

陆海空天一体化信息网络发展研究

徐晓帆, 王妮炜, 高缨园, 陆洲, 汪春霆, 陆军

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 陆海空天一体化信息网络具有为陆基、海基、空基、天基等各类用户提供全球随遇接入、信息安全可靠服务的能力, 是我国避免受制于人、实现网络强国的重要基础设施之一。立足于我国一体化信息网络的发展, 本文运用文献调研、专家咨询的研究方法, 梳理了陆海空天一体化信息网络的发展需求, 开展了国内外典型系统的分析研究, 总结了我国在先进陆海空天一体化信息网络方面存在的主要问题及差距, 重点提出适合国情的融合网络架构初步设想及相应发展路线建议。研究认为, 在推进陆海空天一体化信息网络论证设计和工程实施的过程中, 应着重强化网络架构、技术体制、应用服务支撑体系方面的深度融合, 兼顾通信、导航、遥感系统的功能融合, 推动天基网络技术自主可控和高端产业升级, 同步加强相关系统的安全防护能力建设。

关键词: 陆海空天一体化信息网络; 天基信息系统; 网络架构; 融合网络; 发展路线

中图分类号: TN915 **文献标识码:** A

Development of Land–Sea–Air–Space Integrated Information Network

Xu Xiaofan, Wang Niwei, Gao Yingyuan, Lu Zhou, Wang Chunting, Lu Jun

(China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: The land–sea–air–space integrated information network is capable of providing globally accessible, safe, and reliable information services for land-, sea-, space-, and air-based users; it is an important infrastructure for China to maintain independence in the field and to become a cyberpower. This study uses literature research and expert consultation as the main research methods to summarize the development requirements of the land–sea–air–space integrated information network. After a detailed study on typical domestic and foreign systems, the major weaknesses of China’s land–sea–air–space integrated information network are summarized. Moreover, an integrated information network architecture and development routes are proposed. Specifically, we suggest that China should focus on the deep integration in terms of network architecture, technical system, and application services; integrate the communication, navigation, and remote sensing systems; promote technical independence and industrial upgrade of space-based networks; and strengthen its system security protection capabilities.

Keywords: land–sea–air–space integrated information network; space-based information system; network architecture; integrated network; development route

收稿日期: 2021-01-12; **修回日期:** 2021-02-24

通讯作者: 徐晓帆, 中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师, 研究方向为天基信息系统; E-mail: xiaofanxu@sina.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“网络强国”(2020-ZD-14)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

当前，信息网络技术持续进步，已经成为创新驱动发展的先导力量，对政治、军事、经济、文化等领域产生深远影响，驱动着社会体系的变革和重塑。作为支撑社会发展的重要信息基础设施，地面信息网络天基信息网络长久以来独立发展，局限性日益凸显，难以满足全球网络全域覆盖、安全自主可控、各类用户灵活接入的需求。近年来，信息网络逐步融合发展，相关研究提出了天地一体化信息网络 [1~4]、基于第六代移动通信技术（6G）的空天地海一体化无线通信网络的发展愿景 [5]；陆海空天一体化信息网络的技术发展思路已逐渐清晰。

陆海空天一体化信息网络是以地面网络为基础、以天基网络为延伸，覆盖太空、天空、陆地、海洋等自然空间，为天基、空基、陆基、海基等各类用户的各类活动提供信息保障的信息基础设施；相关研制建设不仅反映了一个国家的科技和经济综合实力，更是推动我国重大领域自主创新、满足国家战略需求、提升国家网络空间竞争力的重要支撑。

陆海空天一体化信息网络技术的研究难点在于，利用基于卫星平台的网络节点，构建覆盖全球的天基信息网络，实现陆、海、空、天各层次网络的高效深度融合。为此，本文分析建设需求，梳理发展现状，凝炼存在差距，提出一体化融合网络架构设想及发展路线建议，以期为国家网络强国相关的重大规划制定及工程项目实施提供参考借鉴。

二、陆海空天一体化信息网络的需求分析

我国信息产业及其基础研究发展迅速，但“地强天弱”“内强外弱”等问题仍然存在。当前，天基信息网络主要服务于我国境内地域，境外地面网络因缺少安全可控条件而无法支撑外交、应急等方面的应用需求，因此建设陆海空天一体化信息网络，是应对国内国际复杂形势的重要信息基础保障。在民用领域，陆海空天一体化信息网络需要满足电子政务、能源水利、生产制造、海洋经济、交通运输、证券金融、教育科研、文化旅游、远程医疗等行业应用与公众应用需求。

