



综述

再论推进我国卫星互联网建设的策略建议 ——基于手机直连卫星技术路线与商业闭环的思考

杨岭才, 赵冬, 杨虎啸, 李彦坤, 田野
(中国电信集团卫星通信有限公司, 北京 100035)

摘要: 加快卫星互联网基础设施建设, 推动手机直连卫星等数字经济新技术、新模式、新业态发展, 已经成为全球信息通信领域的重点发展方向。手机直连低轨卫星应用面临巨大的技术挑战, 我国卫星互联网技术成熟度、商业化体系尚不完善, 面临差异需求与全球覆盖、产业投资与商业回报、发射需求与运载能力3方面不匹配的问题, 建议结合国情特点、市场特征、技术成熟度, 充分发挥我国在地面与卫星移动通信领域已形成的产业优势, 探索适合我国手机直连低轨卫星的技术演进路线和商业发展路径, 推动创新链、技术链、产业链、资金链衔接配套, 形成开放、高效、完备、安全的卫星互联网产业和商业生态, 构建适合国情的卫星互联网建设运营模式, 为促进我国数字经济和新质生产力发展构建新引擎。

关键词: 手机直连卫星; 低轨星座; 市场需求; 技术创新

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024222

Further discussion on strategic suggestions for promoting the construction of China's satellite Internet —— Consideration based on the technology route and commercial closed loop of satellite direct connection to mobile phone

YANG Lingcai, ZHAO Dong, YANG Huxiao, LI Yankun, TIAN Ye
China Telecom Satellite Communication Co., Ltd., Beijing 100035, China

Abstract: Accelerating the construction of satellite Internet infrastructure and promoting the development of new technologies, new models and new business forms of the digital economy such as satellite direct connection to mobile phone, has become a key development direction of the global information and communication industry. The application of LEO (low earth orbit) constellation direct connection to mobile phone is facing huge technical challenges. China's satellite Internet technology maturity and commercialization system are not perfect, and it faces the mismatch between different demand and global coverage, industrial investment and commercial return, launch demand and carrying capacity. It was suggested to combine national characteristics, market characteristics, and technology ma-

收稿日期: 2024-06-18; 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1808001)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program (No.2020YFB1808001)

turity. Give full play to China's industrial advantages in the field of terrestrial and satellite mobile communications, explore technological evolution routes and commercial development paths suitable for China's LEO constellation direct connection to mobile phone, promote the connection of innovation chain, technology chain, industrial chain and capital chain, and form an open, efficient, complete and secure satellite Internet industry and business ecology. To construct a satellite Internet construction and operation mode suitable for national conditions, and build a new engine for promoting the development of digital economy and new quality productivity in our country.

Key words: satellite direct connection to mobile phone, low earth orbit constellation, market demand, technological innovation

0 引言

近年来,以卫星互联网为代表的空间信息基础设施建设成为大国竞争和博弈的新高地。手机直连卫星作为卫星互联网的重要使用场景,是构建天地一体信息网络,实现星地网络融合通信服务的重要标志和路径。2024年世界移动通信大会上,多家卫星通信运营商、基础电信运营商及相关产业链发布了卫星互联网建设、手机直连卫星技术和业务创新成果,呈现产业各方协同推动星地融合通信发展的新局面。我国拥有全球规模最大、技术领先的光纤宽带和移动通信网络,截至2024年8月月底,全国5G基站总量已达到404.2万个,成功实现乡镇地区5G信号的全面覆盖。然而,卫星通信技术研发、规模应用动能不足,产业格局相对封闭。为推进卫星互联网建设和手机直连卫星技术研发,国内学术界、产业界进行了广泛、深入的讨论。2022年4月,笔者从星地网络融合、业务运营的角度出发,提出了“天星、地网、枢纽港、云资源池”天地一体规划布局的思考^[1]。本文则从手机直连卫星应用的国内外发展现状及技术路线出发,剖析我国手机直连低轨卫星发展在技术、产业、市场等方面面临的主要问题和挑战,探讨我国卫星互联网和手机直连卫星商业化发展的路径。

