

天地一体化信息网络发展综述

吴巍

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;
2.通信网信息传输与分发技术国家级重点实验室, 河北 石家庄 050081)

摘要:随着信息通信和航天技术的飞速发展,空间网络相关技术日趋成熟,全球信息化发展领域已全面拓展到人类生产、生活和科研的所有空间,包括陆地、海洋、天空和太空。对于我国而言,加快建设天地一体化信息网络,通过天地网络配合实现全球无缝覆盖的目标,是信息网络发展的重点。给出天地一体化信息网络的组成、网络形态与主要特点,研究归纳国内外天地一体化信息网络的发展现状与趋势,并分析给出建设天地一体化信息网络需要突破的关键技术,希望为我国天地一体化信息网络的研制和建设提供借鉴与参考。

关键词:天地一体化信息网络;发展现状与趋势;关键技术

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200101

Survey on the Development of Space-Integrated-Ground Information Network

WU Wei^{1,2}

1.The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081,China
2.Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Network Laboratory,
Shijiazhuang 050081,China

Abstract: With the rapid development of ICT(information communication technology) and aerospace technology, the space network related technology is becoming mature, the global promotion of information technology field has been fully expanded to all the space of human production, life and scientific research, including land, ocean, sky and space. For the China's information network, it is the focus to speed up the construction of the space-integrated-ground information network and realize the goal of seamless global coverage through the cooperation of the heaven and earth network. Firstly, the composition, network form and main characteristics of the space-ground integrated information network were described. Then, the development status and trend of the space-integrated-ground information networks at home and abroad were summarized. Finally, the key technologies needed to break through in the construction of the space- integrated-ground information network were analyzed, Hoping to provide reference for the development and construction of the space-integrated-ground information network.

Key Words: space-integrated-ground information network, development status and trend, key technology

1 引言

随着信息通信和航天技术及产品的日趋进步,全球信息化发展领域已全面拓展到人类生产、生活和科研的所有空间,包括陆地、海洋、天空和太空。对于我国而言,在维护和拓展国家利益时,信息网络一直面临着“覆盖不出去、信息难兼容、服务响应慢、安全有隐患”的困境。因此,在离地一定高度的空间建立信息基

础设施,打造覆盖全球的立体、多层次、全方位和全天候的信息网络,推动天地一体化信息网络发展建设,具有深远意义^[1-2]。2016年3月,第十二届全国人民代表大会第四次会议审议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年(2016-2020年)规划纲要》,将天地一体化信息网络列入了国家“科技创新2030重大项目”^[3],从而正式启动了我国天地一体化信息网络的建设

工作。

天地一体化信息网络是由空间卫星节点互联组成的天基网络与地面网络构成的。天基网络与地面网络融合发展,增加了网络广域覆盖的突出特点^[4-5],对于实现海上、空中以及地面网络系统难以覆盖的边远地区通信与信息服务有其明显优势,以成为广域通信保障和信息应用的一个重要发展领域。然而,由于空间环境和天基网络应用的一些特点,地面相对成熟的网络技术并不能直接应用到天基网络中,因此,发展建设天地一体化信息网络的重点是创新和突破天基网络技术。

本文首先给出了天地一体化信息网络的概念,包括天地一体化信息网络的组成、特点和网络形态;然后分析研究和归纳了国内外天地一体化信息网络的发展现状与趋势;最后分析了研制与建设天地一体化信息网络需要突破的关键技术。

2 天地一体化信息网络概述

2.1 天地一体化信息网络的组成

天地一体化信息网络以地面网络为依托,以天基网络为拓展,采用统一的架构、统一的技术体制、统一的标准规范,由天基网络与地面互联网和移动通信网互联而成^[4-6],如图1所示。在天地一体化信息网络中,不论是天上的卫星还是地面网络的路由交换设备等,都被统称为“节点”,其中的各种信息传输链路被统称为“链路”。

天基网络是由空间段和地面段组成的。空间段的天基星座网既可以包含地球同步轨道GEO卫星节点和非GEO卫星节点(例如,MEO或LEO卫星节点),也可以仅包含地球同步轨道GEO卫星节点,或者仅包含非GEO(例如,MEO或LEO)卫星节点;地面段的关口站节点网是由与天基星座网相关的卫星地面关口站互联构成的,它一方面与空间的天基星座网互联和交互信息,另一方面与地面的互联网和移动通信网互联和交互信息^[7-8]。

2.2 天地一体化信息网络形态

从国际上天地一体化信息网络的发展来看,其网络架构形态大致可以划分为以下3类^[9-10]。

(1) 天星地网

天星地网是天地一体化信息网络最早的网络形态,即天上的卫星节点之间没有星间链路,不进行互联组网,而是通过布设在全球的地面关口站与地面网络实现互联,构成“天星地网”的系统,提供覆盖全球的信息服务。例如,国际海事卫星通信系统(Inmarsat)等。

(2) 天基网络

天基网络是天地一体化信息网络的第二类网络形

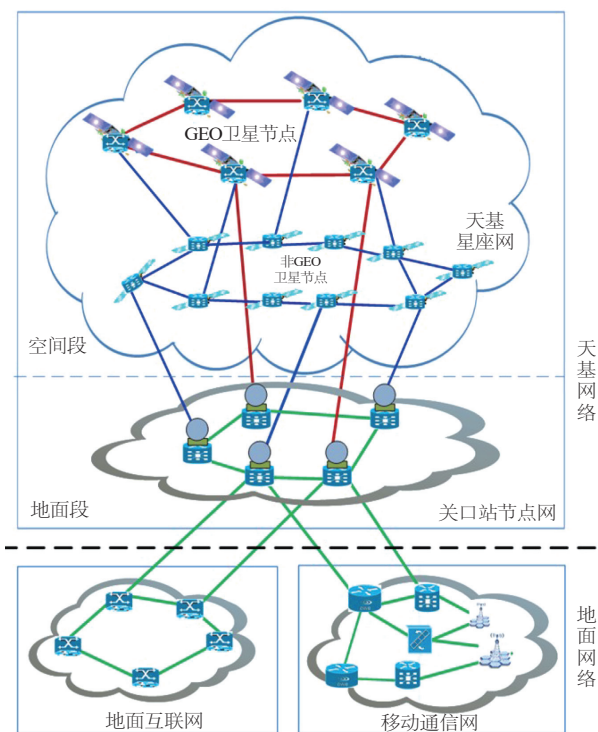


图1 天地一体化信息网络组成示意

态,这种网络形态中不依靠地面网络,仅通过天上卫星节点之间的“星间链路”互联,构建“天基网络”就可以为用户提供覆盖全球的信息服务。例如,美国军方的先进极高频率(AEHF)卫星通信系统,以及民用的低轨个人移动通信铱星(Iridium)系统等。

(3) 天网地网

天网地网是天地一体化信息网络的第三类网络形态,这种网络形态中不仅天上的卫星节点互联组网,地面的关口站节点也要互联组网,而且天网和地网相互联接、融合,共同构成天地一体化信息网络的“天网地网”。例如,美国的转型卫星通信系统(TAST)计划^[11]。

2.3 天地一体化信息网络的特点

天地一体化信息网络在物理空间上包含陆地(含海面)网络、空中网络 and 天基网络多个层级,特别是天基网络的特殊性导致其具有异构网络互联、拓扑动态变化、传输高时延、时延大方差、网络节点暴露、信道开放及卫星节点处理能力受限等特点,因此,其发展建设将面临诸多技术挑战^[12-14]。

(1) 网络异构互联且拓扑高度动态变化。天地一体化信息网络在组成上,由天基星座网、关口站节点网、地面互联网和移动通信网在内的多种异构网络互联融合而成,从而导致对网络的端到端通信协议设计、网络资

源和信息传送控制等技术带来挑战；如果天基星座网中包含非GEO轨道的卫星节点，则整个网络的拓扑结构将会高动态地变化，从而导致对网络端到端的路由寻址、链路和用户切换控制技术等带来挑战。

(2) 传输链路高时延且间歇性连接。天地一体化信息网络中星间和星地链路传输距离远，采用大带宽的激光或者微波链路，具有显著的“大时延带宽积”特性，存在信息传输高时延和时延抖动大的问题。加之网络拓扑的动态变化，进一步加大了节点间传输链路持续保持的难度和信息传输时延抖动的幅度，对网络端到端可靠信息传输技术带来挑战。

(3) 卫星节点暴露且信道开放。天地一体化信息网络中的卫星节点直接暴露于太空轨道上，除了考虑会受到空间环境中高能粒子辐射和太阳电磁辐射等的影响，而必须采取抗辐射加固技术之外，还要考虑节点和信道开放，更加容易受到人为干扰、窃听、无线入侵、病毒植入和拒绝服务等网络攻击，从而对网络安全技术带来极大的挑战。

(4) 卫星节点的资源受限。受卫星节点重量及太空环境等因素的影响，天地一体化信息网络中卫星节点的各种资源是受限的，例如卫星节点的计算、存储、带宽和电源功率等资源均受到较大限制，而且在现有技术条件下卫星节点发射后，硬件层面几乎没有升级改造的可能，难以实现能力的有效扩展。所以，应当合理地分配与协调地面网络与天基网络之间的功能和能力。

(5) 网络面向不同类别用户提供服务。在应用层面，天地一体化信息网络将面向陆、海、空、天各类军民用户提供服务，由于不同类别用户对网络服务质量(QoS)和安全性等的要求不同，如何通过物理隔离或者网络资源虚拟化等技术构建各类专用的逻辑网络，以满足各类不同用户的使用需求，将对网络资源管控和网络安全等技术带来挑战。

