

卫星互联网应用与挑战

单超, 马少煊, 谷欣, 王妮炜
(中国星网网络创新研究院有限公司, 北京 100029)

摘要: 首先, 探讨卫星互联网的组成和实现形式, 在总结当前地面互联网局限性的基础上, 详细分析卫星互联网在航天、航空、海洋、地面等领域的多种应用场景。随后, 讨论卫星互联网面临的挑战, 如频谱拥塞、时延大、高昂的发射和维护成本等问题, 并提出相应的应对措施。最后, 对卫星互联网的未来发展进行预测。

关键词: 卫星互联网; 应用; 挑战; 未来发展

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024033

Satellite Internet: Application and Development

SHAN Chao, MA Shaoxuan, GU Xin, WANG Niwei
China Satellite Network Innovation Co., Ltd., Beijing 100029, China

Abstract: This paper explored the composition and implementation forms of satellite Internet, building upon an evaluation of the limitations of current terrestrial internet. It provided a comprehensive analysis of various application scenarios of satellite Internet in aerospace, aviation, maritime, and terrestrial domains. Subsequently, the challenges faced by satellite Internet, included issues of frequency congestion, latency, high launch and maintenance costs, were discussed, along with proposed corresponding measures to address these challenges. Finally, the future development of satellite internet were predicted.

Keywords: satellite Internet, application, challenge, future development

0 引言

互联网主要依靠地面和海底光纤进行有线传输, 受地理条件限制, 在部分偏远地区、航空、航海等领域, 无法进行实际应用。卫星通信通过将信号从终端或地面站发送到卫星, 再由卫星将信号传送到目标接收站或终端设备, 实现了全球范围内的无缝通信覆盖。互联网和卫星在过去几十年按照各自的发展模式和技术道路发展, 均取得了不凡的成就^[1]。一方面互联网的连接数量、交互内容和组网范围在快速升级; 另一方面卫星应用的范畴和规模也在不断扩展, 二者出现越来越多的交集。卫星互联网作为二者的融合, 有效地拓展了卫星通信的应用场景和互联网的覆盖区域, 在数字时代扮演着日益重要的角色, 其不仅是一种通信和网络技术, 更是连接世界、弥补数字鸿沟、促进经济发展和维护国家安全的信

1 地面互联网的局限

20世纪60年代, 地面互联网通过连接全球各地的用户, 实现了信息的广域传播, 推动了经济的增长和创新发展, 并深刻改变人们的生活方式。然而, 由有线光纤和地面基站构成的互联网的覆盖率有限, 在诸多方面未能满足人们日益增长的网络连接需求。

第一, 地面互联网的覆盖区域受限。地面互联网通常依赖于基础设施的部署, 使得偏远、人口稀少地区(如山区、沙漠或海洋), 网络覆盖有限甚至完全覆盖不到, 阻碍了数字化和信息化的普及。

第二, 地面互联网在自然灾害或紧急情况下容易受到影响。地面网络在自然灾害(如地震、飓风、洪水等)或紧急情况下会出现通信中断, 需要一定的修复时间, 对应急响应和救援工作造成严重影响。

第三, 地面互联网的通信时延较高。由于信号需要

穿越多个中继站和光缆，地面网络通信存在较高的传输时延，对于某些实时应用，如跨境金融、在线游戏、远程医疗和虚拟会议，这种高时延不能满足行业应用需求。

第四，地面互联网的移动性受到限制。对于移动用户，若乘坐如船舶、飞机和车辆，在远洋、万米高空、山区等地，接入地面网络变得困难，可能导致通信中断和不稳定的连接。

第五，当前的地面网络已无法满足公众不断拓展和日益增长的网络需求。一方面用户已经习惯了网络实时在线，越来越难以忍受没有网络连接的时刻；另一方面地面网络已将能够创造最大利润的区域覆盖完毕，剩下需要覆盖的区域，基本上都是产出投入比很低或者地面移动网络无法触及的区域^[2]。

2 卫星互联网概述

卫星互联网是实现全球范围内随遇接入互联网的新型信息基础设施，能为各种应用提供泛在、智能、协同、高效的广域空间网络支撑和保障^[3]。卫星互联网极大促进了移动设备向全场景协同、高可靠互联的方向迈进，进一步实现了全球信息网络的高效互联与深度融合。