1 手机直连卫星的国内外发展现状

1.1 国外发展现状

2003年“哥伦比亚”号航天飞机在返航过程

中爆炸解体,引发了美国各界对传统航空航天在系统设计、成本、管理及安全等问题上的反思^[2],2003年美国发布《国家航天运输政策》和《美国国家航天政策》,将近地轨道运营任务从美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)转移到私营航天公司。美国航天发展从政府主导逐渐转向私营企业参与。美国太空探索技术公司SpaceX先后投入巨资,开展液体推进剂、可重复回收等先进火箭的设计研制,大大降低了卫星发射成本,这为SpaceX随后向低轨卫星互联网领域拓展奠定了坚实基础,促使SpaceX公司在历经20余年的发展后,逐渐崛起成为全球商业航天产业的领头羊。2019年SpaceX启动星链(Starlink)低轨星座系统部署计划,截至2023年年底,其低轨卫星建设规模已达5 144颗,在全球65个国家实现落地应用,服务用户超200万,并于当年实现了公司成立以来的首次盈利。近期SpaceX与美国、英国、加拿大等国的地面运营商合作,开展基于“基站上星”的4G长期演进(long term evolution, LTE)存量手机直连卫星方案技术试验,于2024年下半年推出商用服务。美国AST SpaceMobile公司也与美国、日本等国的地面运营商合作,基于蓝行者3号(BlueWalker 3, BW3)通信卫星通过星上透传模式完成LTE存量手机直连卫星技术试验。部分终端厂商加快探索将现有卫星通信能力集成到智能手机中,苹果公司与美国GlobeStar公司合作在iPhone 15中引入了卫星



通信功能，Skylo 公司基于与国际海事卫星组织（International Maritime Satellite Organization, INMARSAT）、EchoStar 公司的合作推出手机直连卫星服务，支持用户在没有地面移动网络信号的情况下发送紧急求救信息。2024 年 4 月，美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）通过了《空间补充覆盖（SCS）》监管规则，在地面运营商与卫星运营商形成租赁或合作协议的基础上，允许使用指定的地面移动通信频率通过手机直连卫星将无线网络覆盖扩展到偏远地区，同时强调此类卫星移动业务为次要业务，需要避免对现有地面网络及其他业务系统造成有害干扰。

1.2 国内发展现状

2021 年 10 月 18 日，习近平总书记在中央政治局第三十四次集体学习中强调要加快建设高速泛在、天地一体、云网融合、智能敏捷、绿色低碳、安全可控的智能化综合性数字信息基础设施，2021 年、2022 年国家有关会议和文件明确要推动高轨卫星与中低轨卫星协调发展，推进卫星通信系统与地面信息通信系统深度融合，增强数据感知、传输、存储、运算能力，加快物联网、工业互联网、卫星互联网、千兆光网建设，为陆海空天各类用户提供全球信息网络服务^[3-5]。全国多省市陆续发布卫星互联网规划，旨在推动卫星互联网和卫星应用产业的高质量发展。

在相关政策指引下，国内企业正快速跟进、

加速布局卫星互联网建设^[6]。中国卫星网络集团规划建设由 3 万余颗卫星组成的高速太空互联网，目前已发射多颗试验星，计划于 2030 年前面向全球各行业提供卫星宽带接入及手机直连卫星服务。上海垣信规划“G60 星链”卫星互联网项目，计划将超 1.2 万颗卫星送入轨道。在手机直连卫星方面，依托地球同步轨道的天通卫星系统，中国电信于 2023 年 9 月在全球率先发布手机直连卫星双向语音通话及短信收发通信服务，联合华为、荣耀、小米、OPPO、中兴等国内主流终端厂商陆续发布多款支持手机直连卫星的消费级终端，并于 2024 年 4 月联合比亚迪公司发布直连卫星的高端车型。同时，电信运营商积极开展基于 5G 非地面网络（non-terrestrial network, NTN）技术端到端实验室及在轨试验，加速推动星地融合通信技术向纵深发展。

