、海、空、天各种平台的综合性信息网络系统。由于其对维护国家信息安全、引领空间科技前沿、带动新兴技术产业、形成核心竞争力所具有的深远意义,天地一体化信息网络已成为了当今世界重要的国际科学前沿和战略制高点。

美欧等空间科技强国从20世纪中叶就开始了天地一体化信息网络的探索和研究。中国政府在“九五”末期提出天基综合信息网计划,并在“十一五”期间提出“空间信息网络”的概念。当前,天地一体化信息网络已经被纳入中国国家发展战略。在2016年3月发布的“十三五”规划中,

提出要“加快构建高速、移动、安全、泛在的新一代信息基础设施,推进信息网络技术广泛运用,形成万物互联、人机交互、天地一体的网络空间”,并明确将“天地一体化信息网络”作为重大工程列入“专栏3科技创新2030——重大项目”^[1]。

天地一体化信息网络是一个复杂的大型体系,包含传输、感知、处理、时空基准和应用等多个不同的系统。在整个体系中,天基传输系统发挥着连接各类陆、海、空、天基平台,并为其提供全球化信息支持的重要作用。

作为天地一体化信息网络的基础设施,天基传输网络结构是整个天地一体化信息网络架构的基础^[2-4],因此中外研究者对天基传输网络体系结构开展了诸多的研究。根据近年来的研究和思考,我们提出对当前天

刘华峰/LIU Huafeng¹
孙智立/SUN Zhili²
杨昕/YANG Xin²
赵康健/ZHAO Kanglian³
程子敬/CHENG Zijing⁴

(1. 中国科学院,北京 100190;
2. 萨里大学,萨里 吉尔福德 GU2 7XH;
3. 南京大学,江苏 南京 210093;
4. 航天恒星科技有限公司,北京 100086)
(1. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, UK;
3. Nanjing University, Nanjing 210093, China;
4. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

- 依靠天基传输网络实现通信支援、数据快速回传和及时响应是突破全球信息支援困境的唯一途径
- 需要从由理论规划向工程实践过渡的角度出发,探讨双层天基传输网络架构的关键问题
- “骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构即以静止轨道通信和中继卫星为骨干,低轨道卫星和临近空间平台对关键区域进行增强的双层天基传输网络架构

基传输网络体系结构问题的一些认识,希望能够为目前的研究工作提供参考,并起到促进作用。

1 天基传输网络发展现状

1.1 国际现状

近年来,美国和欧洲等航天技术发达的国家或地区政府,以及 Google、Facebook、SpaceX 等国际互联网巨头和商业公司,分别从国防和经济目的出发,先后推出一系列天地一体化网络/天基传输系统体系结构。

收稿时间: 2016-05-17
网络出版时间: 2016-07-01

早在2002年,美国军方就针对其全球化军事战略需求,提出转型通信计划(TCA)^[5],目的是改进其全球军事卫星通信体系结构;2006年美国航空航天局(NASA)根据其天基网络、近地网络和深空网络现状和未来发展,提出空间通信与导航计划(SCaN)^[6-7]。2008年欧盟提出全球通信一体化空间架构(ISICOM)以支撑“欧洲空间政策”的实现^[8]。在商业领域,2007年成立的O3b Networks公司针对大型企业和政府的蜂窝回程和IP干线传输业务,打造覆盖地球南北纬45°之间所有地区的Ka频段中轨卫星星座,2014年开始提供服务,2015年在轨卫星数量达到12颗。2014年底至2015年初,面向全球提供互联网接入服务,OneWeb、SpaceX、Leosat等多家公司都推出了各自的、由低轨小卫星组成的卫星互联网星座计划,其中OneWeb已经获得频率轨位。这些星座的主要参数如表1所示^[10]。

综上所述,从国际趋势来看,经过数十年的积累,天地一体化信息网络已经开始逐步进入工程实施阶段。

1.2 中国现状

目前,中国对天地一体化信息网络的研究和规划进入加速发展阶段。工信部、科技部、国家自然科学基金委等科技部门、工业界和各大科研院所持续推进天地一体化信息网络的基础性研究和规划论证工作。2013年国家自然科学基金委启动“空间信息网络基础理论与关键技术重