目前，按卫星轨道高度和星座规模划分，卫星互联网主要以高轨卫星组网和低轨星座组网两种途径实现。高轨卫星互联网系统以少量的高通量卫星组网为主要特征，典型代表有美国的 ViaSat-3 卫星以及我国的中星 16 号、亚太 6D 和中星 26 号卫星等，这些高轨卫星运行在地球静止轨道（Geostationary Earth Orbit, GEO），仅需几颗卫星即可实现对地面人口密集区域的全域覆盖^[4]。

低轨卫星互联网系统以大量小型卫星构成星座为主要特征，典型代表有 Starlink、OneWeb 和 O3b 等，这些低轨卫星互联网系统运行在几百到上千千米的低地球轨道（Low Earth Orbit, LEO）。其中，Starlink V2.0 将配置光学星间链路，以确保持续通信能力，为海上提供服务覆盖和抵消干扰效应。地面段包含测控站、网关天线和用户终端；测控站采用直径 5 m 的天线；网关和用户终端则采用相控阵技术。O3b 卫星网络拥有 20 颗中地球轨道（MEO）卫星，建立为 1 500 多万终端用户提供服务的移动网络，为全球 4 家超大油气企业提供服务，为全球 4 家邮轮公司提供服务，开创面向全球百万级别客户数量的云服务时代。

由于单颗卫星的覆盖范围有限，需要数量众多的卫星组成星座以实现全球覆盖。相较于高通量卫星，低轨卫星的质量较小、性能相对较弱，但由于轨道高度低，

享有较低的信号传输时延和更高的信号落地功率，使得低轨卫星互联网系统各型终端可以实现与卫星的直连通信，从而赋予更多应用场景的高速通信和快速接入能力。此外，借助载荷搭载和星座规模优势，低轨卫星互联网系统还具备“通导感算”融合应用潜力，小卫星的快速迭代与优化能力也使低轨卫星互联网代表了未来卫星互联网的发展方向^[5]。

低轨卫星互联网系统主要包括空间段、地面段和用户段 3 部分^[6]。空间段是通信的主要承载者，负责信息的传输；地面段作为卫星互联网系统的重要组成部分，负责信息接收和处理，以及对卫星的控制；用户段主要由手持、便携、车载、船载、舰载、固定站等各类卫星互联网终端组成。卫星互联网系统组成如图 1 所示。

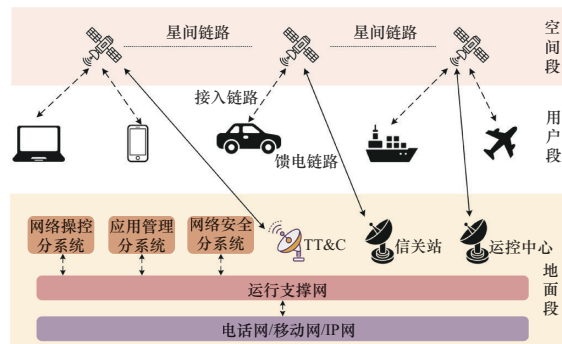


图 1 卫星互联网系统组成

3 卫星互联网应用场景

近年来，卫星制造和运载发射成本大幅降低，星载相控阵天线技术快速发展，地面通信终端芯片能力快速提升，给传统卫星网络行业注入了新的活力，使具备无处不在、泛在接入、连接可靠、高速传输等优势卫星互联网应运而生，并推动其广泛应用于各个领域，在更多的应用场景下创造价值。

3.1 航天领域应用

当前航天市场处于快速发展阶段，但受到地面测控网和信关站的覆盖限制，运载器和航天器对全时测控和实施数据传输的需求难以得到有效满足。卫星互联网具有广泛应用于航天领域的潜力，它可以通过混合星座和星间网络实现低轨空间和全球范围的覆盖，提供稳定的通信连接和高速的数据传输服务，并支持卫星之间的协同作业和资源共享。

利用卫星互联网的覆盖优势、容量优势和星间链路，构建以天基测控为主体、地基测控为补充的一体化测控

通信体系,作为深空通信中继,大幅提升其实时回传、在轨数据服务、导航增强服务等方面的能力,提高传输效率和任务执行效率。

2024年3月14日,马斯克借助星链卫星对第3次“星舰”发射试验全程进行了高清直播,此次太空直播不仅展示了卫星互联网在实时高清数据传输方面的巨大潜力,更为航天领域提供了一种全新的、可靠的通信手段,预示着未来深空探测和全球通信网络建设的新纪元。