3 天地一体化信息网络发展现状与趋势

3.1 基于GEO星座的天地一体化信息网络

自从20世纪60年代第一颗GEO商用卫星(晨鸟号)升空以来，GEO卫星通信系统的技术已经非常成熟。GEO卫星节点在赤道上空距地面35 800 km的轨道上运行，从理论上讲，用3颗GEO卫星节点即可以实现全球覆盖，因此，基于GEO卫星节点来构建天地一体化信息网络是一种最简单的模式^[15-16]。下面介绍两个典型的GEO星座系统。

3.1.1 国际移动卫星(Inmarsat)系统

Inmarsat是国际上最早提供覆盖全球的商用卫星移动

通信业务的运营商^[17-20]。Inmarsat始建立于1979年，早期主要从事全球海事卫星通信服务，后来其运营范围逐渐扩展到了航空通信和陆地移动通信，1994年“国际海事卫星组织”改名为“国际移动卫星组织”，但其英文缩写不变，仍为“Inmarsat”。

Inmarsat系统是典型的“天星地网”形态，由空间段、地面段和用户段组成。

Inmarsat的空间段由其在空间运行的各种卫星节点组成。目前，Inmarsat已经发展到第五代系统，在轨运行的共13个GEO卫星节点，分别是5个使用L频段的Inmarsat第四代(I4)卫星节点，5个使用Ka频段的第五代(GX)卫星节点(GX5卫星于2019年11月26发射升空)^[21]，以及其他一些用于局部区域增强的卫星节点(例如，服务于欧洲航空网络EAN的S频段卫星I-S节点，覆盖欧洲、中东和非洲的L频段卫星Alphasat节点)。Inmarsat空间段的这些卫星节点之间没有星间链路。

Inmarsat的地面段由网络运维中心(NOC)、汇接点(MMP)中心和分布在世界各地的卫星关口站组成，网络运维中心(NOC)设在英国伦敦Inmarsat的总部，用于完成对Inmarsat卫星节点和地面网络的管理与控制；Inmarsat有3个地面信息汇接中心，分别位于美国的纽约、荷兰的阿姆斯特丹和中国的香港，用于汇接附近区域地面关口站的信息并接入地面光缆网，实现Inmarsat业务与地面互联网和移动通信网业务的互联互通；Inmarsat在全球设有11个关口站，分别部署于美洲的美国和加拿大(2个)，欧洲的意大利、荷兰和希腊，大洋洲的澳大利亚(2个)和新西兰(2个)，以及太平洋上的夏威夷(美)。

Inmarsat的用户段由各类船载站、机载站、LEO星载站，以及陆地岸站和用户手持终端站等组成，为世界各地的用户提供卫星电话和数据服务。

3.1.2 美军的先进极高频(AEHF)卫星通信系统

随着美军“军事星-Milstar”系统的退役，AEHF卫星系统成为了美军新一代的受保护卫星通信系统，可以为美军及盟军提供安全、受保护和抗干扰的全球军事卫星通信服务。AEHF系统比Milstar系统具有更大的传输容量和更高的数据速率，每颗AEHF卫星的总通信容量比由5颗卫星构成的整个Milstar星座还要大，同时响应时间也更短，能够更好地支持美军的带宽需求和快速反映服务需求^[22-24]。

AEHF卫星通信系统是典型的“天基网络”形态，由空间段、任务控制段和用户终端段组成。

空间段由6个GEO轨道上的AEHF卫星节点构成^[25]，2020年3月27日AEHF-6卫星发射升空，完成全系统组网^[26]。AEHF卫星节点具有星上处理和星间链路能力，其上行链路采用EHF频段(44 GHz)，下行链路采用SHF频段

(20 GHz), 数据速率范围为75 bit/s~8.192 Mbit/s。这些卫星节点通过V频段(60 GHz)双向的60 Mbit/s星间链路互联构成AEHF卫星星座, 提供的通信服务覆盖范围从地球北纬65°到南纬65°, 使得AEHF星座具有覆盖全球(除了南北极之外)的端到端全程信息处理与传送能力, 而无须地面固定关口站和网络的参与。这就减少了卫星通信系统对地面支持系统的依赖程度, 使AEHF卫星通信系统在地面控制站被毁坏后至少还能自主工作6个月。

任务控制段(MCS)提供AEHF卫星星座的控制和维护, 由任务规划单元、测试和训练仿真单元、任务操作单元、作战支持和支援单元组成。MCS分布在多个地面固定和移动站点。固定站包括位于美国施里弗空军基地的AEHF卫星操作中心以及位于范登堡空军基地的卫星操作中心。3个移动单元包括1个指挥移动备用司令部和2个AEHF移动星座控制站。

AEHF系统支持的用户终端段主要包括: 单信道抗干扰便携式(SCAMP)终端、保密移动抗干扰可靠战术终端(SMART-T)、先进超视距终端系列(FAB-T)和海军多波段终端(NMT)。这些可快速部署的机载、舰载、车载和便携式AEHF终端将连通全球范围的作战部队, 为其带来任何时间和任何地点的通信能力。

3.2 基于LEO星座的天地一体化信息网络

LEO低轨星座采用运行在低地球轨道(LEO, 距离地球表面120~2 000 km)的卫星群提供宽带互联网接入等通信服务, 具有低时延、信号强、可批量生产和成本低等特点, 能够进一步满足人们对全球无缝覆盖的宽带网络服务需求。截至2020年4月, 全球在轨卫星数量约为2 600颗, 其中约1 900颗是低轨卫星, 占比超过70%, 为国防、军事以及商业领域提供通信、导航、遥感、气象等服务^[27-29]。

早期的低轨通信星座主要有铱星、全球星和轨道通信卫星系统等, 现在都已升级换代, 其中铱星二代系统开始提供宽带数据服务^[27]。目前, 国外多家企业提出了低轨互联网星座计划, 以SpaceX公司为代表的企业开始主导低轨互联网星座建设, 其“星链”星座已发射11批总计653颗卫星(节点), 进入密集部署阶段; “一网”星座已发射3批共74个卫星节点; TeleSat和Kuiper星座有待实施; 国内“虹云”“鸿雁”“天象”“银河”相继发射了验证卫星。目前, 全球低轨互联网星座发展正在进入一个高潮期, 下面主要介绍近年来发展较快的主要低轨互联网星座的进展情况。

3.2.1 “铱星”(Iridium)二代系统投入运营并提供宽带服务

美国摩托罗拉公司1987年提出了第一代“铱星”全

球移动通信系统, “铱星”一代系统1996年开始试验发射, 1998年投入业务运营, 其空间段由66个重量较轻的小型卫星节点和数个备用卫星节点组成, 运行在780 km的太空轨道上, 使用Ka频段与关口站进行通信, 使用L频段和终端用户进行通信交互^[30]。“铱星”系统经历了2001年的破产重组后, 为取代逐渐进入寿命终期的“铱星”一代星座, 铱星公司2005年启动了“铱星”二代系统的部署^[31-32]。从2017年1月14日到2019年1月11日, 75个“铱星”二代卫星节点(66个在轨工作卫星节点和9个在轨备份卫星节点)分8次成功部署^[33], 单个卫星节点的质量为860 kg, 设计在轨使用寿命为15年, 运行在高度780 km、倾角86.4°的低轨道, 卫星节点提供L频段速度高达1.5 Mbit/s和Ka频段8 Mbit/s的高速数据服务。

2019年1月16日, 铱星公司推出了Iridium Certus350宽带服务, 可为用户提供352 kbit/s的数据通信速度。2020年2月27日, Iridium Certus700正式上线, 最高下载数据速度较上一代翻一番, 已达702 kbit/s。Iridium Certus可为申请购买该服务的企业和团队提供移动办公功能, 并为自动驾驶汽车、火车、飞机等提供双向远程通信, 还可以满足在蜂窝网络覆盖范围之外用户的关键信息搜索服务需求, 用户主要包括急救人员和搜救组织^[34]。

3.2.2 “一网”(OneWeb)发射3批共74个卫星节点

英国OneWeb通信公司的“一网”星座是一个由882个(648个在轨, 234个备份)卫星节点组成的网络, 为全球个人消费者提供互联网宽带服务的低轨卫星星座。计划于2022年初步建成低轨卫星互联网系统, 到2027年建立健全的、覆盖全球的低轨卫星通信系统。648个通信卫星节点的工作频谱为Ku波段, 在距地面大约1 200 km的高度环形低地球轨道上运行^[35]。

2019年2月, 首批6个互联网卫星节点成功升空; 2020年2月7日、2020年3月21日第二批及第三批各34个卫星节点发射升空。至此, OneWeb互联网卫星项目在轨运行卫星节点已有74个, 展示了超过400 Mbit/s的宽带速度和32 ms时延的系统性能^[36]。

OneWeb公司原计划在2020年完成10次卫星发射任务, 快速部署第一阶段648个卫星节点, 2021年实现全球服务, 最终实现1 980多个卫星节点在轨运行, 从而构建覆盖全球的宽带通信网络。然而, 2020年3月27日, 因受到新冠肺炎疫情影响, OneWeb及其最大投资者日本软银的20亿美元投资谈判破裂, OneWeb向美国破产法院申请破产保护。但2020年5月, OneWeb仍向美国联邦通信委员会(FCC)递交了卫星宽带服务申请书, 将计划建设的星座提升到47 844个卫星节点的量级, 并对系统的轨道平面和部署特性进行调整, 以完成全球网络的覆盖^[37]。

2020年7月3日，英国政府宣布，其主导的财团和印度移动网络运营商Bharti Global成功联合竞购了卫星运营商OneWeb，以帮助重组其星座业务。目前OneWeb已经开始其新卫星的制造工作^[38]。