（一）全球覆盖及地月空间延展能力

随着我国经济发展和综合实力增强，国家战略利益显著外延，需要在外交、应急等方面具备全球活动能力。就信息网络而言，需要将保障范围从传统的国土及周边地区向全球扩展，将保障对象从传统的陆地用户拓宽至海上、空基、天基等用户；还需进一步为月球和深空探索提供信息服务能力。

（二）重点和热点区域的多重覆盖能力

为满足我国在重点区域的发展与战略部署需求，信息网络应尽快覆盖东亚、南亚、“一带一路”沿线国家/区域、北极地区。对于热点区域，如南海地区，需要具备多重覆盖能力、按需增强保障能力。相较于全球覆盖的其他区域，重点和热点区域的信息网络应具有更强的覆盖能力、更多的服务用户数量、更高的数据传输带宽、更好的语音通信质量。

（三）一体化组网能力

陆海空天一体化信息网络需要保障关键用户在全球任何位置、任何时刻的通信需求，需要具备空间组网能力以实现全球随遇接入与境外信息有效回传；需要具备用户终端的多网接入能力，支持网络用户接入地面互联网和移动互联网服务，支持移动和宽带服务互通。

（四）空间骨干传输能力

地面骨干网络对境外、偏远地区、海域、空域的延展性有限，需要具备空间骨干传输能力。目前，我国民用领域的网络用户主要来自交通运输、水利、农业、地方政府、驻外企业/媒体、大众商业等；预计到2025年，公众用户约为 1×10^7 个，行业用户约为 3×10^6 个，空间骨干网络传输需求约为300 Gbps；预计到2030年，公众用户约为 3×10^7 个，行业用户约为 4×10^6 个，空间骨干网络传输需求约为1 Tbps。空间骨干传输能力与地面骨干网络同步演进并协同发展，才能满足快速增长的民用需求。

（五）终端多样化能力

为适应多种场景需求，陆海空天一体化信息网络需要配置手持、嵌入式、台式等多样化的终端。手持终端应支持多种通信制式，具备导航定位、语

音通信、信息传输功能，可作为灾害应急处理场景的主要应用终端。嵌入式终端一般用于提供天基物联网服务的海洋浮标、集装箱监控单元等，需具有多制式、小型化、低功耗特征。台式终端分为固定、车载、舰载、机载等类型，需具有语音通信、数据通信、视频图像传输等功能；作为网络节点将地面局域网接入天基网络，提供远程数据回传和宽带多媒体业务。

三、陆海空天一体化信息网络的发展现状

(一) 国外发展现状

21 世纪以来，发达国家积极布局一体化信息网络建设规划，争夺网络制天、制空、制海权，推进天基网络与地面互联网络、移动通信网络融合。目前已经形成包括同步轨道和低轨星座在内的多个天基网络 [6]（见表 1）；不同系统的定位和服务用户各有侧重，既有民用系统如星链（Starlink）、一网（OneWeb），军用系统如先进极高频卫星通信系统（AEHF），也有融合共用系统如第二代铱星系统（Iridium Next）。

1. 信息传输

星间链路技术趋于成熟，容量不断提升，如 Ka 频段链路已经成熟，激光链路进入试验阶段。发达国家致力于发展陆海空天一体化的空间信息系

统。例如，美国强化星间链路和星上路由/交换能力，构建基于空间多星组网的太空通信网络，建设完整的全球信息栅格。基于空间组网的宽带卫星通信技术是陆海空天一体化信息网络发展的重要环节，对提升宽带卫星通信系统的通信容量、覆盖能力、系统抗毁生存能力具有重要意义。宽带卫星通信系统逐步向 Ka 频段多波束方向发展，并通过频率多重复用、极化复用等技术，提高系统的可用带宽和容量。