2 手机直连低轨卫星的技术路线及关键技术挑战

2.1 技术路线选择

国内外手机直连卫星产业在技术路线选择上主要有双模终端接入、存量终端接入、5G NTN 技术这 3 种技术路线，这些技术路线各有特点和优势，适用于手机直连卫星不同发展阶段下差异化的应用场景和用户需求，3 种技术路线对比见表 1。

由表 1 可知，双模终端接入技术路线是基于现有卫星系统能力的过渡方案，最大限度降低了

表 1 3 种技术路线对比^[7-8]

技术路线	主要特点	典型系统	业务能力	优势	劣势
双模终端接入路线	使用双模终端适配现有卫星网络和地面网络两种独立技术体制	Globalstar、铱星系统、天通系统	短信、语音、低速数据业务	卫星网络改造小，建设成本低、时间短	用户需要更换终端；私有化定制双模芯片/终端，市场规模受限
存量终端接入路线	用户不需要更换终端，通过新建卫星网络补偿，使现有手机直接接入卫星网络	Starlink V2.0、AST BlueBird	语音、短信及中高速数据业务	用户不需要更换终端，潜在用户群体大	私有化定制卫星网络；技术实现难度大，建设成本高、时间长
5G NTN 技术路线	采用星地融合统一协议体制，提供星地融合服务	Omnispace	语音、短信及中高速数据业务，可支持星地融合创新应用需求	采用公开标准体制；便于形成星地融合规模产业	协议标准成熟度、关键技术工程化能力尚需要提升；星地网络端到端系统性规划建设周期长

建设成本,但用户需要更换终端,市场规模相对受限;存量终端接入技术路线是基于现有地面网络能力的过渡方案,但卫星网络的设计实现难度及建设成本居高不下,且在多用户接入时系统性能难以保障;5G NTN 技术路线是基于第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)公开标准平台的技术体制,在端到端通信协议设计过程中综合考虑了卫星与地面系统的协同能力需求,是未来实现天地一体融合通信的发展方向,可复用地面移动通信规模产业优势,实现星地融合技术体制的持续演进。在商业化进度上,双模终端技术路线可基于现有协议及终端优化快速实现商业落地,存量终端及5G NTN 技术路线均受卫星网络设计建设的制约,目前尚处于技术试验阶段。此外,要实现天地一体规模产业构建,5G NTN 技术路线在标准协议成熟度、技术产业成熟度等方面仍需要不断提升。

2.2 实现手机直连低轨卫星面临的主要技术挑战

手机直连低轨卫星涵盖了卫星研制、轨道设计、通信协议、系统组网等多个方面,本文基于低轨卫星系统特点,重点对业务链路设计、干扰规避、网络管理、卫星与运载火箭设计制造以及星地融合组网等方面存在的问题与挑战进行综述分析。

2.2.1 链路预算

与地面蜂窝移动通信系统相比,卫星通信系统收发端距离远,传输损耗极大,业务链路预算紧张是其最显著的问题。以2 GHz 频段为例,地面蜂窝移动通信系统中10 km 小区半径下基站与小区边缘用户间约对应118 dB 的自由空间路径损耗,而600 km 轨道高度的低轨卫星星下点的终端与卫星载荷的自由空间路径损耗约为154 dB,仅路径损耗相差30 dB 以上。同时,低轨卫星对地快速移动的特性,导致从终端角度看,低轨卫星在可视范围内的俯仰角和方位角处于快速变化状态,而系统设计则期望手机即便在低仰角区域,天线仍可保持较高的增益水平,这对手机终端在

宽幅仰角条件下的高增益天线实现提出了挑战。除在提升天线增益基础上提升终端发射机功率等级及接收机灵敏度外,还可以采取提高星上接收机接收品质因数(G/T 值)及整星发射功率的策略,或采用跳变高增益点波束技术缓解无线链路上下行的链路预算紧张问题,这对卫星制造及发射提出了更高的技术及工程要求^[9-10]。