大研究计划”;同年12月,工业和信息化部电子科学技术委员会启动“天地一体化信息网络发展思路研究”课题。2015年国家高技术研究发展计划(“863”计划)启动“未来一体化网络关键技术和示范”项目,同年11月,中国工程院设立“空间信息技术领域发展战略研究”重大咨询项目。天基传输网络结构始终是这些计划与项目研究的核心问题。

随着天地一体化信息网络受到日益广泛的关注,世界上越来越多的研究者加入这一领域,对天地一体化信息网络研究的发展起到了巨大的推动作用。天地一体化信息网络研究本身是一个巨大而复杂的系统工程问题。在涉及体系结构问题时,一体化概念下庞大的规模,不同的视角,常常导致研究问题的泛化和过度复杂化,进而在很多方面难以达成共识,这客观上给由系统结构研究向系统建设的转变带来了困扰。例如,仅就天基传输网络拓扑而言,目前在中国的研究中经常出现的就有高、中、低轨多层结构,高轨和低轨双层结构,中轨和低轨双层结构等多种假设方案。

1.3 发展情况对比

在国际发展进入工程阶段,中国大型工程准备启动的大背景下,良好界定系统边界,聚焦研究方向,才能有效推进体系结构研究规划向系统建设转变。在这一点上,值得吸取教训的典型例子是美国的转型通信计划。该计划历时数载,由于耗资巨

大,系统过于复杂,各方向技术发展水平难以均衡等因素,发展一直受到进度和预算问题的困扰,直至最终被迫取消。而作为成功的例子,卫星互联网星座O3b Networks仅用半年时间就达到了原计划1亿美元的收入水平,避免重蹈当年铱星系统的覆辙,关键在于其准确的定位——面向电信运营商,为地面通信覆盖不到的岛屿和海上大型船只提供服务),以及精简的系统规模——覆盖南北纬45°区域仅需12颗中轨卫星,比起铱星星座66颗卫星的规模,大大降低了成本和系统复杂性。

因此,我们认为从体系建设的角度出发,中国的天基传输网络体系结构,要契合国情,立足于航天系统现状,紧扣当前紧迫需求开展设计,保持有限规模,降低系统复杂性,同时要将初期建设成本和实现的时间跨度纳入设计要素。

2 “骨干+区域增强”的天基传输网络体系结构

2.1 关键需求

随着经济的发展,网络技术正向全球乃至太空拓展。对于日益增长的全球化信息支援需求,如果无法实现全球范围的地面站网,那么在航天测控的全球支持方面会受到限制,同时也难以实现全球范围内的及时信息获取、回传和通信支援,进而导致在应急突发、航天测控、航空运输、海洋权益等领域面临全球信息支援的困境。在这种条件下,依靠天基传输网络实现全球通信支援、数据快速回传和及时响应是突破这一困境的唯一途径。

2.2 网络体系架构

全球覆盖是天基传输网络实现全球信息支援的前提和首要条件。但需要指出的是:针对关键需求而言,这里天基传输网络的“全球覆盖”并不是指无差别的24h全球地表覆

▼表1 卫星互联网星座的主要参数

	卫星数量	轨道高度/km	频段	覆盖	星间链路	单星重量/kg	星座容量	数据传输率/(Mbit/s)	时延/ms	目标用户
O3b	目前在轨12颗	8 062	Ka	南北纬45°度之间	无	700	84(每8颗星)	1 600	<150	电信运营商等大型企业 和政府机构
OneWeb	规划650颗	1 200	Ku	全球	未知	125	5~10 Tbit/s	50	20~30	消费者和小型商业客户
Leosat	规划80~140颗	1 400 km	Ka	全球	有	未知	0.5~1 Tbit/s	1 228	50	大型企业和政府机构
SpaceX	规划4 000颗	1 100 km	Ku、Ka	全球	有	未知	8~10 Tbit/s	未知	20~30	消费者和小型商业客户

盖,应该是对于航天器和临近空间平台的测控和数据传输是在一定地表高度上的全球覆盖;而对于地面移动通信和互联网接入需求,定向区域覆盖仍然是主体,在此基础上保障全球范围内重点地区的覆盖。

因此,我们提出以静止轨道(GEO)通信和中继卫星为骨干,低轨道(LEO)卫星和临近空间平台对关键区域进行增强的双层天基传输网络架构,如图1所示。

在这一架构中3到多颗GEO骨干卫星通过星间激光或高速微波链路互联,形成传输网络骨干。骨干卫星承担对中、低轨卫星,以及特定区域内地面站视距外其他高轨卫星的测控管理,同时发挥对天基、空基和地基的通信和数据中继功能。在天