3.2 航空领域应用

近年来,航空运输规模、航班数量和航线网络不断增长,但是航空领域的快速发展暴露出一些问题。首先,传统地空通信网络覆盖范围有限,已有的卫星通信系统如铱星、海事卫星、天通卫星等容量有限,导致在某些地区或海上飞行时通信信号的中断或不稳定,给飞行安全和导航带来潜在风险。其次,后舱宽带上网日益成为乘客的迫切需求,现有的卫讯、海事和中星等卫星受覆盖范围(高纬度地区无法覆盖)和传输带宽的限制,乘客上网的速度慢,上网时间受到限制,后舱宽带上网服务质量不及预期。卫星互联网具备全球宽带覆盖的能力,可以为航空器提供实时、高速率的通信连接,在上述应用场景中将发挥重要作用。

利用卫星互联网的全球覆盖、低时延特性和高并发优势,航空器在飞行过程中,能够全面、实时掌控飞行过程中空地语音、飞行参数、气象数据、管制指令等数据信息,大幅提高飞行安全性和运行效率;对于后舱乘客能够提供流畅的网络连接和不间断的高速网络服务,提升乘机体验;对活跃于低空空域的通航飞机、无人机等提供远距离通信,全面提高低空空域的管理水平和管理效率;通过对全空域的信号覆盖实现对高、中、低空航空器的全空域监视与控制,全面提升航空安全水平、空域容量和运行效率。

2022年10月,SpaceX公司的“星链”推出了“星链航空”服务,为公务机、民航客机提供机上Wi-Fi服务,平均下载速度达126 Mbit/s,上传速度7.6 Mbit/s,时延约54 ms。“星链航空”服务的推出,不仅是卫星互联网技术在航空领域的一次成功应用,也是对未来航空通信服务潜力的一次有力证明。

3.3 海洋领域应用

海洋作为地球上最大的生态系统之一,在海洋交通运输、海洋资源开发利用、海洋科学研究等多个方面对人类的经济、社会和环境都具有重要意义。受限于广袤的海域面积和稀疏的通信基础设施,海洋领域应用也面

临诸多痛点问题,如海上宽带服务、海洋资源观测、海上安全与应急保障、全球海事交通管理等,传统的岸海通信手段和有限的卫星通信容量均无法满足日益增长的海洋应用需求。卫星互联网借助全球覆盖、高速传输、海量连接和超大容量特性,以及基于星座的规模优势和载荷搭载优势,可以为解决上述痛点问题提供支持,并在以下场景发挥关键作用。

第一,利用各种类型直连卫星终端为海上渔民、渔船、大型远洋船舶、海上平台、科考人员等提供随遇接入的宽带信息服务,满足远离陆地的人员和设施对高速、稳定的通信和互联网访问服务的需求。第二,通过星载遥感载荷和直连卫星的物联网设备获取高实时的海洋环境信息,帮助行业专家和决策者更好地了解和管理海洋资源。第三,可实现海上安全行动和应急保障行动任务地点精确定位、远程视频指挥、多方信息协同、远海无人智能装备控制等,通过卫星互联网建立骨干信息交换网络实现跨域协同和多域信息融合。第四,利用卫星互联网的广域覆盖和高并发接入能力,为全球范围内的各型船舶提供海上交通信息播报和宽带数据交换服务,实时监控船舶的位置、航向和速度等信息,增强船舶间、船岸间的信息交互与安全保障能力,为船舶提供导航和航行安全的决策支持,提高海上交通的安全性和效率。

2022年7月,SpaceX推出“星链海事”服务,面向远洋邮轮、豪华游艇、货轮或海上资源勘探平台等用户,提供覆盖全球的卫星宽带服务。“星链”一方面通过直销业务与各邮轮公司签订合作协议;另一方面通过软件定义广域网(SD-WAN)、网络管理平台等手段融入分销商海事通信解决方案,还通过完全托管服务的形式集成到SES公司的海事卫星通信服务中,下载速度达77 Mbit/s,上传速度15.72 Mbit/s。“星链海事”服务的推出不仅为海上通信带来了革命性全球覆盖,为海上用户提供了高质量的互联网接入,也为海洋领域的通信、安全、效率和经济发展带来了深远的影响,预示着海洋通信新时代的到来。