2.2.2 传输时延

卫星通信因收发端距离远,不可避免地产生了超高的链路传输时延,在透传模式下,高轨和低轨卫星通信典型传输时延见表2^[11]。

表2 高轨和低轨卫星通信典型传输时延

项目	高轨卫星	低轨卫星	
	35 786 km	600 km	1 200 km
最大双程传输时延 (透传模式下)/ms	541.46	25.77	41.77
最大差分时延/ms	10.30	3.12	3.18

针对卫星系统端到端绝对时延大且多用户间时延差较大的问题,5G NTN 标准中引入了终端通过系统广播星历信息和自身全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS) 信息进行定时提前的预补偿方案,协议上通过时序关系增强、定时器增强等方案对过大的星地通信往返时间进行适配。低轨卫星系统可通过增加星上处理能力在一定程度上降低传输时延,但其时延补偿涉及频繁的波束、小区甚至卫星间切换。当前业内针对新空口非地面网络(new radio non-terrestrial network, NR NTN) 的商业化探索仍以高轨为主,基于低轨卫星的技术实验正逐步展开。对于存量手机直连技术路线,其解决方案为设置虚拟参考点进行定时提前处理^[12],此参考点可在波束小区范围内,也可设置在传播路径的空中某点,同时基站侧实施冲突规避设计算法维护时序关系,国内尚未发现针对该方案实际性能的测试验证报告^[13]。

2.2.3 多普勒频移

低轨卫星绕地飞行速度接近第一宇宙速度



(7.9 km/s)，与地面静止终端相对位置快速时变带来的多普勒效应会导致信号频率发生变化，从而影响通信系统的同步机制、信号解调、切换等流程，可能导致设备无法接入网络或频繁通信中断。高轨和低轨卫星通信典型多普勒频移见表3^[11]，由表3可知，以2 GHz频段为例，低轨卫星多普勒频移为-48 kHz~48 kHz，而低轨卫星系统的多普勒频移变化率可达高轨卫星的6 000倍。

表3 高轨和低轨卫星通信典型多普勒频移及频移变化率

项目	高轨卫星	低轨卫星	
	35 786 km	600 km	1 200 km
最大多普勒频移/ 10^{-6}	0.93	24	21
最大多普勒频移变化率/ (10^{-6}s^{-1})	0.000 045	0.27	0.13

为克服低轨卫星多普勒频移问题，5G NTN通信协议引入了多普勒频移补偿协议流程，终端通过卫星系统广播星历信息和自身GNSS定位信息进行频偏补偿。对于存量手机直连技术路线，多普勒频移的处理均需要在网络侧完成，即下行由基站进行预补偿，确保终端收到的残留多普勒频移在自身频偏补偿范围内，同样，上行多普勒频移也由基站进行处理。上述网络侧的频偏补偿与时延补偿类似，需要基于固定虚拟参考点进行小区级统一补偿，对小区半径、最小服务仰角等有一定限制^[14]。无论5G NTN路线还是存量手机直连技术路线，针对低轨多普勒频移问题的解决方案基本与时延补偿方案类似，但国内目前主要聚焦于基于5G NTN路线部分场景的试验探索，距离工程实施仍有较大差距^[13]。

2.2.4 干扰规避策略

Starlink、AST SpaceMobile等卫星运营商与地面蜂窝运营商合作，使用地面蜂窝移动通信频率，通过手机直连低轨卫星实现对地面蜂窝网络的覆盖补充。在此典型场景下，低轨卫星系统设计需要考虑干扰规避策略，确保不对地面蜂窝网

络的同频、邻频业务造成干扰。手机直连低轨卫星系统干扰隔离区设计如图1所示，为保护地面系统，低轨系统的业务波束需要尽可能小，以便与地面移动通信网覆盖区域无交叠；由于低轨卫星使用的相控阵天线旁瓣抑制能力有限，通常需要设置一定的地理隔离区，确保在隔离区外达到干扰保护电平限值要求，如功率通量密度(power flux density, PFD)限值。卫星天线设计需要具有较高的旁瓣抑制能力，以最小的隔离区设置保障用户体验。此外，业内还提出采用设置电子围栏对地面系统业务区进行标记，规避潜在干扰。受限于当前我国卫星相控阵天线设计实现能力及电子围栏技术的实现精度，目前指导工程实施的有效方案仍在探索中^[9-10]。