基传输网络建设的初期,骨干卫星在全球通信和数据中继方面发挥主导作用。

LEO通信卫星和临近空间平台,形成局域增强网络,并通过星间链路与骨干卫星连接,增强对关键地区的通信覆盖和信息支持。必要时,可再增加高椭圆轨道(HEO)卫星以提高对两极区域的覆盖。

遥感、导航等其他专业卫星系统通过星间链路,根据标准的系统间接口接入天基传输网络。

地面骨干网络通过信关站与天基传输网络连接,形成一种天地双骨干的架构。

2.3 需要关注的问题

在“骨干+区域增强”的双层天

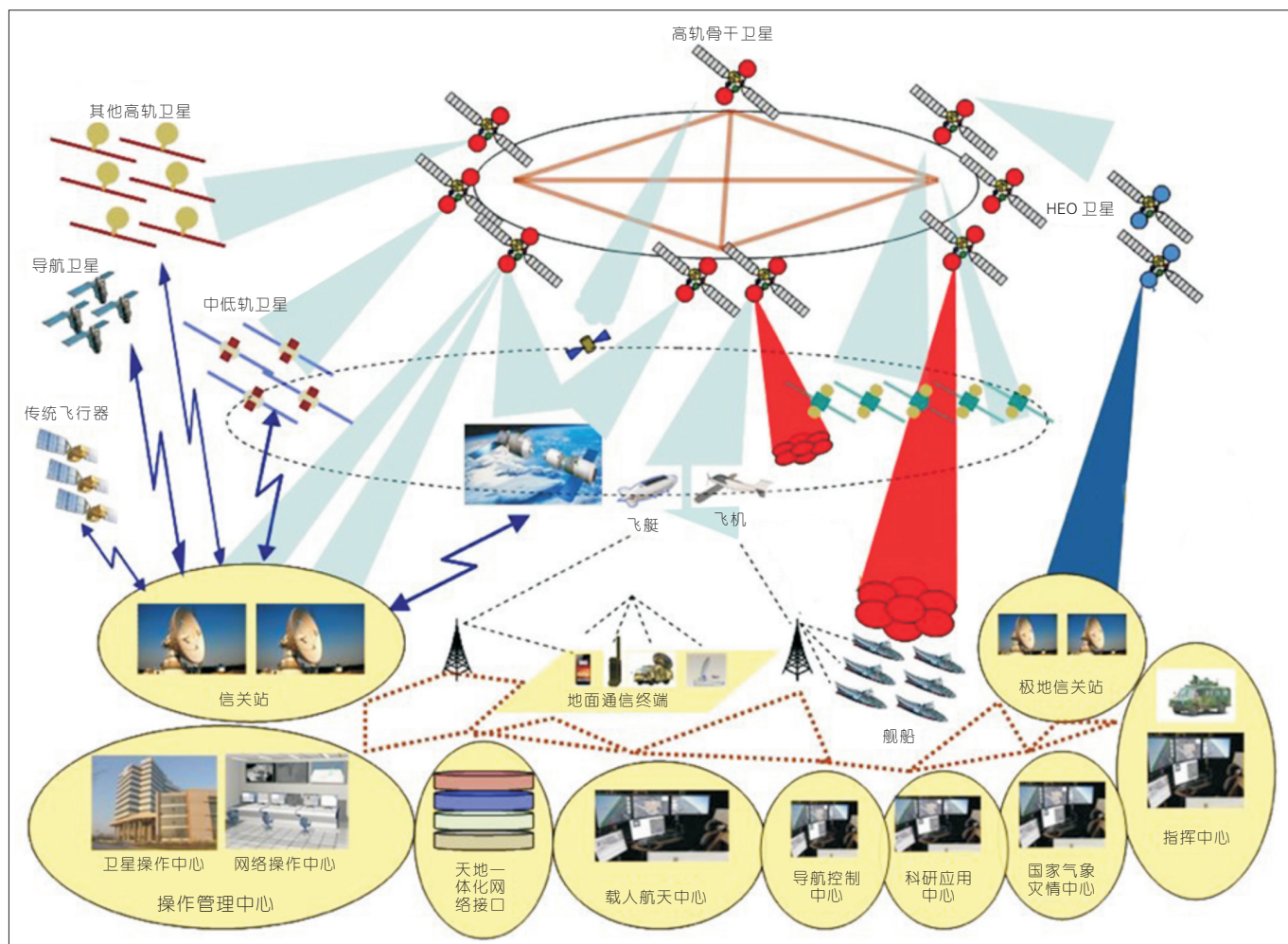
基传输网络架构中,需要重点考虑一些问题。

(1) 大容量和多功能的骨干层

在星上载荷方面,对处于核心位置的GEO骨干卫星有大容量和多点波束的要求。结合高通量卫星(HTS)的发展,目前的重点是激光链路、Ka频段相控阵和星上处理等技术^[11-12]。

同时,在单颗静止轨道大平台上承载多种载荷有困难时,为了克服轨位限制,要发展多颗不同功能小型静止轨道卫星共轨的技术。NASA的小型天基卫星项目(SSBS)^[13]和ESA的小型静止轨道卫星项目(SGEO)值得关注^[14]。

(2) 有限规模可以扩展的区域增强层



▲图1“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构

一方面,根据对关键区域服务的需求,以及对目标用户分布的分析和预测,结合不同业务属性的数据传输要求,合理布局星间链路,开展有限规模但具有扩展性的低轨卫星星座设计。

另一方面,充分利用目前微小卫星和临近空间平台领域快速发展所产生的技术成果,发挥其低造价、低成本、系统灵活、可重构的优势^[15]。同时增强应急发射/应急布设的能力,实现应急救援等情况下的区域内快速覆盖增强。

(3) 标准化的空中接口

具有高频谱效率和能量利用率的标准化空中接口是实现系统可扩展性的关键。这主要包括两个方面:一是保证低轨区域增强的通信卫星星座逐步扩展为全球覆盖星座;二是为遥感、导航等其他专业卫星系统与天基传输网络的互联提供基础。

(4) 以IP为核心的网络协议体系