2. 网络架构

广泛采用的网络架构主要有天星地网、天基网络、天网地网等类型。天星地网架构技术比较成熟，应用广泛，但不适合在我国应用。天基网络架构在安全性、抗毁性、独立性方面有优势，但因脱离地面独立运行，提高了对星上处理和星间信息传输能力的要求，且技术复杂程度高、系统建设和维护成本高，难以在商业层面全面推广应用。天网地网架构通过天、地网络的配合，充分利用天基网络的广域覆盖能力和地面网络的强大传输与处理能力，降低了整个系统的技术复杂度和成本。

3. 业务分类

当前，空间业务朝着采用 IP 方式承载方向发展，单系统呈现出从单业务的到多业务发展趋势。宽带全球卫星（WGS）、Iridium Next 等系统的演进版本均逐渐支持多样化接入业务，构建实时通信、

表 1 国外代表性天基信息系统

系统名称	类型	特点
转型卫星通信系统 (TSAT) [7]	高轨 (GEO) 卫星星座	由 5 颗 GEO 卫星组成，基于星上 IP 交换和星间高速激光，可直接与 AEHF 和地面栅格网互联，该系统的研究计划已于 2009 年取消
面向全球通信的空间综合基础设施 (ISICOM) [8]	混合星座	包括 GEO 卫星、中轨 (MEO) 卫星、低轨 (LEO) 卫星、高空平台 (HAP)、无人驾驶飞机 (UAV) 等空天节点和多种地面节点，基于 IP 交换、微波、激光混合的大容量星际互联网，可连接通信、导航、对地观测卫星与地面网络
卫讯 (ViaSat)	GEO 卫星	已部署的 ViaSat-2 总容量为 300 Gbps，可为 2.5×10^6 个用户提供 25 Mbps 的宽带服务；即将部署的 ViaSat-3 容量为 1 Tbps
Iridium Next	LEO 星座	通过 66 颗卫星实现全球覆盖，采用端到端的 IP 技术，具有 Ka 星间链路，可实现全球数字化个人通信，不依靠地面转换为地球上任意位置的终端提供服务
Starlink	LEO、极低轨 (VLEO) 多轨混合星座	计划发射 40 000 多颗卫星（含星间链路），为全球提供第五代移动通信 (5G) 级别的高速互联网服务，批量化流水线生产，可回收火箭发射；截至 2021 年 2 月 16 日，已发射 1145 颗卫星
OneWeb	LEO 多轨混合星座	计划发射超过 6000 颗卫星，无星间链路和星上处理，业务就近落地到关口站，已发射 110 颗卫星
Telesat	LEO 多轨混合星座	计划发射 298 颗卫星，位于极轨与倾斜轨道，支持星上路由，具备激光星间链路，已发射 1 颗试验卫星

空间目标监视、导航定位等多种业务支持能力。天基网络和地面网络提供的服务业务也趋于同步。

（二）国内发展现状

我国正处于推进天基信息网、未来互联网、移动通信网全面融合发展的初级阶段。2016年，天地一体化信息网络重大项目列入国家“十三五”规划纲要和《“十三五”国家科技创新规划》；2020年，卫星互联网确定为“新型基础设施建设”的信息基础设施之一。科研院所和相关企业大力发展低轨小卫星星座，如鸿雁星座、虹云工程等，相关试验卫星已完成在轨关键技术验证。在积极发展天基网络的同时，我国继续发展新一代高通量通信卫星，先后发射了“实践十三号”“亚太6D”以及新技术体制试验卫星“实践二十号”；高通量通信卫星对地覆盖范围越来越完善，通信容量越来越大，逐步成为我国地面网络基础设施的重要拓展形式。相关天基信息系统的基本情况如表2所示。

四、我国陆海空天一体化信息网络的发展差距分析

（一）单颗卫星容量相对较小

卫星容量是卫星通信服务质量的重要指标，决定了卫星服务用户的数量和单用户的通信能力。“亚太6D”卫星容量为50 Gbps，是“实践十三号”卫星的2.5倍，但与美国同类卫星相比仍然差距明显。

美国ViaSat-2宽带卫星的容量为300 Gbps，是“亚太6D”卫星的6倍（体积和重量也是“亚太6D”卫星的数倍）。美国拟在2022年发射的ViaSat-3卫星，容量将进一步提升至1 Tbps。