3.4 地面领域应用

随着互联网的普及和数字化技术的迅猛发展,地面网络领域正在经历快速而持续的进步,人们对高速、可靠的网络连接的需求不断增长。地面网络在某些场景中仍面临一些痛点问题。首先,地面网络的覆盖范围有限,偏远地区、山区、海洋和航空等特殊环境下的网络接入困难,造成了数字鸿沟的进一步加剧。其次,地面网络在自然灾害、紧急情况或网络故障等不可预见的事件中

易受干扰，导致通信中断和信息无法及时传递。最后，地面网络的建设和维护成本高昂，需要大量的基础设施和人力资源投入，对于资源匮乏或经济发展相对滞后的地区来说，部署地面网络是一项巨大的挑战。卫星互联网具备全球覆盖、快速部署、灵活可靠的特点，可在地面领域的下述场景中发挥独特作用。

第一，卫星互联网可以为地面网络无法覆盖的区域，如偏远地区、岛礁、山区、草原的用户，提供随遇接入服务，满足人们全时全域的网络信息服务需求；第二，利用不受地面条件影响和大容量的优势，可以满足灾害地区及时可靠的紧急通信需求，最大限度保障人民群众生命财产安全；第三，利用星载遥感载荷和综合信息处理技术为农民提供农作物管理和灾害预警，支持农村教育、医疗和电子商务等领域的发展，促进农村地区的经济增长和社会进步；第四，利用卫星互联网广覆盖、大容量、低时延特性，为全球范围内的物联网设备提供稳定、可靠、安全的通信连接，促进数字化社会的进步和应用的推广。

2022年以来，随着卫星互联网蓬勃发展，利用低轨卫星为地面智能手机提供直连服务的计划逐渐兴起，手机直连卫星正在走向商业化应用阶段。美国AST SpaceMobile和Lynk Global等公司发射了低轨试验卫星，验证了普通手机不做任何改动直接接入卫星网络的能力。苹果公司和全球星（Global Star）公司合作，推出了支持卫星紧急通信的商用手机，引起业界广泛关注。2023年10月，SpaceX公司在“星链”官网正式上线“直连手机”（Direct to Cell）业务板块。2024年3月，“星链”利用三星的安卓手机，完成了直接跟卫星通信的数据下载达到17 Mbit/s的新纪录。另外，2022年10月，“星链”与日本KDDI电信公司签订合同，为其公司远程站点提供蜂窝回程服务，服务日本山区及岛屿地区的企业用户。2023年5月，“星链”宣布与美国城际铁路公司签订服务采购协议，为美国佛罗里达州城市间运行的10列火车（最高速度200 km/h）开通“星链”宽带服务，开创全球采用卫星宽带提供列车上网服务的先河。卫星互联网在地面领域的应用不仅为全球用户提供了更广泛、更可靠的网络连接，还为数字经济和社会发展注入了新的动力。

3.5 其他领域应用

卫星互联网在其他领域，如政府和军事等领域也扮演着关键角色，可为决策制定、通信联络、情报收集和战场指挥等提供重要的支持。卫星互联网为政府通信和

应急响应提供了高效可靠的全球通信网络，确保各级政府的持续联系与协调；在情报、侦察和监视方面，卫星互联网通过提供高分辨率的卫星图像与情报数据，为军事机构的目标识别、情报分析与军事目标评估提供支持；在战场指挥与控制方面，卫星互联网使指挥官能够实时获取战场数据与情报信息，从而与部队和指挥中心进行快速通信与指挥。此外，卫星互联网在基础设施保护方面发挥关键作用，通过监测和保护关键基础设施，确保国家的电力、水资源、通信网络等基础设施的安全。

星链的军事化应用，生动展现了卫星互联网在现代战场通信中的革命性潜力。这一技术不仅提供了平均100 Mbit/s的高速连接，确保了指挥控制的实时性，而且其低时延（通常为20~40 ms）特性为战术决策提供了近乎即时的信息反馈，极大地增强了军事行动的灵活性和响应速度。随着卫星互联网技术的不断成熟，预计其在军事领域的应用将进一步扩展。