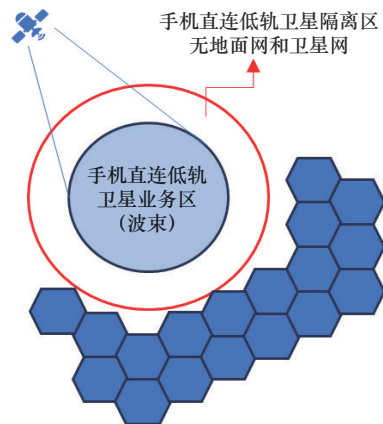


图1 手机直连低轨卫星系统干扰隔离区设计

2.2.5 卫星波束设计

基于NTN的低轨卫星系统预计将全面采用跳波束方案。跳波束以时分加空分形式，通过灵活、精确控制卫星相控阵天线辐射方向，在卫星覆盖范围内实现对卫星频率和功率资源的灵活调度。采用该方案时，需要预先进行波位设计，根据卫星覆盖范围内业务分布，灵活分配波束资源，即业务量大的区域分配多个时隙和点亮波位，业务量少的区域减少波束时隙并关闭波位，优化系统资源利用效率和容量^[15-16]。波束凝视是跳波束应用的一种特殊形式，该技术使得单个波

束在卫星移动过程中保持对固定目标区域提供服务,不需要进行星内波束切换,可缓解频谱资源紧张的问题,并向有需求的地区提供较长时间的服务,Starlink和AST为代表的存量手机直连卫星路线中使用了波束凝视方案。同时,如前文所述,由于存量手机直连卫星系统依赖网络侧补偿频偏会限制波束小区半径,相比NTN手机直连技术路线,单星覆盖范围内需要规划更多波位数量,处理复杂度提升,该问题可从多维度优化系统设计进行缓解:一是进一步提升网络侧基带算法频偏补偿能力;二是通过星上处理缓解网络侧频偏补偿需求;三是采用更大尺寸的卫星天线并提升单星可同时激活的波束数量。总之,无论波束凝视还是跳波束技术的使用效率,均受星载大型相控阵天线的设计实现及相关发射能力的制约^[9-10]。

2.2.6 卫星与火箭设计制造

如前文所述,手机直连低轨卫星技术面临链路预算紧张、多普勒频移大、干扰规避复杂等问题,这对网络侧设备,特别是卫星和基站提出了更高的要求,尤其对星载大规模相控阵天线系统在高增益、宽/窄波束灵活可调、高旁瓣抑制等性能方面提出了挑战,从而也带来功耗高、散热难、尺寸大等工程实施问题。同时,大规模低轨卫星系统建设对低成本、高性能的平板卫星平台需求迫切,在卫星平台结构设计、供电散热能力、卫星定轨能力,以及基于器件成本控制的抗辐照及加固需求等方面都提出了挑战。此外,一体式非折叠设计对运载火箭的整流罩尺寸有较高要求,极大考验了航天运载火箭设计能力。相比美国,我国对展开式大面积相控阵天线技术研发尚在进行,展开机构、阵翼一体等关键技术处于原理样机设计验证阶段。这些都是低轨卫星系统工程建设迫切需要解决的现实难题^[17-18]。

2.2.7 低轨星座运控管理

巨型低轨星座系统是由不同星座构型、不同单星能力的大量低轨卫星组成的异构系统,其运

控管理复杂度极高^[19],体现在以下方面:一是实时管理。为了确保系统高效运行,并适配全球不同业务市场差异化、时变性需求,运控系统需要使用先进的自动化工具等智能化技术手段对低轨卫星进行实时管理。二是精确轨道预测与控制。低轨卫星轨道衰减快、姿态稳定性差,且随着在轨卫星数量增加,碰撞风险随之上升。运控中心需要建立可靠的轨道维持及碰撞规避机制,持续监测轨道数据,预测潜在风险并及时调整。同时,实现星间链路高效稳定的数据传输也对精确轨姿控制提出巨大挑战。三是服务保障。规避操作需要在不影响服务质量的前提下进行,这对决策机制的合理性、适配性提出了更高要求。同时,运控策略需要具备高度灵活性,以应对卫星在轨运行中的各种突发状况,如卫星故障、空间环境变化等。