3.2.3 “星链”（Starlink）进入大规模部署阶段，已发射11批总计653个卫星节点

美国SpaceX公司的卫星互联网项目“星链”（Starlink）于2018年3月得到FCC批准进入美国市场运营。根据SpaceX向FCC提交的文件，“星链”星座计划总计部署12 000个卫星节点，其中包括4 425个卫星节点的轨道高度1 100~1 300 km的中轨道，7 518个不超过346 km高度的近地轨道卫星节点。SpaceX预计2025年最终完成12 000个卫星节点发射时，能够为地球用户提供至少1 Gbit/s的宽带服务，最高可达23 Gbit/s的超高速宽带网络。此外，2019年10月SpaceX又向FCC提交了额外发射3万个卫星节点的申请，轨道高度在328~580 km^[39]。

在组网第一阶段，约1 600个卫星节点将在550 km高度处环绕地球运行。之后，2 700多个卫星节点会进入1 100~1 325 km的较高轨道，完成全球组网。第二阶段的7 000多个卫星节点将进入更低的300 km高度，增加整个网络的带宽。

每个Starlink卫星节点重约227 kg，装有多高通量相控阵天线和一个太阳能电池组，使用以氙为工质的霍尔推进器提供动力，配备和“龙飞船”相似的星敏感器高精度导航系统，能够自动跟踪轨道附近的太空碎片并避免碰撞，卫星节点的在轨寿命为1~5年。每个卫星节点的生产成本和发射成本已经远远低于50万美元，60个卫星节点可提供1 Tbit/s的带宽，即每个卫星节点的带宽接近17 Gbit/s。

SpaceX于2018年3月发射了两个互联网测试卫星节点，启动星座计划的实施^[40]。2019年5月23日至2020年8月18日，先后发射11批卫星节点^[41]，前8批每批为60个“星链”卫星节点，第9批为58个“星链”卫星节点和3颗地球观测卫星，第10批为57个“星链”卫星节点和2颗地球观测卫星，第11批为58个“星链”卫星节点和3颗地球观测卫星。

目前，SpaceX公司正在稳步推进“星链”星座计划实施，进入大规模部署阶段，累计发射“星链”卫星节点653个。根据其计划，2020年将进行24次发射任务，至2020年年底完成共计1 500个卫星节点发射，同时准备2020年在美国北部和加拿大提供服务，至2021年服务扩展到全球人口覆盖范围。

3.2.4 电信卫星（TeleSat）公司星座拟于2022年开始部署

加拿大卫星运营商电信卫星（TeleSat）公司是世界五大商业卫星运营商之一。2016年，TeleSat披露其低轨

星座计划，该系统将包括在两个轨道上的至少117个卫星节点，之后TeleSat方案更改为300个卫星节点或更多。公司打算2022年开始提供包括加拿大在内的区域性服务，2023年开通全球服务^[42]。

卫星将分布在两组轨道面上^[43]：第一组轨道面为极轨道，由6个轨道面组成，轨道倾角99.5°，高度1 000 km，每个平面至少12个卫星节点；第二组轨道面为倾斜轨道，由不少于5个轨道面组成，轨道倾角37.4°，高度1 200 km，每个平面至少有10个卫星节点。就功能上而言，第一组极轨道提供了全球覆盖，第二组倾斜轨道更关注全球大部分人口集中区域覆盖。TeleSat的星座将在Ka频段（17.8~20.2 GHz）的较低频谱中使用1.8 GHz的带宽用于下行链路，而在上Ka频段（27.5~30.0 GHz）的带宽为2.1 GHz用于上行链路。单个卫星节点重约800 kg，设计寿命10年，并携带两个冗余的氦燃料电力推进系统，整个星座的总容量将达到16~24 Tbit/s，其中约8 Tbit/s用于销售，剩余的容量将覆盖海洋和无人居住的陆地。

2018年1月12日，TeleSat的低轨高通量试验卫星LEO Vantage1搭载印度极地卫星运载火箭（PSLV）发射入轨，用于验证低地球轨道星座的低时延宽带通信。2020年4月30日，TeleSat公司表示由298个卫星节点组成的互联网星座的使能技术已足够成熟，将选择一家主要承包商研制低地球轨道卫星。TeleSat公司计划于2022年开始部署，将78个卫星节点发射到极地轨道。到2023年年底，将剩余的220个卫星节点发射到倾斜轨道。其中极地卫星节点将于2022年在北纬高纬度地区投入使用，并在2023年发射倾斜轨道卫星节点后开始全球服务。

3.2.5 亚马逊推出柯伊伯（Kuiper）星座计划

2019年，亚马逊推出柯伊伯计划，拟投入数十亿美元发射3 236个Ka波段卫星节点，其中784个卫星节点位于590 km的高度，1 296个卫星节点位于610 km的高度，1 156个卫星节点位于630 km的轨道，以提供高速、低时延的互联网宽带服务^[44]。

柯伊伯星座计划是目前所有低轨互联网星座中最低、最密集的一种，它在高度上与其他星座区分开，一方面避免了同轨道的拥挤和碰撞，另一方面占据最低的轨道可使通信性能达到最优、发射运输成本最低、发射可用的火箭也最广泛。但缺点是，对同样的地表范围需要的卫星数量会相对最多，以便覆盖到所有的目标区域（南北纬56°之间）。

亚马逊尚未披露其打算何时发射首批“柯伊伯”卫星节点，但需要在2026年年初之前发射至少一个卫星节点，才能达到国际电联申请后7年内让频谱启用的时间要求。该公司是2019年3月向国际电联提出Ka波段频谱申

请的。亚马逊2019年7月对FCC表示,它打算分5个阶段来发射柯伊伯项目卫星节点,卫星节点设计工作寿命为7年,2026年前将完成一半数量的卫星节点发射任务。

3.2.6 我国规划的多个LEO星座系统发射试验卫星

(1) “鸿雁”星座

“鸿雁”星座是中国航天科技集团有限公司规划并发布的LEO星座,是将由300个低轨道小卫星节点组成的,具有全天候、全时段且能在复杂条件下实时双向通信能力的全球系统,能实现对海域航行船舶的监控和管理、对全球航空目标的跟踪和调控,以保证飞行安全,还能增强北斗导航卫星系统,提高北斗导航卫星定位精度。2018年12月29日,鸿雁星座发射首个试验星节点“重庆号”,配置有L/Ka频段的通信载荷、导航增强载荷、航空监视载荷,可实现鸿雁星座关键技术在地面试验^[45]。

(2) “虹云”星座

“虹云”星座是由中国航天科工集团第二研究院规划发布的LEO星座,设计由156个卫星节点组成,在距离地面1 000 km的轨道上组网运行,构建一个卫星宽带全球移动互联网实现全球互联网接入服务。2018年12月22日,虹云星座技术验证星在酒泉卫星发射中心成功发射入轨后,先后完成了不同天气条件、不同业务场景等多种工况下的全部功能与性能测试^[46]。

(3) “天象”星座

“天象”星座是中国电子科技集团公司按照“天地一体化信息网络”实施方案设计的LEO星座,由120~240个卫星节点组成,采用星间链路和星间处理交换技术,能够实现在国内布设极少数地面关口站支持下的全球无缝窄带和宽带通信与信息服务。2019年6月5日,“天象”试验1星、2星通过搭载发射成功进入预定轨道,卫星节点搭载了基于软件重构功能的开放式验证平台,实现了SDN(软件定义网络)天基路由器、星间链路、导航增强和ADS-B等设备功能,首次开展了基于低轨星间链路的天基组网信息传输、星间测量、导航增强、天基航空航海监视等技术试验^[47]。

(4) “银河Galaxy”星座

成立于2018年的银河航天公司,规划建设了由上千个卫星节点组成的“银河Galaxy”星座,轨道高度1 200 km,系统建成后用户可以高速灵活地接入5G网络。2018年10月25日,银河航天试验载荷“玉泉一号”搭载长征四号乙运载火箭(CZ-4B)发射升空,进行星载高性能计算、空间成像、通信链路等试验验证。2020年1月16日,银河航天首发星发射升空,卫星重量200 kg,采用Q/V和Ka等通信频段,具备10 Gbit/s速率的透明转发通信能力,可通过卫星终端为用户提供宽带通信服务^[48]。

3.3 发展趋势与展望

在全球信息化应用的需求牵引和信息通信及航天领域技术发展推动的双重作用下,天地一体化信息网络将得到迅猛发展。为了面向不同行业用户提供覆盖全球的综合性信息服务,天地一体化信息网络将在多个独立建设的天基信息系统基础上逐渐发展起来,并将经历从分立系统到体系综合的复杂过程^[49-53]。

3.3.1 通过星间链路实现天基网络的空间连通

为了实现全球无缝覆盖,特别是覆盖超过地表70%以上面积的海洋,天地一体化信息网络将利用星间链路实现天基信息网络在空间的连通,并且在卫星节点上配置具有信号处理和路由交换能力的载荷。这样的天基网络就可以减少对地面设施的依赖。一方面,增强了其自主运行的能力;另一方面,只需在地面布设少量的地面关口站就可以实现全球的无缝覆盖。这种空间互联的天基网络方案非常适合我国^[7-8,32,54]。

3.3.2 天基网络由单层星座向多层星座拓展

目前已经建成的天基网络都是单层星座,例如,AEHF系统是GEO单层星座网络,铱星系统是LEO单层星座。不同轨道高度的星座网络具有不同的特点,可提供的服务差异也很大。GEO星座网络的结构简单,少量的卫星节点就可以实现全球覆盖,但是在信息传输时延和对地面终端要求等方面存在缺点;LEO星座网络的结构比较复杂,需要大量卫星节点才能覆盖全球,但是在信息传输时延和对地面终端要求等方面有优势。显然,多层星座(例如GEO+LEO)网络在综合性能以及网络抗阻塞和抗毁性等方面比单层星座网络具有更优越的性能^[6-7,55-56]。