4 卫星互联网的挑战和应对策略

尽管卫星互联网在连接偏远地区、提供全球覆盖和支持关键应用等多方面具有显著优势，但该技术为实现高效稳定的网络运行中，也面临诸多新的挑战和问题，尤其是在频谱拥塞和干扰、传输时延和带宽、卫星发射与成本等方面^[7-9]，还存在亟待解决的技术难题。

4.1 频谱拥塞和干扰

频谱拥塞和干扰问题是卫星互联网领域面临的重要挑战之一，直接影响网络的质量和可用性。频谱作为有限的资源，特别是Ka频段、Ku频段和C频段等广泛使用的频段，需要被多个卫星运营商以及国家和地区合理分配及利用。

为了应对频谱拥塞和干扰问题，可采取以下解决方案。第一，采取频谱规划和管理手段提高频谱利用效率。国家和地区应通过国际组织和相关协定来协商频谱的分配与共享，确保全球范围内的频谱资源得到公平和均衡的利用。第二，采用频谱共享技术，如动态频谱分配和智能频谱管理技术，帮助不同用户或卫星在同一频段上共存而互不干扰，实现更高效的频谱利用。第三，寻找和开发新的频谱资源，如毫米波频段，以缓解频谱拥塞问题。第四，通过技术创新提高频谱利用的效率，包括提高数据传输速率、降低信号时延和增强抗干扰能力。第五，建立监测系统和干扰管理机制，实时监测频谱的使用情况，及时发现和解决干扰问题。

4.2 传输时延和带宽

传输时延和带宽问题是卫星互联网领域的另一大突出挑战,特别是在与5G网络体制融合的情境下,这一挑战显得更加复杂。

首先是通信协议适应性问题。为了满足地面网络的大规模用户需求,卫星互联网趋向于采用与地面5G网络融合的技术体制。由于星地链路相对地面5G基站存在较高的时延,因此需要在卫星端和地面端进行额外的协议适配工作。其次是QoS保障困难。卫星互联网的拓扑结构不断变化,星间链路变化带来的时延抖动使得QoS保障更加困难,尤其是在高负载情况下,可能导致QoS的不稳定。最后是带宽受限。尽管卫星互联网可以提供大带宽和高速率传输,但与不断增长的数据需求相比,带宽仍显不足。

为了克服这些挑战,可考虑采取如下解决方案。第一,降低卫星轨道高度,可以有效减少用户到最近卫星的距离,从而降低时延。例如,SpaceX的Starlink卫星采用几百千米高度的低地球轨道,以获得较低的通信时延。第二,采用先进的通信技术和天线技术,例如更密集的点波束和更高效的星上处理算法,可以有效提升总带宽和数据传输速率。第三,通过部署多层轨道高度的卫星构建混合星座,提供更广泛的覆盖范围和更多的带宽资源。第四,可通过优化地面站和信关站的部署,提供更好的星地连接方案来减小数据传输时延。

4.3 发射和维护成本

尽管低轨卫星互联网代表了未来的发展方向,但其巨量的卫星和随之而来的发射及运维成本给系统建设和维护带来了巨大挑战。每颗卫星的发射成本包括火箭租用、发射服务、地面设备、卫星制造和运输等费用,随着卫星数量的增加,发射成本呈爆炸式增长。卫星在轨道上需要进行定期的维护和控制,以确保其正常运行,星座后期的维护和控制成本较高。卫星的寿命有限,低轨卫星的寿命通常较短,随着卫星逐渐失效,需要不断发射新的卫星来替代,持续的补星需求也增加了运营成本。

针对这些挑战,有以下解决方案可供考虑。第一,采用现代化的卫星制造技术和工艺以及规模化制造来降低卫星的成本,采用模块化设计和3D打印技术等创新方法提高卫星制造效率,减少制造时间和成本。第二,卫星运营商可共享发射和维护资源以降低成本,通过建立合作伙伴关系或联合发射计划分摊发射费用^[10]。第三,火箭重复使用技术是降低卫星发射费用的关键措施之一,

通过回收和再次使用火箭的主要部件,如首级(第一级)和次级(第二级),可以大幅降低每次发射的成本。第四,“一星多能”也是一个有效的解决方案,利用“软件定义卫星”技术让卫星根据任务的需要切换服务功能来满足不同场景的需求,从而提高卫星的经济性。