（二）空间激光通信技术尚无工程化应用

空间激光通信具有丰富的带宽资源、较窄的波束发散、较低的载荷质量和功耗，是实现卫星节点间、卫星与地面节点间大容量传输的重要手段[9]。近年来，我国空间激光通信技术取得长足进展，已实现高轨对地5 Gbps通信速率试验，达到国际一流水平；但在轨工程化应用时，出现链路无法连通、放大器烧毁、传输速率不达标等诸多问题，尚未达到长时间稳定使用状态。德国欧洲数据中继系统（EDRS）卫星在2016年实现了高低轨间星间激光通信的工程化应用，通信速率为1.8 Gbps，至今仍正常工作[10]。

（三）卫星生产制造和批量部署能力差距明显

在轨卫星数量是制约陆海空天一体化信息网络能力的重要因素。美国自20世纪90年代开始部署运营“铱星”“全球星”等星座，当前正在规模化建设Starlink星座，而我国尚未有大规模星座的工程建设与运营经验。Starlink等新兴卫星互联网项目采用互联网思维，借鉴汽车制造理念，大幅降低生产成本，提高卫星制造能力；卫星的周产量可达16颗，每颗小卫星成本降低至50万美元。反观我国，通信卫星仍采用传统工程研制模式，即使技术

表2 我国代表性天基信息系统

系统名称	类型	特点
天地一体化信息网络	混合星座	GEO、LEO多层多轨面空间组网，支持陆、海、空、天各类用户按需接入，提供移动通信、宽带互联、天基物联、导航增强、航海/航空监视（AIS/ADS-B）等服务，2019年完成2颗试验卫星在轨验证
鸿雁星座	LEO多轨混合星座	计划发射324颗卫星，实现宽窄带相结合的通信保障能力，采用微波星间链路实现空间组网，提供移动通信、宽带通信、导航增强、航空/航海监视等服务，2018年发射试验卫星“重庆号”
虹云工程	LEO多轨混合星座	计划发射156颗卫星，全球覆盖宽带通信星座，采用激光星间链路组网，2018年发射试验卫星
“实践十三号”	GEO卫星	我国首颗高通量通信卫星，首次应用Ka频段通信载荷，通信总容量为20 Gbps
“实践二十号”	GEO卫星	搭载Q/V频段载荷、宽带柔性转发器，带宽达到5 GHz；搭载星地激光通信载荷，实现10 Gbps通信速率
“亚太6D”	GEO卫星	采用Ku、Ka载荷，通信总容量为50 Gbps，单波束最高可达1 Gbps

成熟后也需要两年的整星研制周期，不具备快速大规模的部署能力。

(四) 天基网络体系化不足且融合难度大

我国现有的通信卫星、中继卫星，正在建设的宽带星座等均独立发展，尚未形成统一的标准体系，各系统技术体制不同，难以实现不同网络用户间的高效通联。天基信息网络与地面网络发展不均衡，难以形成“一张网”，陆海空天一体化需要深度融合发展。对比之下，美国提出以 TSAT 系统为基础来融合 AEHF 和地面栅格网等项目的规划；欧洲提出构建融合的 ISICOM 信息基础设施构想并启动先期工作。2018 年，国际电信联盟（ITU）成立了网络 2030 焦点组，将卫星接入作为未来网络的特征之一；2019 年，电气与电子工程师协会（IEEE）召开第一届全球 6G 无线峰会，促使空天地一体化立体网络覆盖成为学术与工程界的普遍共识。

五、陆海空天一体化信息网络的基础架构

我国迫切需要构建“全球覆盖、安全可控”的信息网络，然而限于基本国情，无法采用天星地网架构，通过全球建站的方式实现信息落地与交互。

因此，陆海空天一体化信息网络宜采用天网地网的网络结构，主要包括核心层、接入层、用户侧（见图 1）。

(一) 核心层

陆海空天一体化信息网络核心层采用天地双骨干架构。地基部分由传统地面核心网（如地面光纤网、海底光缆网等）和卫星地面站网组成，即地基卫星地面网和传统核心网融合骨干网（简称“地骨干”），是整个网络的核心部分，主要实现网络控制、资源管理、协议转换、信息处理、融合共享等功能，负责整个网络的管理控制和运行。天基部分指由高轨星座、中轨星座和低轨星座组成的天基高中低轨混合骨干网（简称“天骨干”），具备一定的接入控制、用户管理、信息处理及业务承载能力，提供宽带接入、骨干互联、中继传输、天基测控等多种业务，也可拓展提供导航增强、星基监视等业务。陆海空天一体化信息网络的网络空间范围极大，涵盖海底、海面、陆地、空中、近地空间、地球空间、地月空间、深空，相应用户种类多样。采用天地双骨干构建核心层，建设“天地一张网”，发挥天地网络的互补优势，形成网络架构一体设计、频率资源协调使用、业务应用无缝融合、用户服务协同保