3.3.3 天基网络由单一功能向多功能拓展

随着信息通信及航天领域技术的发展,天基网络的功能将由原来单一的通信功能向通信、导航增强、对地观测和物联网等多功能拓展。例如,铱星一代系统仅具有通信功能,铱星二代系统除了提高了其通信载荷的性能之外,还加装了具有其他功能的信息处理载荷,拓展了导航增强、低分辨率对地成像、全球航空监视(ADS-B)、全球航海监视(AIS)和气候变化监视等功能。随着天基网络通信与计算能力的增强,具有多种功能的“天基信息港”建设将成为现实^[10,29-30,57-58]。

3.3.4 星间链路以激光为主,星地链路以微波为主

激光链路具有通信容量大、安全性好、设备轻便等特点,另外在大气层外还具有传输损耗小、传输距离远、通信质量高的优点,因此天基网络的星间链路将采用激光链路为主,微波链路为辅的技术方案。即不论是GEO星座的星间链路,还是LEO星座中同轨道面的星间

链路，都将采用激光链路，而LEO星座中异轨道面之间节点的星间链路采用微波链路。对于星地链路，由于存在大气的影响，将采用微波链路为主，激光链路为辅的方案^[13,59-62]。

3.3.5 天基网络与地面网络融合发展

在应用方面，天基网络与地面网络面对不同的应用场景各自具有优势，是互补关系。地面网络（包括地面移动网络）能够在人口密集区域提供大容量的通信与信息服务，但受制于技术和经济成本等因素，只覆盖了约20%的陆地面积，小于6%的地表面积。天基网络则可以解决地面网络解决不了的偏远地区、荒漠、山区、海洋、空中与太空等的通信问题，特别是偏远地区物联网应用的全球无缝覆盖问题，是地面网络的有益补充。另外，发生地震、海啸等严重自然灾害时，地面网络容易受损而导致通信中断，汶川地震中，天基网络成为重要的应急通信手段^[63]。

在技术方面，天基网络与地面网络分别基于各自的特点和需求在不断进步，但总的来说，地面网络的技术进步快于天基网络，例如软件定义网络（Software Defined Network, SDN）、网络功能虚拟化（Network Functions Virtualization, NFV）和网络切片（Network Slicing, NS）等。近年来，这些新的网络技术在经过适应空间环境的改进后逐步应用于天基网络，出现了天基网络与地面网络技术融合发展的趋势。根据国际电信联盟（ITU）的预测，未来的6G移动通信系统将融合地面无线通信、高中低轨卫星通信以及短距离直接通信等技术，融合通信与计算、导航、感知和人工智能等技术，为信息通信市场和应用提供更广阔的创新空间^[64-69]。

4 天地一体化信息网络关键技术分析

天地一体化信息网络研制与建设的工程规模大，涉及的专业领域广，技术难度高，需要突破一系列的关键技术。

4.1 技术参考模型

按照“网络一体化、功能服务化、应用定制化”思路，采用网络功能虚拟化、软件定义网络等技术，从逻辑上将天地一体化信息网络划分为信息传送、网络服务、应用系统3个层次。同时，立足提高体系安全防护及快速响应能力，突出安全防护、运维管理的一体化保障的支撑作用，形成如图2所示的“三层两域”技术参考模型^[4-6,70-71]。

(1) 信息传送层

在统一的网络协议体系下，兼容微波传输和激光传输等多种通信手段，采用“分域自治、跨域互联”机制，确保各自独立运行和自主演化的天基GEO星座网、天基LEO星座网、地面关口站节点网等子网协同完成天地一体化信息网络路由和端到端信息传送，为实现大时空尺度联合组网应用提供支撑。

(2) 网络服务层

在统一的云平台框架下，按照“资源虚拟、云端汇聚”机制，实现天基分布式信息资源向地面关口站网络（含地面信息港）聚合，并以多中心形式联合提供网络与通信、定位导航授时增强、遥感与地理信息服务，形成功能分布、逻辑一体的网络服务体系。

(3) 应用系统层

面向天地一体化信息网络的各应用领域（例如：

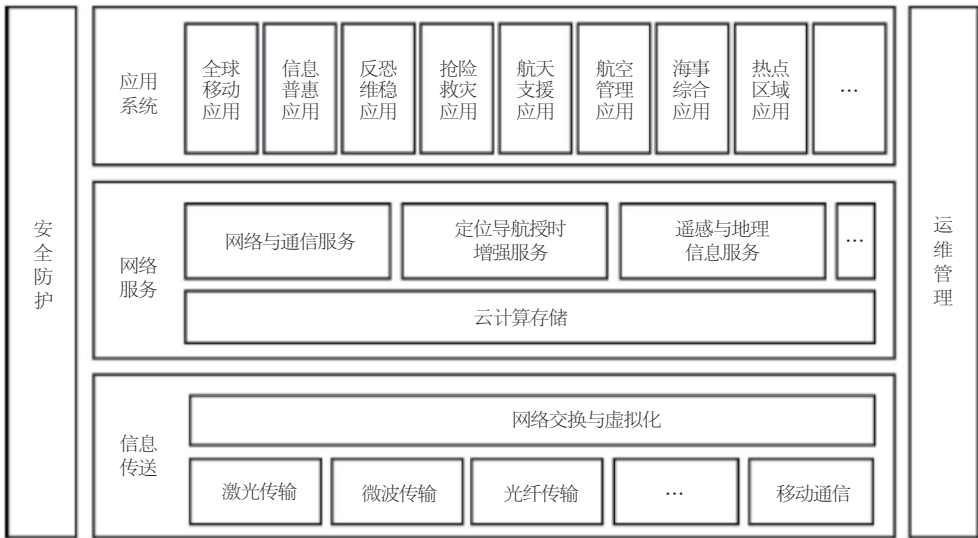


图2 天地一体化信息网络技术参考模型

航天支持、航空管理和海事综合应用以及全球移动通信等),将信息传送、网络服务等功能向各应用领域的用户端延伸,通过网络分隔隔离、跨域安全控制等途径,动态构建面向不同领域的应用系统、具有不同安全等级的业务承载网,并与本地应用组合集成,构建满足不同需求的应用系统。

(4) 安全防护

按照“弹性体系、内生安全”思路,强化物理安全和网络安全一体化设计^[9],从体系结构层面建立弹性可扩展的网络体系,同时形成适应高动态网络特性,并能覆盖网络、服务、应用多层次的网络安全防护体系。

(5) 运维管理

在统一的运维管理框架下,采用“分级管理、跨域联合”机制,集成综合测控、网络管理、服务管理、运维支撑手段,通过跨域联合管理,生成全网统一运行态势,支持实现全网资源跨域联合调度,为用户提供一体化运维服务。

4.2 关键技术

4.2.1 体系结构设计及优化技术

天地一体化信息网络是涉及多轨道的天基星座网、关口站节点网、地面互联网和移动通信网的异构网络,同时也是面向多个应用方向和多类服务对象互联的复杂系统。网络内部存在激光、毫米波、微波等多种传输链路,以及全光电路、射频(RF)电路、分组等多种交换技术体制,其网络拓扑、规模和连接关系等均动态可变,需要适应近地空间(3.6万千米以下)、临近空间(20~100 km)、近地(20 km以下)、海面和陆地等多种用户接入环境。如何按需实现网络结构自组织、网络状态自调节、网络传输自适应,提升网络多级安全和服务能力,需要结合技术现状,创新开展天地一体化信息网络体系结构设计及优化技术研究,以满足全球覆盖、按需服务、安全可靠、灵活接入和天地一体等能力需求^[7,56,70-75]。

4.2.2 星座设计与优化技术

星座设计是天基网络的一项专有的技术,是对天基星座网的构型、卫星节点轨道/频率、星间/星地互联链路等的总体设计,其目标是用最少的卫星节点和最佳的性能实现对指定区域的覆盖。在设计中,既要面向各类应用系统的服务范围和服务对象做“设计”,又需要结合空间卫星节点的轨位和频率等实际情况反复做“安置性”的优化。从网络中卫星节点所处轨道位置来看,由于GEO卫星节点对地相对静止,卫星节点间的网络拓扑相对固定,往往会成为构建天基星座骨干网络的首要选择;而在非GEO卫星节点网络方面,由于不同轨道的卫星节点提供

不同覆盖范围、传输速率、业务支持能力,因此其星座构型、轨道和频率等都需要进行优化设计^[7,56,76-80]。

4.2.3 网络协议设计与优化技术

天地一体化信息网络由天基星座网、关口站节点网、地面互联网和移动通信网互联构成,并且面向不同业务需求的应用系统和用户提供服务,而且具有网络传输链路距离长、时延及其变化范围大、连接通断频繁及通联关系动态可变、网络用户广域接入和突发业务量大等特点。一方面,需要在综合网络实现、成本与风险等约束条件下,开展与天地一体化信息网络特点相适应的信息传输、路由交换、接入控制等网络协议研究,解决“大时延带宽积”条件下的端到端可靠信息传送控制问题,以提升网络资源利用率及业务支持能力;另一方面,也要充分考虑地面网络技术(例如,软件定义网络、网络功能虚拟化、网络切片、边缘计算等技术)最新进展和发展趋势,以及天基网络与地面网络互联互通要求,开展新型天基网络协议的设计,并通过仿真和样机验证等手段,设计出适合我国天地一体化信息网络发展的网络协议体系,满足各类用户的使用需求^[56,80-86]。