2.2.8 星地融合技术

卫星通信、移动通信及固定通信网络的发展历程是网络架构、传输技术、标准协议逐步趋同,云网融合、终端融合、数据融合持续推进的趋同演进过程,星地网络融合和业务无缝接入已成为信息通信产业发展的必然趋势^[20-21]。手机直连卫星应用是基于天地一体多层、异构网络协同的融合创新,地面网络与卫星网络的协同程度直接决定了系统效能和用户体验。传统异构网络之间的协作通常通过终端漫游和系统侧互联来实现。手机直连卫星系统需要在接入网、核心网层面为星地动态协同构建接口,通过实时信息交互,高效管理星地网络的时间、空间、频率、功率等资源,实现多层网络的联合资源优化和控制,为用户提供最佳的业务体验^[1]。低轨卫星系统本身具有多层异构、动态变化的特点,这使得在星地融合系统的设计上尤为复杂^[22]。在网络架构方面,考虑星地传输环境的巨大差异,卫星系统与地面系统在接入网的基础设施必然是各自建设的,但是可以采用软件定义虚拟化技术,构建天地一体资源统一编排、用户统一认证及星地协



同的安全体系,以实现核心网一体化设计^[23],部署中可通过升级现有地面核心网的方式兼容支持对卫星接入业务的统一管理;在技术体制方面,需要采用统一的空口协议设计、强化多层异构网络移动性管理,实现星地网间随选接入能力;在频率资源共用方面,需要结合先进的波束形成技术,通过时间、空间、功率等多维协同手段实现星地频率动态共享,提高频谱资源的使用效率。当前国内手机直连低轨卫星系统在星地协同方案上尚未形成明确思路,无论在技术方案研究还是商业化路线方面仍需要联合相关产业持续探索^[8]。

3 手机直连低轨卫星发展面临的产业挑战

3.1 全球均匀覆盖与需求差异分布不匹配

低轨手机直连卫星应用可为全球各地用户提供不受地域限制的即时通信服务,然而其全球均匀覆盖的特性与不均衡的市场需求分布存在矛盾。一是网络基础设施建设的差异。以中美为例,在宽带接入、移动通信基础设施建设方面,我国长期以来将固定及移动通信网络建设作为数字中国建设的基础性工程。工业和信息化部2023年统计数据显示,我国城市、乡镇、行政村已100%实现光纤入户或移动通信网络覆盖,全国贫困村的光纤接通率达到98%。相较而言,美国宽带及移动通信产业的发展主要依托运营商的市场化运作,调查数据显示,美国农村地区有约17%的居民、原住民部落地区有约21%的居民无法接入网络,这些人群是使用卫星网络进行语音、宽带上网的刚需群体。二是通信需求分布的差异。全球覆盖意味着需要在高密度城市与低密度乡村、商业热点与人烟稀少区域之间平衡资源分配,如在需求密集区域,卫星容量面临服务瓶颈,导致服务质量难以满足用户期望。三是监管准入的差异。各国家及地区对卫星通信频谱资源的分配、使用规则、数据流跨境监管等相关法规存在差异,影响低轨卫星系统在全球范围内的服务落