天地一体化信息网络协议体系研究一般涉及到传输控制协议(TCP)/IP、国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)和容迟容断网络(DTN)三大体系。其中,CCSDS已基本停止了对空间通信协议标准(SCPS)协议体系的更新与维护,并建议采用DTN架构^[16]。从目前国际上已经开展的作为互联网节点的航天操作任务(OMNI)、航天飞机上的通信与导航演示(CANDOS)、太空互联网路由器(IRIS)、DTN在轨试验项目^[17-20]以及ISICOM、OneWeb等系统设计所采用的协议体系来看,网络层均基于IP。经过多年的研究,在近地空间范围内,IP对空间系统的适用性、TCP存在的问题及其改进方案和新型空间传输层协议、以及IP over CCSDS等都已大量的研究成果,就工程实践而言TCP/IP是目前可行的方案中最为成熟的协议体系;DTN网络以束协议(BP)为核心,通过覆盖网络的形式同样可以工作在TCP/IP之上,提供容迟容断等网络功能。进

一步,再考虑到与地面IP网络的互联,所以我们建议天基传输网络协议体系以IP为核心构建。

(5) 合理规划星上路由以及交换功能

从具体的天基传输网络结构出发才能得到优化的路由和交换体系设计。在双层天基传输网络中,首先应注重由不同业务特点所带来的不同星上处理能力需求。例如,对于遥感业务来说,大容量遥感数据的主要需求是尽快落地,以星上交换为主,而不是频繁星上路由和大规模星上处理,而且对数据链路的使用具有高度的不对称性,因此其重点是大容量的跨波束交换技术;而对于互联网接入业务,强调与地面IP网络的兼容性,重点是实现星地无缝的一体化路由传输。因此,关键是兼顾不同业务需求,规划星上载荷能力,同时利用相对简洁的拓扑结构,降低天地一体化网络中路由和交换问题的复杂性。

(6) 高度自动化的运行管理

在整个体系中,一个需要特别关注的问题是:网络化给天基传输系统运行管理模式带来的深刻影响。目前中国多数卫星系统仍采用以单星计划调度为主的运管模式,如何在天基组网条件下,形成高效的资源分配体系、高度自动化的任务准备,执行和评估过程,同时适应应急响应要求,是需要从体系层面重点研究的问题,并且具有迫切的现实意义。