4.2.4 网络资源虚拟化及按需组网技术

在应用层面,天地一体化信息网络将面向陆、海、空、天各类军民用用户提供服务,由于不同类别用户对网络服务质量(QoS)和安全性等的要求不同,如何实现天地一体化信息网络资源的灵活调度以及与任务的高度匹配,满足应用需求,可围绕天基网络节点资源受限、GEO卫星节点与非GEO卫星节点能力差异大、在轨硬件升级难度大等问题,开展GEO、MEO和LEO等不同轨道卫星节点、链路和地面关口站资源(如计算、存储、带宽、频率和功率等)的虚拟化研究。在信息传送层与网络服务层之间增加网络资源虚拟管理与调度子层,在网络服务层与应用系统层之间增加服务编排与封装子层,使得网络能够根据不同应用系统的不同任务构建虚拟逻辑网络(网络切片),并提供按需服务,提高网络资源的利用率,实现网络资源可重组和网络功能可重构,提升网络的按需服务能力^[56,86-91]。

4.2.5 网络可靠信息传输技术

天地一体化信息网络中的卫星节点和链路动态变化且稀疏分布,导致多点到多点间的信息传输容量随网络拓扑的时变空变而发生变化,高动态时变网络对传统信息传输理论和技术带来巨大的挑战,需要重点开展星间/星地高速激光与微波通信技术研究工作。在高速激光通信技术方面,核心技术主要包括相干激光调制、多制式数字解调、兼容有/无信标光的快速捕获与高精度跟踪、基于光学相控阵的光多址接入技术等;在高速微波/毫米波通信技术方面,为实现数吉比特每秒的高速传输,核

心技术主要包括超高速高频谱效率传输技术体制、多载波超高速调制解调和天基网络协作信息传输技术等。另外,考虑到天基网络卫星节点暴露、链路开放和复杂干扰等因素,有必要开展高频谱效率可靠信息传输与抗干扰技术研究工作^[56,59,92-97]。

4.2.6 网络安全防护技术

天地一体化信息网络中卫星节点和星间/星地链路暴露在空间,更加容易受到人为干扰、窃听、网络入侵、病毒植入和拒绝服务等网络攻击。此外,还面临多用户类别、资源异构、复杂服务和多级安全等需求,需要解决天地一体化信息网络安全防护架构设计、网络安全功能内嵌、密码按需服务和分级安全防护等问题,确保天地一体化信息网络安全可靠运行。针对网络安全防护架构设计和网络安全功能内嵌问题,可基于“拟态防御”的思想,采用“动态异构冗余—多模裁决—异常清洗”的网络防御模式,实现安全功能内嵌,能够对“已知的未知”风险或“未知的未知”威胁实施可度量的安全防护。针对密码按需服务和分级安全防护等问题,开展跨用户域/网络域/应用服务域的密码资源统一管理调度、星载资源受限设备轻量级可重构密码算法、多级安全加密和密码业务处理等关键技术研究,为天地一体化信息网络实体安全认证、信息保密传输和应用服务系统安全防护提供密码技术支撑^[98-104]。

4.2.7 网络运维管理技术

天地一体化信息网络面临多尺度、多资源、异构性的复杂服务需求,如何获取有效而充分的网络资源,需要解决网络管理体系架构设计、网络资源优化利用和服务资源协调管理等问题,实现网络效能最大化和应用满意度最大化。针对网络管理体系架构和服务资源优化问题,可基于面向服务的框架体系(SOA),采用基于企业服务总线(ESB)的服务资源发现、挖掘、注册和管理方法,通过信息传输、格式转换、服务资源接口标准化、资源协同调度等技术方法,实现异构服务的重复高效运用,并采用模式匹配、事件序列分解、复杂语义检测、关键序列标定等方法,实现实时事件流分析和资源匹配优化。针对网络多维资源优化问题,可面向分布式资源管理,采用凸优化、稳健性优化和多目标优化理论,在多尺度下优化带宽、功率、波束、路由和转发器等网络资源,有效提高网络资源使用效率,提高网络服务效能^[56,105-110]。

4.2.8 高并发差异化用户接入控制技术

天地一体化信息网络具有时空跨度大、网络拓扑高动态变化、用户广域分布和突发接入需求量大等特点,同时需要面向陆、海、空、天各类用户提供差异化服务。仅以用户接入速率为例,不同用户接入的信息速率

差异很大(地面传感器用户接入速率只有几十比特/秒,甚至更少,而航天传感器用户接入速率可达几十兆比特/秒,甚至上百兆比特/秒),如何解决高并发、有差异化服务需求的用户接入控制问题,需要研究面向差异化服务需求的用户接入时变信道的速率自适应传输、时变网络结构的接入切换控制、时变网络资源的按需自适应灵活分配等关键技术,以提高天基信息网络用户接入的可靠性,提升用户信息端到端传送服务的能力。此外,随着地面5G移动通信系统的商用,也要考虑5G移动用户接入天基网络的相关技术问题^[2,56,80,111-118]。

4.2.9 仿真验证及评估技术

天地一体化信息网络组成单元及相互通联关系动态复杂,涉及的关键技术和服务对象众多,需要依托OPNET、NS2及STK等仿真平台,构建完善的天地一体化信息网络仿真系统,建立不同轨道卫星节点的通信体制模型和不同轨道网系的网络模型库,开展信息传送层、网络服务层、应用系统层面的仿真研究。对关键算法和网络的整体性能指标、互联互通能力、资源利用率、运行状态等进行能力和运行情况仿真,对组网拓扑架构、路由与交换、网络安全防护、网络运维管理等技术体制进行仿真与验证,为不同任务类型网络的通信技术体制选取、性能指标设计提供支撑。并针对不同任务类型,合理选取效能评估方法和评价指标,构建面向多任务的网络总体效能评价体系,并与网络体系结构设计形成反馈迭代优化^[2,56,119-124]。

5 结束语

天地一体化信息网络是我国未来重要的公共信息基础设施,是“十三五”规划纲要部署的重大项目,该项目的部署和启动对于保障国家安全、维护和拓展国家利益、推动军民深度融合、促进国民经济和社会发展具有重大意义。希望全国从事信息网络与航天技术与装备研制的技术人员能够积极参与该重大项目的科技创新工作,形成多专业领域优势互补的创新团队,协同攻关,为天地一体化信息网络研制与建设做出贡献。

参考文献:

- [1] 吴曼青.关于天地一体化信息网络发展的考虑[C]//天地一体化信息网络高峰论坛论文集,中国:北京,2013:72-79.
WU M Q. Consideration of the development of integrated information network[C]//Global integration of information network summit forum, 2013, Beijing, China, 2013:72-79.

- [2] 张乃通,赵康,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):223-230.
ZHANG N T, ZHAO K, LIU G L. Thought on constructing the integrated s-terrestrial information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.
- [3] 新华网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年 (2016-2020年) 规划纲要[EB/OL].[2016.03.17]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm.
Xinhua net. Outline of the 13th five year plan for national economic and social development of the people's Republic of China (2016—2020) [EB/OL].[2016.03.17]. http://www.xinhuanet.com/politics/2016lh/2016-03/17/c_1118366322.htm.
- [4] 秦鹏, 陆洲, 黄照祥, 等. 天地一体化网络体系能力参考模型设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(6): 629-635.
QIN P, LU Z, HUANG Z X, et al. The design of reference model for the capability of integrated network system[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(6): 629-635.
- [5] 秦鹏, 陆洲, 石磊, 等. 面向多任务并发驱动的服务定制网络地面系统设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5):492-496.
QIN P, LU Z, SHI L, et al. Design of ground system for SCN driven by concurrent multitasking[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5):492-496.
- [6] 吴巍, 秦鹏, 冯旭, 等. 关于天地一体化信息网络发展建设的思考[J]. 电信科学, 2017(12):3-9.
WU W, QIN P, FENG X, et al. Reflections on the development and construction of space-ground integration information network[J]. Telecommunication Science, 2017(12):3-9.
- [7] 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.
SHEN R J. Some thoughts of Chinese integrated space-ground network system[J]. Engineering Science, 2006, 8(10):19-30.
- [8] 闵士权. 我国天基综合信息网构想[J]. 航天器工程, 2013, 22(5):1-14.
MIN S Q. An idea of China's space-based integrated information network[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(5): 1-14.
- [9] 张平, 秦智超, 陆洲. 天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4):24-28.
ZHANG P, QIN Z C, LU Z. The space wideband backbone interconnected system in the integrated space and terrestrial information network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016, 22(4):24-28.
- [10] 唐飞龙, 徐明伟, 李克秋, 等. 软件定义的天地一体化信息网络[J]. 中国计算机学会通讯, 2018(14), 3:63-67.
TONG F L, XU M W, LI K Q, et al. Software defined space-ground integrated information network[J]. COMMUNICATIONS OF THE CCF, 2018(14), 3:63-67.
- [11] PULLIAM J, ZAMBRE Y, KARMAKAR A, et al. TSAT network architecture[C]// in Proceeding of IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2008), USA: IEEE, 2008:1-7.
- [12] 姜会林, 丁莹, 付强, 等. 天空地一体化信息网络几个关键问题的思考[C] //天地一体化信息网络高峰论坛论文集, 中国:北京, 2013:148-152.
JIANG H L, DING N, FU Q, et al. Several key problems of the earth integrated information network[C]//Global integration of information network summit forum, 2013, Beijing, China, 2013: 148-152.
- [13] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6):157-172.
YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent development and its prospect of satellite communications[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6):157-172.
- [14] 汪春霆, 翟立君, 李宁, 等. 关于天地一体化信息网络典型应用示范的思考[J]. 电信科学, 2017(12):36-41.
WANG C T, ZGAI L J, LI N, General idea of application system for space-ground integrated information network[J]. Telecommunication Science, 2017(12):36-41.
- [15] 郭庆, 王振永, 顾学迈. 卫星通信系统[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
GUO Q, WANG Z Y, GU X M, Satellite communication system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [16] 夏克文. 卫星通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2015.
XIA K W. Satellite communication[M]. XIAN: Xidian University Press, 2015.
- [17] FEBVRE P, BOUTHORS X, MAALOUF S. Efficient IP-multicast via inmarsat BGAN, a 3GPP satellite network[J]. Satellite Communication Network, 2007, 25: 459-480.
- [18] 郭春启. 第四代Inmarsat 系统的应用及新一代卫星系统简介[J]. 电视技术, 2014, 38(10): 101-104.
GUO C Q. The fourth generation inmarsat system and a brief introduction to next generation satellite system[J]. Video Engineering, 2014, 38(10): 101-104.
- [19] Inmarsat. Our technology[EB/OL].[2020.07.17]. <https://www.inmarsat.com/about-us/our-technology/>.
- [20] 360个人图书馆. 海事卫星 (inmarsat) 系统介绍 [EB/OL].[2016.08.24]. http://www.360doc.com/content/16/0824/10/34652962_585529223.shtml.