5 总结与展望

卫星互联网作为“新基建”的重要组成部分,在促进互联网普及、带动信息产业发展、应对网络霸权等方面具有重要意义。我们应充分利用现有航天产业及智能制造基础、信息基础设施先发优势,充分结合国内的制度优势,加快布局我国空天地一体化的卫星互联网,充分发挥中轨、低轨和高轨互联网星座的特色与各自优势。

我们可以对卫星互联网的发展进行大胆预测:短期(1~5年)卫星互联网LEO卫星网络规模将不断扩展,有望在未来几年看到卫星互联网提供更高速度和更广泛的覆盖;中期(5~10年)卫星互联网借助LEO+MEO混合星座组网,性能将进一步提高,可能会成为主要的互联网接入方式之一,尤其是在偏远地区,以及自动驾驶、物联网、远程医疗等领域将逐渐成熟;长期(10~20年)卫星互联网将在全球范围内实现广泛应用,成为不可或缺的基础设施之一,继续为全球社会、商业和科学领域带来深远影响并促进数字包容性,使更多人获得高速互联网连接,实现全球通信的愿景,为未来的技术创新和社会进步开辟更广阔的道路。

参考文献:

- [1] 吕智勇. 高低轨宽带卫星通信系统综合比较分析[J]. 数字通信世界, 2019(1): 19-21.
LYU Z Y. Comprehensive comparative analysis of high and low orbit broadband satellite communication systems[J]. Digital Communication World, 2019(1): 19-21.
- [2] 蓝天翼. “手机直连卫星”的发展与挑战[EB]. 2023.
LAN T Y. The development and challenge of "mobile phone directly connected satellite"[EB]. 2023.
- [3] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 卫星互联网技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Satellite Internet technology: exploration and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [4] 陈昊, 刘中玉. 卫星互联网行业加速发展, 机遇与挑战并存[EB]. 2022.

CHEN H, LIU Z Y. Satellite Internet industry accelerates development, opportunities and challenges coexist[EB]. 2022.

- [5] 中航军工研究. 新时代的中国航天:中国卫星互联网产业[EB]. 2021.

China Aviation Military Research. Chinese space in the new era: China's satellite Internet industry[EB]. 2021.

- [6] 宋昊, 王彤, 马鑫. 低轨卫星互联网现状及其建议[J]. 中国新通信, 2020, 22(19): 61-63.

SONG H, WANG T, MA X. Low earth orbit satellite Internet constellations: status quo and suggestions[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(19): 61-63.

- [7] 空基通信兴趣小组. Starlink 和 AST 要实现卫星手机直连在协议方面需要做哪些改造(基于 NTN)? [EB]. 2022.

Space-Based Communications Interest Group. What protocol modifications (based on NTN) do Starlink and AST need to make to achieve direct satellite phone connection? [EB]. 2022.

- [8] 郝才勇, 张琪, 蔡鸿昀. 卫星互联网发展的挑战[J]. 数字通信世界, 2019(7): 35-36.

HAO C Y, ZHANG Q, CAI H Y. Challenges for the development of satellite Internet network[J]. Digital Communication World, 2019 (7): 35-36.

- [9] 吕红伟, 吕金华, 张琦. 卫星互联网的安全威胁浅析[J]. 科学与信息化, 2021(5): 24-26.

LYU H W, LYU J H, ZHANG Q. Analysis of security threat of satellite Internet[J]. Science and Information Technology, 2021(5):24-26.

- [10] 刘畅, 夏禹, 崔彪. 卫星互联网建设运营模式研究与建议[J]. 卫星应用, 2020(11): 35-40.

LIU C, XIA Y, CUI B. Research and suggestions on the construction and operation mode of satellite Internet[J]. Satellite Application, 2020(11): 35-40.

[作者简介]



单超 (1977-), 男, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网系统总体、网络架构技术等。



马少煊 (1976-), 男, 硕士, 中国星网网络创新研究院有限公司战略规划管理岗, 主要研究方向为新一代网信体系总体架构、应用场景等。



谷欣 (1980-), 男, 硕士, 中国星网网络创新研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网网络安全架构、网络安全标准等。



王妮炜 (1987-), 女, 博士, 中国星网网络创新研究院有限公司高级工程师, 网络技术研究中心副主任, 主要研究方向为卫星互联网、5G / 6G 移动通信等。