地,这需要与各国和地区的电信监管机构协调,确保合规落地运营。

3.2 星座建设投入与商业回报不匹配

低轨卫星星座系统的建设投资巨大,如何实现商业闭环是构建低轨卫星星座的关键难题。自2015年起,全球在国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)申报的低轨卫星星座项目数量激增,依据申报资料中7年内投入使用及建设的里程碑规则^[24],从2024年起近地轨道卫星星座开始密集发射。然而,ITU数据库统计,超20%已申报星座项目已被标记为“取消”或处于“休眠/未知”状态。由于低轨巨型星座项目存在资金、资质、运营和技术等壁垒,叠加投入周期长、政策及发展战略不确定等特点,星座工程建设的投资回报比难以保障,全产业链降本增效对于提升商业效率极其关键,这需要卫星制造从“定制化研制”向“批量化生产”转变,火箭低密度发射向可回收发射转变。SpaceX在卫星研发制造、火箭发射、地面站建造、卫星运维、终端生产方面完成一体化产业布局,实现了降本增效。我国低轨卫星系统产业链尚不完善,总体成本相对较高,需要持续培育国内卫星制造、发射服务、地面设施建设等关键环节的自主能力,营造良好产业生态,提升整体竞争力。除上述提到的优化卫星产业布局、提升技术创新水平外,为实现手机直连的商业闭环,还需要挖掘、明晰客户需求,匹配合理的盈利模式,在市场拓展与资源整合的合作运营模式上持续探索。

3.3 发射需求与运载能力不匹配

巨型低轨卫星星座的构建需要与之匹配的火箭及运载能力。考虑火箭发射的轨道高度、运载能力使用情况不同,为便于比较,将所有发射火箭按其型号或近似型号的200 km轨道高度低轨卫星运载能力进行折算,2018—2023年中美运载火箭发射次数和低轨卫星运载能力对比见表4。由表4可知,2018—2021年,我国运载火箭发射次

数超过美国,但由于我国以中小型运载火箭发射为主,而美国重型火箭发射次数较多,其实际发射入轨的航天器数量更多、质量更大。2022年后,随着“猎鹰九号”可重复使用运载火箭的大规模使用,美国运载火箭发射次数和入轨航天器数量大幅增加。2023年我国全年LEO运载能力为美国的12%。如按3年完成1200颗支持手机直连低轨卫星星座发射组网的需求估算,每年需要具备至少600t的发射能力。

表4 2018—2023年中美运载火箭发射次数和低轨卫星运载能力对比

年份	中国		美国	
	运载火箭成功发射次数	低轨卫星运载能力/t	运载火箭成功发射次数	低轨卫星运载能力/t
2018年	38	222.3	34	651.6
2019年	32	203.3	27	490.8
2020年	35	232.3	40	686.0
2021年	52	322.6	48	801.4
2022年	62	297.6	84	1 648.7
2023年	66	294.3	109	2 455.3

注:以上数据根据RocketLaunch.org网站统计的每年各型运载火箭发射次数以及中美各型运载火箭的标称低轨卫星运载能力统计得出。

4 我国手机直连卫星商业化发展的建议

在以美国SpaceX为代表的全球低轨卫星互联网,特别是手机直连卫星产业的快速发展态势下,应客观评估我国在手机直连低轨卫星技术创新与工程实施能力等方面的差距。加快我国手机直连卫星的技术创新和商业拓展,不能简单比拼星座规模、技术绝对先进,应坚持以新型举国体制为指导,重视发挥我国在移动通信产业的综合优势^[25],以地带星、高低协同,市场牵引、技术驱动,走适合国情的手机直连技术创新和商业化发展路线。

4.1 聚焦我国市场特征,培育市场应用

手机直连卫星的技术路线和商业模式与特定市场需求、信息通信基础设施建设水平、产业链和技术链成熟度以及城乡人口分布等密切相关。

卫星互联网业务在全球不同国家和地区的市场定位、业务需求和应用场景存在极大差异。我国地面通信网络基础设施覆盖比较充分,手机直连卫星应用主要为公众提供户外作业、旅游及特殊场景下的应急保底通信服务,资费相对较低的语音、短消息、低速数据能力可基本满足此类应用需求。高轨卫星系统可以相对较低的建设成本面向全球重点区域,快速构建稳定的中低速率基础通信服务能力,并通过灵活的波束资源集中在特殊情况下为局部重点区域提供高可靠、高容量的应急服务。低轨卫星星座系统建设对星座规模和系统运控要求更高,通过分阶段建设可逐步实现面向全球均匀覆盖的中高速率通信服务能力。在投资建设大规模、高成本的低轨卫星星座前,建议充分利用高轨手机直连的先发优势及市场拓展成果,挖掘、培育卫星通信在汽车、舰船、航空、无人机、物联网等领域更为广阔的创新应用空间,逐渐培养终端用户的消费习惯。