- 360doc.com. Introduction of Inmarsat system[EB/OL]. [2016.08.24].
http://www.360doc.com/content/16/0824/10/34652962_585529223.shtml.
- [21] 搜狐网.国际海事卫星成功发射GX5卫星[EB/OL].[2019.12.02].
https://www.sohu.com/a/357870694_99921063.
sohu.com. INMARSAT successfully launched Gx5 satellite[EB/OL].[2019.12.02].
https://www.sohu.com/a/357870694_99921063
- [22] MALESKI M, ZIMBLER A E. Internetworking through milstar[A].IEEE Military Communications Conference[C]. San Diego, America,1995. 474-478.
- [23] 杨海平,胡向晖,李毅. 先进极高频(AEHF)卫星[J]. 数字通信世界,2008(6): 84-87.
YANG H P,HU X H,LI Y. Advanced extremely high frequency(AEHF)satellite[J]. Digital Communication World, 2008(6): 84-87.
- [24] 百度百科. 先进极高频卫星[EB/OL].[2012.01.19]. <https://baike.baidu.com/item/先进极高频卫星/20808531?fr=Aladdin>.
baike.baidu.com. Advanced extremely high frequency satellite[EB/OL].[2012.01.19]. <https://baike.baidu.com/item/先进极高频卫星/20808531?fr=Aladdin>.
- [25] Gunter's Space Page.AEHF 1,2,3,4,5,6[EB/OL].[2018.10.19].
https://space.skyrocket.de/doc_sdat/aehf-1.htm.
- [26] 航天长城. 宇宙神5发AEHF-6军事通信卫星[EB/OL]. [2020.04.02].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1662851368172396721&wfr=spider&for=pc>.
Aerospace Great Wall. AEHF-6 military communication satellite by Atlas-Centaur 5 rocket[EB/OL].[2020.04.02].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1662851368172396721&wfr=spider&for=pc>.
- [27] 王亚,朱立东. 太空互联网发展及应用[J].国际太空,2016(3): 43-49.
WANG Y, ZHU L D. Space internet development and application[J]. Space International, 2016(3): 43-49.
- [28] 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.
LIU Y, LIAO C F. The development of overseas emerging satellite internet constellation[J]. Science & Technology Review,2016, 34(7): 139-148.
- [29] 刘洁,潘坚,曹世博. 低轨互联网星座业务发展趋势分析[J].航天系统与技术,2015(7):17-21.
LIU J, PAN J, CAO S B. Analysis of the development trend of Leo internet constellation[J]. Space System and Technology,2015(7):17-21.
- [30] 肖永伟,孙晨华,赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空,2018(11):24-32.
Xiao Y W,SUN C H,ZHAO W S. Consider of the development of LEO communication constellation[J]. Space International, 2018(11):24-32.
- [31] Iridium. Iridium NEXT is taking flight[EB/OL]. [2017-11-01].
<https://www.iridium.com/network/iridiumnext>.
- [32] 孙晨华,肖永伟,赵伟松,等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学, 2017(12):43-52.
SUN C H,XIAO Y W,ZHAO W S, et al. Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband internet constellation[J]. Telecommunication Science, 2017(12):43-52.
- [33] 前瞻网. 2019年SpaceX首飞铱星公司第二代铱星系统卫星群发射完毕[EB/OL].[2019.01.17]. <https://t.qianzhan.com/caijing/detail/190114-ea89911b.html>.
qianzhan.com. In 2019, the launch of the second generation Iridium satellite system of SpaceX's first flight Iridium satellite company is completed[EB/OL].[2019.01.17]. <https://t.qianzhan.com/caijing/detail/190114-ea89911b.html>.
- [34] 亿欧元网.东山再起的铱星依然充满创造力[EB/OL].[2020.03.11].
<https://www.iyiou.com/p/124766.html>.
iyiou.com.Iridium is still full of creativity[EB/OL].[2020.03.11].
<https://www.iyiou.com/p/124766.html>.
- [35] 李小龙,邓恒. “一网”星座的发展与启示[J].国际太空,2017(12):9-14.
LI X L,DENG H. The development and Enlightenment of "OneWeb" constellation[J].Space International,2017(12):9-14.
- [36] 新浪科技. OneWeb又一批34颗卫星发射 累计在轨卫星数达74颗[EB/OL].[2020.03.22]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-03-22/doc-iimxyqwa2459064.shtml>.
tech.sina.com. Oneweb launched another batch of 34 satellites, with a total of 74 satellites in orbit[EB/OL].[2020.03.22]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-03-22/doc-iimxyqwa2459064.shtml>.
- [37] 搜狐网. 差点破产的OneWeb还在抢资源新申请4.78万颗卫星许可[EB/OL].[2020.05.29]. <http://feng.ifeng.com/c/7wsAvJ2wU1k>.
sohu.com. OneWeb, which nearly went bankrupt, is still scrambling for resources to apply for 47800 satellite licenses[EB/OL].[2020.05.29].https://www.sohu.com/a/398504598_354973?trans_=000014_bdss_dklzxbpcgP3p:CP=.
- [38] 搜狐网. 迎战卫星互联网多极化英国政府联合印度盟友拍下OneWeb[EB/OL].[2020.07.04]. https://www.sohu.com/a/405826969_335896.

- sohu.com. Against the multi polarization of Satellite Internet, the British government and India's allies take One web[EB/OL]. [2020.07.04]. https://www.sohu.com/a/405826969_335896.
- [39] 姜燕丽,刘晓娟,张雪梅,等. 低轨卫星互联网发展问题研究[J]. 数字通信世界,2018(8):21-22.
- JIANG Y L,LIU X J,ZHANG X M, et al. Research on the development of LEO Satellite Internet[J].Digital Communication World, 2018(8):21-22.
- [40] 新浪科技. SpaceX “猎鹰9号” 火箭发射成功携带两颗互联网卫星[EB/OL].[2018.08.22]. <https://tech.sina.com.cn/d/s/2018-02-22/doc-ifyrswmv0581398.shtml>.
- tech.sina.com.Space X Falcon 9 rocket launched successfully with two Internet satellites[EB/OL].[2018.08.22]. <https://tech.sina.com.cn/d/s/2018-02-22/doc-ifyrswmv0581398.shtml>.
- [41] 新浪科技. SpaceX成功发射第11批星链互联网卫星,入轨卫星总数达653颗[EB/OL].[2020.08.19]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-08-19/doc-iivhuipn9506847.shtml>.
- tech.sina.com. Space X successfully launched the 11th batch of satellite linked Internet satellites, with a total of 653 satellites in orbit[EB/OL].[2020.08.19]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-08-19/doc-iivhuipn9506847.shtml>.
- [42] 搜狐网. Telesat低轨互联网星座发展规划[EB/OL].[2020.05.08]. https://m.sohu.com/a/393876442_466840/?pvid=000115_3w_al.
- sohu.com. Development plan of Telesat Leo Internet satellite constellation[EB/OL].[2020.05.08] https://m.sohu.com/a/393876442_466840/?pvid=000115_3w_al.
- [43] 周兵,刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评[J].电讯技术,2018,58(9):1108-1114.
- ZHOU B,LIU H J. Review on the development of foreign commercial LEO satellite communication constellation[J]. Telecommunication Engineering, 2018,58(9):1108-1114.
- [44] 新浪科技. 亚马逊3236颗的柯伊伯星座发射计划获批[EB/OL].[2020.07.31]. <https://tech.sina.com.cn/digi/2020-07-31/doc-iivhuipn6015705.shtml>.
- tech.sina.com. Amazon's 3236 Kuiper constellation launch plan approved[EB/OL].[2020.07.31]. <https://tech.sina.com.cn/digi/2020-07-31/doc-iivhuipn6015705.shtml>.
- [45] 蒙艳松,边朗,王瑛,等. 基于“鸿雁”星座的全球导航增强系统[J]. 国际太空,2018(10):20-27.
- MENG Y S,BIAN L,WANG Y, et al. Global navigation enhancement system based on "Hongyan" constellation[J]. Space International,2018(10):20-27.
- [46] 搜狐网. 中国“虹云工程”首颗卫星将发射[EB/OL]. [2018.12.21].https://www.sohu.com/a/283613224_114760.
- sohu.com. The first satellite of China's "Hongyun project" will be launched[EB/OL].[2018.12.21]. https://www.sohu.com/a/283613224_114760.
- [47] 航天爱好者网. 中国电科54所牵头研制两颗低轨试验卫星[EB/OL].[2019.06.07]. <http://www.spaceflightfans.cn/56798.html>.
- spaceflightfans.cn.CETC 54 institute takes the lead in the development of two Leo test satellites[EB/OL].[2019.06.07]. <http://www.spaceflightfans.cn/56798.html>.
- [48] 新华网. 我国成功发射银河航天首发星[EB/OL].[2020.01.16]. http://www.xinhuanet.com/2020-01/16/c_1210441247.htm.
- xinhuanet.com. China successfully launched the first galactic space satellite[EB/OL].[2020.01.16]. http://www.xinhuanet.com/2020-01/16/c_1210441247.htm.
- [49] ISICOM Overview Document (draft version1) [EB/OL]. [2009-04-10]. <http://www.isiinitiative.org/>.
- [50] 梁宗闯,陶滢,高梓贺. 天基宽带互联网发展现状与展望[J]. 中兴通讯技术,2016,22(4):14-18.
- LIANG Z C,TAO Y,GAO X H. Status and Development Trend of Space Broadband Internet [J].ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):14-18.
- [51] 李贺武,吴茜,徐恪,等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报,2016,34(14):95-106.
- LI H W, WU Q, XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review,2016, 34(14): 95-106.
- [52] 胡源,姜会林,丁莹,等. 天地一体化信息网络国外发展现状与趋势[C]//“天地一体化信息网络”高峰论坛论文集,2013: 53-59.
- HU Y,JIANG H L,DING Y,et al. Development status and trend of space-ground integrated information network in foreign countries[C]//Global integration of information network summit forum,2013, Beijing, China,2013:53-59.
- [53] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J].电信科学, 2020(6):1-13.
- CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [54] 赵静,赵尚弘,李勇军. 星间激光链路数据中继技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11):3103-3110.
- ZHAO J,ZHAO S H,LI Y J. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11):3103-3110.
- [55] 何俊,易先清. 基于GEO/LEO 两层星座的卫星组网结构分析[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(3): 47-54.
- HE J,YI X Q, Analysis of satellite network Architecture based on