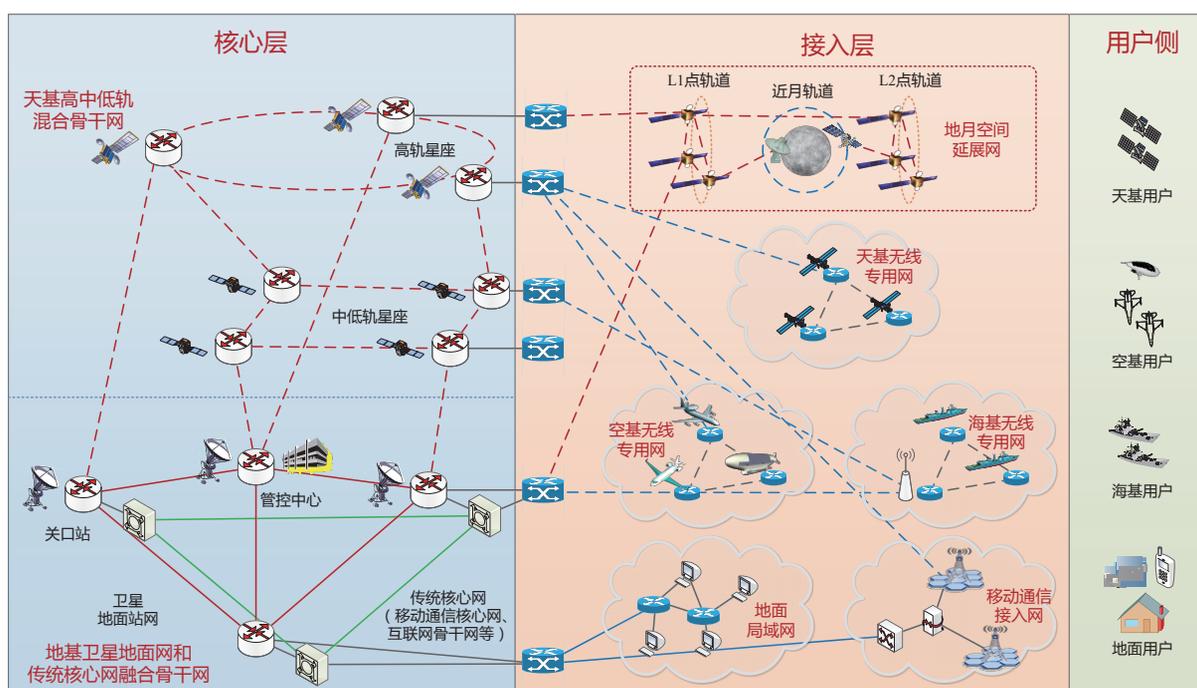


图 1 陆海空天一体化信息网络的物理架构图

障的一体化信息网络核心层，有效提升用户接入能力和异构网络融合能力，优化系统服务效能。

（二）接入层

陆海空天一体化信息网络接入层是核心层的拓展，负责用户的接入，包括地月空间延展网、天基无线专用网、空基无线专用网、海基无线专用网、地面局域网、移动通信接入网。①地月空间延展网是为提供地月空间信息服务而进行的拓展延伸，构建全天时、大尺度、宽带高速的地月空间通信网络，提供全天时不间断通信保障，实现地月间信息的高效可靠交互；②天基无线专用网由多颗卫星或星座组网构成，作为核心层的用户网络来承接其他各类用户的接入；③空基无线专用网通常由飞机、临近空间飞艇、无人机等组网构成，作为核心层的用户网络来承接其他各类用户的接入；④海基无线专用网通常由各类水面舰艇、水上浮台等组网构成，作为核心层的用户网络来承接其他各类用户的接入；⑤地面局域网与地骨干中的传统地面核心网、地面用户结合，即当前所使用的地面互联网；⑥移动通信接入网与地骨干中的传统地面核心网、地面用户结合，即当前所使用的地面移动网。