(7) 其他问题

在双层天基传输网络中,由于GEO和LEO星座在覆盖范围、往返时延和平台能力方面存在的较大差异,以及由用户分布导致的整个系统业务分布的不均衡性,所以必须设计相应的服务质量保证(QoS)体系,才能发挥系统效率,满足端到端用户的服务需求^[21]。

另一个要关注的重点问题是:天基传输网络面临的安全挑战。卫星通信天然的开放性决定了其更加容易受到窃听和主动入侵。此外,卫星

系统的长时延和高误码率还会导致安全同步机制的失效,因此需要对从链路和节点的主动防御到整个协议体系的安全开展系统的研究^[23]。

3 综合演示验证平台的构建

综合演示验证平台对于天基传输网络体系结构研究具有特殊的重要性。在天基传输网络涉及技术范围广,认识存在差异的现状下,基于真实空间设施构建综合性技术试验平台,发挥实物系统等效的优势,能够真实地反映天基传输网络特征,提高试验验证可信度;能够加深不同领域研究者对系统整体的定量认识,同时对当前技术研究起到聚焦和引领作用。

数据中继卫星系统^[24]在功能、结构和服务对象上与天基传输网络一致。从结构上来说,其本身就是天基传输骨干;从系统功能上看,数据中继卫星系统承担天基测控和数据传输任务,可在全球范围内同时为多个高动态用户提供百兆甚至吉比特量级的数据传输服务;从服务对象上看,既包括高动态、全球范围内高速运行的中低轨航天器,又包括全球范围内分布、运行速度较慢,但姿态和轨迹变化较频繁的各类航空器、浮空器、远洋船舶等。目前数据中继卫星系统广泛应用于载人航天、对地观测、空间快速响应等领域。因此,可以基于数据中继卫星系统,围绕其业务体系,体现一体化互联特征和体系化应用,构建天基传输系统综合演示验证平台。

4 结束语

天基传输网络体系结构是整个天地一体化信息网络的基础。我们针对当前紧迫需求和技术发展趋势,对“骨干+区域增强”的双层天基传输网络架构及其相关问题进行了讨论。立足于全球服务,强化需求针对性,把握空间系统现状,在目前理论研究所积累的成果的基础上,通过综