- GEO/LEO constellation[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(3): 47-54.
- [56] 于全,王敬超. 空间信息网络体系结构与关键技术[J]. 中国计算机学会通信, 2016,12(3):21-25.
- YU Q, WANG J C. Architecture and key technologies of spatial information network [J]. COMMUNICATIONS OF THE CCF, 2016,12(3):21-25.
- [57] 李德仁,龚健雅,邵振峰. 从数字地球到智慧地球[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010,35(2):127-132.
- LI D R, GONG J Y, SHAO Z F. From digital earth to smart earth [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010,35(2):127-132.
- [58] 何友,姚力波,江政杰. 基于空间信息网络的海洋目标监视分析与展望[J]. 通信学报, 2019,40(4): 1-9.
- HE Y, YAO L B, JIANG Z J. Summary and future development of marine target surveillance based on spatial information network[J]. Journal on Communications, 2019,40(4): 1-9.
- [59] 佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 2010(4):649-654.
- TONG S F, JIANG H L, ZHANG L Z. High data-rate space laser communication system and its application[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010(4):649-654.
- [60] 孙建锋. 天地一体化信息网络激光通信系统发展设想[J]. 电信科学, 2017(12):18-23.
- SUN J F. Development of laser communication system in space-ground integrated information network[J]. Telecommunication Science, 2017(12):18-23.
- [61] 申建华,高东博,宋海涛. 全球星间链路网络的发展与应用探析[J]. 河北省科学院学报, 2016, 33(2): 35-38, 67.
- SHEN J H, GAO D B, SONG H T. Analysis about development and applications of global inter-satellite link[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2016, 33(2): 35-38, 67.
- [62] 郭玲华,赵馨,佟首峰. 星地激光通信系统及其关键技术研究[C] //第十一届卫星通信学术年会论文集, 中国:北京, 2015:98-104.
- GUO L H, ZHAO X, TONG S F. Satellite-to-ground Optical Communication system and key technologies[C] // Proceedings of the 11th Annual Conference on satellite communications, Beijing, China, 2015:98-104.
- [63] 尤肖虎,尹浩,郭贺铨. 6G与广域物联网[J]. 物联网学报, 2020(1):3-11.
- YOU X H, YIN H, WU H Q. On 6G and wide-area IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020(1):3-11.
- [64] 张平,牛凯,田辉,等. 6G移动通信技术展望[J]. 通信学报, 2019, 40(1): 141-148.
- ZHANG B, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. Journal on Communications, 2019, 40(1): 141-148.
- [65] 赵亚军,郁光辉,徐汉青. 6G移动通信网络:愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2019(8): 963-987.
- ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019(8): 963-987.
- [66] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15): TR38.811[S]. 2019.
- [67] 3GPP. Solution for new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 16): TR38.821[S]. 2019.
- [68] 魏克军,胡泊. 6G愿景需求及技术趋势展望[J]. 电信科学, 2020(2):126-129.
- WEI K J, HU B. 6G vision requirements and technology trend prospect[J]. Telecommunications Science, 2020(2):126-129.
- [69] 唐琴琴,谢人超,刘旭,等. 融合MEC的星地协同网络:架构、关键技术与挑战[J]. 通信学报, 2020,41(4):162-181.
- TANG Q Q, XIE R C, LIU X, et al. MEC enabled satellite-terrestrial network: architecture, key technique and challenge [J]. Journal on Communications, 2020,41(4):162-181.
- [70] 杨昕,孙智立,刘华峰,等. 新一代低轨卫星网络和地面无线自组织网络融合技术的探讨[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):58-63.
- YANG X, SUN Z L, LIU H F, et al. Technology of New Generation LEO Satellite Network and Terrestrial MANET Integration[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):58-63.
- [71] 黄韬,刘江,霍如,等. 未来网络体系架构研究综述[J]. 通信学报, 2014,35(8):184-197.
- HUANG T, LIU J, HUO R, et al. Survey of research on future network architectures[J]. Journal on Communications, 2014,35(8):184-197. et al.
- [72] 胡宇翔,伊鹏,孙鹏浩,等. 全维可定义的多模态智慧网络体系研究[J]. 通信学报, 2019,40(8):1-12.
- HU Y X, YIN P, SUN P H. Research on the full-dimensional defined polymorphic smart network[J]. Journal on Communications, 2019,40(8):1-12.
- [73] 黄惠明,常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015,10(5):460-491.
- HUANG H M, CHANG C W. Architecture research on space-based backbone network of space-ground integrated networks[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015,10(5):460-491.
- [74] 刘华峰,孙智立,杨昕,等. 关于天基传输网络体系结构的讨论[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):53-57.

- LIU H F, SUN Z L, YANG X, et al. The space-based transmission network architecture[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):53-57.
- [75] 兰巨龙, 程东年, 胡宇翔. 可重构信息通信基础网络体系研究[J]. 通信学报, 2014,35(1):128-139.
- LAN J L, CHENG D N, HU X Y. Research on reconfigurable information communication basal network architecture[J]. Journal on Communications, 2014,35(1):128-139.
- [76] 张威, 张更新, 苟亮. 空间信息网络中的星座设计方法研究[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):19-23,45.
- ZHANG W, ZHANG G X, GOU L. Satellite Constellation Design in Space Information Network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):19-23,45.
- [77] YIN Z, ZHANG L, ZHOU X, et al. QoS-aware multicast routing protocol for triple-layered LEO/HEO/GEO satellite IP network[C]// IEEE Global Mobile Congress. USA:IEEE, 2010: 1-6.
- [78] TABLE T, FADLULAH Z, TAKAHASHI T, et al. Tailoring ELB for multi-layered satellite network [C]//IEEE Communications Conference. USA:IEEE, 2009:1-5.
- [79] 杨冬梅, 唐舟进. 基于GEO/LEO两层星座协同卫星组网分析[J]. 数字通信世界, 2018, (12):26-28.
- YANG D M, TANG Z J. Analysis of collaborative satellite network based on GEO/LEO two layer constellation[J]. Digital Communication World, 2018, (12):26-28.
- [80] 刘振浩, 张明智, 王燕, 等. 基于分层结构的卫星动态接入网络建模研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 6(32):1-4.
- LIU Z H, ZHANG M Z, WANG Y, et al. Research on hierarchical satellite dynamic access networks modeling[J]. Command Control Simulation, 2010, 6(32):1-4.
- [81] YANG Z Y, LI H W, WU Q, et al. NPVT: network protocol validation testbed for integrated space-terrestrial network[J]. IEEE Access, 2019(7): 46831-46845.
- [82] 杨冠男, 李文峰, 张兴敢. 天地一体化信息网络协议体系与传输性能简析[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):38-45.
- YANG G N, LI W F, ZHANG X G. Network protocol system and transmission performance of integrated space and terrestrial information network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):38-45.
- [83] 杨志华, 袁鹏, 张钦宇. 空间互联网协议技术及应用[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):46-48.
- YANG Z H, YUAN P, ZHANG Q Y. Technologies and applications of space network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):46-48.
- [84] 杨增印, 李贺武, 吴茜, 等. 天地一体化信息网络域间协议实验平台[J]. 通信学报, 2019,40(5):1-12.
- YANG Z Y, LI H W, WU Q. Emulation platform for inter-domain protocols validation of integrated space-terrestrial network[J]. Journal on Communications, 2019,40(5):1-12.
- [85] 杨芑, 徐明伟, 李贺武. 天地一体化信息网络统一编址与路由研究[J]. 电信科学, 2017(12):10-17.
- YANG Y, XU M W, LI H W. Study on addressing and routing in space-ground integrated information network[J]. Telecommunication Science, 2017(12):10-17.
- [86] 许方敏, 全宗健, 赵成林, 等. 软件定义天地一体化网络: 架构、技术及挑战[J]. 中兴通讯技术, 2018,24(2):59-62.
- XU F M, TONG Z J, ZHAO C L, et al. Architecture, technology and challenges of software defined integrated space and terrestrial network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2018,24(2):59-62.
- [87] FENG J, JIANG L, SHEN Y, et al. A scheme for software defined ORS satellite networking[C]// Big Data and Cloud Computing (BdCloud), 2014 IEEE Fourth International Conference on. USA:IEEE, 2014:716-721.
- [88] CAO Y, GUO H, LIU J, et al. Optimal satellite gateway placement in space-ground integrated networks[J]. IEEE Network, 2018,32(5):32-37.
- [89] YAO H, WANG L, WANG X, et al. The space-terrestrial integrated network (STIN): an overview[J]. IEEE Communications Magazine, 2018,56(9):2-9.
- [90] 鲍楠, 左加阔, 胡略, 等. 基于SDN的网络资源选择多目标优化算法[J]. 通信学报, 2019,40(2):51-59.
- BAO N, ZUO J K, HU H, et al. SDN based network resource selection multi-objective optimization algorithm[J]. Journal on Communications, 2019,40(2):51-59.
- [91] 张潇璐, 刘曦, 李伟东, 等. 基于共享资源量的动态多资源公平分配策略[J]. 通信学报, 2016,37(7):151-160.
- ZHANG X L, LIU X, LI W D, et al. Dynamic fair allocation of multi-resources based on shared resource quantity[J]. Journal on Communications, 2016,37(7):151-160.
- [92] 刘洋. 空间通信网络中可靠传输协议研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- LIU Y. Research on reliable transmission protocol in space communication network[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and technology, 2011.
- [93] 陈新龙, 陈大可. 天地一体化网络空间信息抗干扰技术[J]. 中兴通讯技术, 2016,22(4):49-52.
- CHEN X L, CHEN D K. Space information anti-interference technologies in integrated space and terrestrial information network[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):49-52.