（三）用户侧

陆海空天一体化信息网络的天地双骨干架构、地月空间延展网等各类接入层网络，主要面向政府、军队、企业等领域开展应用，按照“网络拓展、服务延伸”思路，将传输组网、应用服务、安全防护、运维管控等功能向用户端延伸并与用户应用集成，形成满足地面、海基、空基、天基等不同用户需求的应用系统。

六、发展建议

（一）强化网络架构、技术体制、应用服务支撑体系的深度融合

①在网络架构融合方面，建议打破传统卫星和地面网络各自封闭发展的局面，从逻辑功能、功能部署、协同服务3个维度设计一体化多维融合的共用网络，使网络系统组件趋于通用化、接口趋于标准化、运营趋于集中化。②在技术体制融合方面，建议采用统一的核心网支持天基互联网、地面移动

通信网的共管共享机制，借鉴5G接入网架构设计，按照软件定义、高低轨统一的思路来设计可变参数集的一体化空口接入技术体制。③在应用服务支撑体系融合方面，建议采用云网融合的设计思路，部署天基信息港、轻量化天基边缘计算平台，实现在轨云边协同处理；与地面信息港融合，为各垂直行业及融合应用提供能力开放、扁平高效、广域时敏的应用服务支撑平台。

（二）推进通信、导航、遥感等系统融合，建立综合化服务的空间信息网络

多种空间服务能力的融合应用，有助于提升对全球突发事件应急处置能力，促进天基信息商业化服务产业的发展，这是支撑我国实现制信息权的基础。建议以“一星多用、多星组网、多网融合、实时服务”为目标，通过跨系列、跨星座卫星的组网及与地面网络深度融合的方式，基于科学合理、按需服务的任务规划及多中心协同服务的模式，提供多类型、高质量、稳定可靠、规模化的空间数据、通信、导航、遥感等综合服务，支撑各行业的综合应用。

（三）推动天基网络技术自主可控和高端产业升级

陆海空天一体化信息网络是我国避免受制于人，实现网络强国的重要基础设施之一，应确保其设计、研制、建设、运营过程的自主可控。建议合理保持对天基交通信息管理、感知网络、空间通信等领域标准体系自主研发、基础器部件研制与产业化的投入，尽快改变标准靠国外、技术靠引进、产业受制约的现状；提高相关应用领域的国产化替代水平，通过产品替代升级拉动内需，促进国民经济的循环发展。

（四）加强系统安全防护能力建设

陆海空天一体化信息网络具有节点暴露、信道开放、异构网络互连、拓扑高度动态变化、星上处理能力受限等特点，加之与互联网进行融合，易受外部网络攻击，特别在测控链路、星地组网、应用服务系统、信息监管方面存在安全隐患。建议按照“体系弹性、安全内生、动态赋能”的思路，强化通信与安全防护一体化融合设计；采用新型抗干扰波形、频谱认知无线电、组网认证与接入鉴权、多

安全等级的差异化网络安全互联与隔离、安全防护设备动态重构等技术, 确保融合网络的安全可靠。

参考文献

- [1] 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]. Strategic Study of CAE, 2006, 8(10): 19–30.
- [2] 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.
Zhang N T, Zhao K L, Liu G L. Thought on constructing the integrated space-terrestrial information network [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223–230.
- [3] Yao H P, Wang L Y, Wang X D, et al. The space-terrestrial integrated network (STIN): An overview [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 2–9.
- [4] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1–16.
Wu W. Survey on the development of space-integrated-ground information network [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1–16.
- [5] You X H, Wang C X, Huang J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China Information Sciences, 2021, 64: 1–76.
- [6] 汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望 [J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 493–504.
Wang C T, Zhai L J, Xu X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network [J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 491–504.
- [7] Pulliam J, Zambre Y, Karmarkar A, et al. TSAT network architecture [C]. San Diego: Military Communications Conference, 2008.
- [8] Vanelli-Coralli A, Corazza G E, Luglio M, et al. The ISICOM architecture [C]. Siena: 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications, 2009.
- [9] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57–96.
- [10] 徐晓帆, 陆洲. 星地激光通信可靠性保障技术研究现状 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 650–657.
Xu X F, Lu Z. Research status of mitigation techniques to assure the reliability of satellite-to-ground laser communications [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 650–657.