合演示验证平台聚焦和引领技术发展,可以加速天基传输网络由规划论证向工程实践过渡,从而进一步带动天地一体化信息网络的发展。可以断定:天地一体化信息网络的构建将对中国和世界在空间技术领域的发展和影响以及科学探索产生深远的影响。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要 [EB/OL]. [2016-03-17]. http://news.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm
- [2] 张乃通. 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
- [3] 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
- [4] 闵士权. 我国天地一体化综合信息网络构想[J]. 卫星应用, 2016(1): 27-37
- [5] PULLIAM J, ZAMBRE Y, KARMARKAR A, et al. TSAT Network Architecture[C] // Proceedings of the 2008 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008). USA: IEEE, 2008: 1-7. DOI: 10.1109/MILCOM.2008.4753508
- [6] NASA. Space Communications and Navigation [EB/OL]. <https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/about/overview/index.html>
- [7] Space Communications and Navigation Office, NASA. Space Communications and Navigation (SCaN) Network Architecture Definition Document (ADD) Volume 1: Executive Summary Revision 2 [R]. Washington D. C: Space Communications and Navigation Office, 2011
- [8] VANELI C A, CORAZZA G E, LUGLIO M, et al. The ISICOM Architecture [C] // Proceedings of the 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC 2009), USA: IEEE, 2009: 104-108. DOI: 10.1109/IWSSC.2009.5286409
- [9] BLUMENTHAL S H. Medium Earth Orbit Ka Band Satellite Communications System[C] // Proceedings of the 2013 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2013). USA: IEEE, 2013: 273-277. DOI: 10.1109/MILCOM.2013.54
- [10] 刘悦, 廖春发. 国外新兴卫星互联网星座的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 139-148. <http://doi.org/10.3981/j.issn.1000-7857>
- [11] 姜会林, 刘显著, 胡源, 等. 天地一体化信息网络的几个关键问题思考[J]. 兵工学报, 2014, 35(增刊): 96-100
- [12] 潘成胜. 空间信息网络的若干关键技术[J]. 中国计算机学会通讯, 2013, 9(4): 46-51
- [13] BHASIN K B, OLESON S R, WAMER J D, et al. Design Concepts for a Small Space-Based GEO Satellite for Missions between Low Earth and Near Earth Orbits[C] // Proceedings of the 13th International Conference on Space Operations 2014. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. DOI: 10.2514/6.2014-1688
- [14] ESA. Small Geostationary Satellite Overview [EB/OL]. <https://artes.esa.int/sgeo/overview>
- [15] 张敬一, 刘志佳, 宁金枝. 小卫星在空间信息网络中的发展方向研究[J]. 卫星应用, 2015 (10): 18-22
- [16] CCSDS. Space Communications Protocol Specification [EB/OL]. <http://public.ccsds.org/publications/scps.html>
- [17] HOGIE K, CRISCUOLO E, PARISE R. Using Standard Internet Protocols and Applications in Space [J]. Computer Networks, 2005, 47(5): 603-650. DOI: 10.1016/j.comnet.2004.08.005
- [18] DAVID I, JAMES R, KEITH H, et al. STS-107 Case Study: End-to-End IP Space Communication Architecture[C] // Proceedings of the 2003 Ground Systems Architectures Workshop (GSAW 2003). USA: GSAW, 2003
- [19] FLORIO M, HOTOP D, GROVES S, et al. Connecting the Force From Space: The IRIS Joint Capability Technology Demonstration [R/OL]. www.dtic.mil/get-tr-doc/pdf?AD=ADA559469
- [20] IVANCIC W, EDDY W M, STEWART D, et al. Experience with Delay-Tolerant Networking from Orbit [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010, 28(5-6): 335-351. DOI: 10.1109/ASMS.2008.37
- [21] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load Balancing and QoS Provisioning Based on Congestion Prediction for GEO/LEO Hybrid Satellite Networks[C] // Proceedings of the IEEE. USA: IEEE, 2011: 1998-2007. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2157885
- [22] KOTA S, MARCHESE M. Quality of Service for Satellite IP Networks: A Survey[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2003, 21(4-5): 303-349. DOI: 10.1002/sat.765
- [23] BEJARANO J M R, YUN A, LA C, et al. Security in IP Satellite Networks: COMSEC and TRANSEC Integration Aspects[C] // Proceedings of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC). USA: IEEE, 2012: 281-288. DOI: 10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333089
- [24] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116

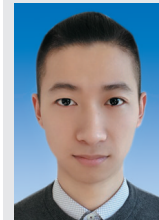
作者简介



刘华峰, 中国科学院软件研究所副研究员; 主要研究方向为卫星网络和传感器网络; 先后主持和参加多项相关领域的“863”和国家自然科学基金重大项目; 获部委级科技进步奖二等奖 1 项, 三等奖 2 项; 发表论文 20 余篇, 出版著作 1 部。



孙智立, 英国萨里大学通信系统研究所教授、研究生分院主任; 主要研究方向为卫星通信网络和未来互联网技术; 作为项目负责人承担过 15 项欧盟科研框架项目、2 项政府科研项目和 1 项欧洲空间局科研项目; 发表论文 200 余篇, 出版、编辑专著 3 部。



杨昕, 英国萨里大学通信系统研究所在读博士研究生; 主要研究方向为移动自组网、卫星通信、下一代通信网络等。



赵康健, 南京大学电子科学与工程学院博士、讲师; 主要研究方向为卫星通信与空间信息网络协议技术; 主持或作为骨干参与国家自然科学基金、中国工程院重大咨询项目、江苏省自然科学基金等多项; 发表论文 20 余篇。



程子敬, 航天恒星科技有限公司天地一体化信息技术国家重点实验室博士后、博士研究生导师、研究员; 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信系统、软件定义网络等。

综合信息

无人驾驶首个技术标准近期即将公布

中国汽车工程学会理事长付于武表示, 无人驾驶技术路线图即将正式发布, 这将是无人驾驶领域的首个技术标准。美国 IHS 汽车信息咨询公司日前预测, 2035 年中国将成为最大的无人驾驶汽车市场, 届时将拥有超过 570 万辆无人驾驶汽车。无人驾驶技术的发展突飞猛进, 消费者需要时间去消化, 其带来的法规、基础设施等一系列问题也亟待完善。付于武说, 无人驾驶的突破将是一个循序渐进地过程, 从主动安全技术升级为半智能, 最终实现完全无人驾驶。(转载自《通信世界网》)