- [94] KING P R, STAVROU S. Capacity improvement for a land mobile single satellite MIMO system[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letter, 2006(5): 98-100.
- [95] 姚富强. 天地一体化生态电磁环境的构建[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 29-33.
- YAO F Q, Construction of ecological electromagnetic environment in integrated space and terrestrial[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016, 22(4): 29-33.
- [96] 洪伟. 关于毫米波与太赫兹通信的思考[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(3): 39-42.
- HONG W. Thoughts on millimeter wave and terahertz communications[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2018, 24(3): 39-42.
- [97] 陈明章. 毫米波卫星通信技术[J]. 空间电子技术, 2002(4): 1-4.
- CHEN M Z. Millimeter wave satellite communication technology[J]. Space Electronic Technology, 2002(4): 1-4.
- [98] 李凤华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. 通信学报, 2016, 37(11): 156-168.
- LI F H, YIN L H, WU W, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2016, 37(11): 156-168.
- [99] 李凤华. 信息技术与网络空间安全发展趋势[J]. 网络与信息安全学报, 2015, 1(1): 8-17.
- LI F H. Development trends of the information technology and cyberspace security[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2015, 1(1): 8-17.
- [100] ELMASRI M H, MEGAHED M H, ELAZEEM M H A. Design and software implementation of new high performance group key management algorithm for tactical satellite[C]//2016 33rd National Radio Science Conference (NRSC). IEEE, 2016: 149-158.
- [101] 薛开平, 周焕城, 孟薇, 等. 天地一体化网络无缝切换和跨域漫游场景下的安全认证增强方案[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 138-147.
- XUE K P, ZHOU H C, MENG W, et al. Secure authentication enhancement scheme for seamless handover and roaming in space information network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 138-147.
- [102] 罗长远, 李伟, 霍士伟. 基于身份的空间网络组密钥管理方案[J]. 通信学报, 2010, 31(12): 104-110.
- LUO C Y, LI W, HUO S W. Identity-based group key management scheme for space networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(12): 104-110.
- [103] 孟梦, 陈性元, 徐国愚, 等. 一种安全高效的LEO卫星网络任意点切换方案[J]. 计算机工程, 2015, 41(3): 1-6.
- MENG M, CHEN X Y, XU G Y, et al. A secure and efficient LEO satellite network switching scheme at any point[J]. Computer Engineering, 2015, 41(3): 1-6.
- [104] 董飞鸿, 吕晶, 巩向武, 等. 空间信息网络结构抗毁性优化设计[J]. 通信学报, 2014, 35(10): 50-58.
- DONG F H, LV J, GONG X W, et al. Optimization design of structure invulnerability in space information network[J]. Journal on Communications, 2014, 35(10): 50-58.
- [105] 王睿, 韩笑冬, 王超, 等. 天基信息网络资源调度与协同管理[J]. 通信学报, 2017(Z1): 104-109.
- WANG Y, HAN X D, WANG C, et al. Resources scheduling and cooperative management of space-based information networks[J]. Journal on Communications, 2017(Z1): 104-109.
- [106] WU Z, HU G, SEYEDI Y, et al. A simple real-time handover management in the mobile satellite communication networks[C]//2015 Network Operations and Management Symposium, New Jersey: IEEE Press, 2015: 175-179.
- [107] ZHANG Y, WANG Y, FAN B. SDN based optimal user cooperation and energy efficient resource allocation in cloud assisted heterogeneous networks[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 1469-1481.
- [108] KANG Q, SONG X, ZHOU M C, et al. A collaborative resource allocation strategy for decomposition-based multiobjective evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems (Early Access), 2018 (99): 1-8.
- [109] 秦鹏, 刘海蛟, 陆洲, 等. 关于天基信息网络综合管控系统建设的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(5): 443-447.
- QIN P, LIU H J, LU Z, et al. Consideration on the construction of integrated management and control system of space-based information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(5): 443-447.
- [110] 周家喜, 张正宇, 顾钰. 天地一体化信息网络资源动态管理技术研究[J]. 通信技术, 2018(4): 881-885.
- ZHOU J X, ZHANG Z Y, GU Y. Dynamic radio resource management for space integrated ground network[J]. Communications Technology, 2018(4): 881-885.
- [110] 贾敏, 高天娇, 郑黎明, 等. 天基网络动态接入技术现状与趋势[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4): 34-38.
- JIA M, GAO T J, ZHENG L M, et al. Dynamic access technology for space-based network: situation and development trend[J]. ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016, 22(4): 34-38.
- [112] PEYRAVI H. Medium access control protocols performance in satellite communications[J]. IEEE Communications Magazine, 1999, 36(5): 62-71.
- [113] 毕奇, 梁林, 杨姗, 等. 面向5G的非正交多址接入技术[J]. 电信科

- 学,2015,31(5):20-27.
- BI Q,LIANG L,YANG S,et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. Telecommunications Science, 2015,31(5):20-27.
- [114] OLIVERIA A,SUN Z,MONIER M,et al. On optimizing hybrid ad-hoc and satellite networks—the MONET approach[C]//Proceedings of the Future Network and Mobile Summit 2010. USA: IEEE, 2010:1-8
- [116] PLASS S,RAULEFS R,FLEURY B,et al. Wireless hybrid enhanced mobile radio estimators-WHERE[C]//Proceedings of the ICT Mobile and Wireless Communications Summit (ICT Summit 2008). Stockholm:Paul Cunningham and Miriam Cunningham(Eds), IIMC International Information Management Corporation,2008.
- [117] 顾娜,匡麟玲,吴胜,等. 混叠频分/码分多址(O-FCDMA)系统框架[J]. 清华大学学报,2015, 55(5):485-490.
- GU N,KUANG L L,WU S, et al. Overlapped frequency/code division multiple access (O-FCDMA) system framework[J]. Journal of Tsinghua University(Sci&Technol), 2015, 55(5):485-490.
- [118] 曾孝平,刘心迪,罗阳,等. 同步卫星多用户接入控制及切换的优化算法[J]. 系统工程与电子技术,2013, 35(4):840-846.
- ZENG X P,LIU X D,LUO Y, et al. Optimization algorithm of multiple clients' accessing control and handoff in geosynchronous satellite[J].Journal of Systems Engineering and Electronics,2013, 35(4):840-846.
- [119] 顾学迈,赵康,贾敏,等. 对中国建设天、空、地一体化信息网络的几点认识[J]. 中兴通讯技术,2016,22(4):2-8.
- GU X M,ZHAO K,Jia M, et al. Construction of space/sky/terrestrial integrated information network in China[J].ZTE TECHNOLOGY JOURNAL, 2016,22(4):2-8.
- [120] 叶海洋. 基于虚拟化的天地一体化网络仿真技术研究[D].无锡:江南大学,2019.
- YE H Y. Research on simulation technology of space-ground integration network based on Virtualization[D].Wuxi: Jiangnan University,2019.
- [121] 马满好,邱涤珊,王亮. 天基信息系统网络拓扑构建建模方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009,34(5):606-610.
- MA M H,QIU D S,WANG L. Modeling Topology Structure of Space-Based Information Systems[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 606-610.
- [122] 刘渊,张浩,叶海洋,等. 面向天地一体化信息网络的卫星链路仿真研究[J]. 通信学报, 2018,39(4):56-67.
- LIU Y,ZHANG H,YE H Y,et al. Research on satellite link emulation for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2018,39(4):56-67.
- [123] SaVi.Satellite Constellation Visualization[R/OL].[2016-04-09]. <http://savi.sf.net/>.
- [124] 张景斌,刘炯,康连瑞,等. 适用于我国天基网络的GEO/LEO双层星座的设计与仿真分析[J]. 高技术通讯,2014,24(11): 1187-1193.
- ZHANG J B,LIU J,KANG L R,et al. Design and simulation analysis of GEO / LEO double layer constellation for space based network in China[J]. High Technology Letters,2014,24(11): 1187-1193.

[作者简介]



吴巍 (1956—), 男, 重庆人, 中国电子科技集团公司第五十四研究所副总工程师, 通信网信息传输与分发技术国家级重点实验室主任, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为通信与信息系统。