4.2 坚持系统谋划,优势产业带动产业融合升级

我国地面蜂窝网络覆盖好、用户基数大,统一规划、建设和运营星地融合网络,借助卫星互联网进行补充覆盖,实现用户不换卡、不换号在卫星网络和地面网络间漫游互通,能够综合地面蜂窝网络优势和卫星拓展覆盖的能力,促进手机直连卫星的商业闭环达成。我国手机直连低轨商业化发展路线,应坚持系统思维统筹谋划,以面向天地一体的网络、终端、业务、运营全面融合为目标^[1],统筹规划低轨星座系统与地面蜂窝系统、高轨卫星系统,将手机直连卫星定位为地面蜂窝网络的补充、增强,将卫星研发与火箭运载能力匹配起来,将星座建设与场景应用终端生态构建联动起来,分阶段、分步骤,由薄到厚,逐步实现产业总体水平的全面提升。

4.3 鼓励产业开放协同,促进产业技术创新

要充分发挥国有企业,特别是电信运营商的产业牵引作用,以融合产业优势和规模应用前景



激活卫星互联网全产业链的创新动能^[6], 调动发挥电子、航天等骨干国企力量攻关卫星载荷及天线设计、多普勒频偏及时延补偿、用频及体制协议、地面系统组网、可回收式火箭等关键技术难题, 推动星地系统、高低轨卫星系统通信标准和接口实现统一, 系统提升整个产业生态协同性和技术经济可行性, 最终, 通过扩大产业规模和技术迭代, 实现手机直连低轨卫星系统的商业闭环。同时, 统筹好新型举国体制与开放发挥市场主体积极性之间的关系, 支持和引入更多民商主体参与国家卫星互联网建设, 联合打造覆盖芯片研发、终端制造、网络建设、应用开发、业务运营、市场拓展等完备繁荣的产业, 推动技术共研、系统共建、资源共享、生态共赢^[25], 赋能卫星互联网高质量发展。

5 结束语

发展卫星互联网及手机直连应用产业, 推进新型基础设施建设, 将有利于实现国内经济社会向数字化转型, 提升我国的国际整体竞争力。对于我国卫星互联网建设路径与策略, 建议紧密结合国内市场需求及我国地面蜂窝通信产业现有优势, 在持续做好手机直连高轨卫星系统的基础上, 同步规划高低轨协同、星地融合的手机直连产业中长期发展战略, 以新型举国体制牵引并带动创新链、技术链、产业链与资金链的高效协同, 从而推动空天地一体化信息产业在技术创新和系统建设方面取得突破性进展, 为全球通信行业的进步和发展贡献中国智慧与力量。

参考文献:

- [1] 杨岭才. 关于快速形成我国天地一体通信运营能力的思考[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 1-10.
YANG L C. Thoughts on the rapid formation of China's space-ground integrated communication operation capability[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 1-10.
- [2] KRAUSS L. The space shuttle programme has been a multi-billion-dollar failure[N]. The Guardian, 2011-07-21.
- [3] 新华社. 习近平在中共中央政治局第三十四次集体学习时强调把握数字经济发展趋势和规律推动我国数字经济健康发展[EB]. 2021.
The Xinhua News Agency. At the 34th group study session of the Political Bureau of the CPC Central Committee, Xi stressed grasping the development trend and laws of the digital economy to promote the healthy development of China's digital economy[EB]. 2021.
- [4] 中央网络安全和信息化委员会. “十四五”国家信息化规划[EB]. 2021.
The Central Cyberspace Affairs Commission. National informatization plan in the 14th five year plan[EB]. 2021.
- [5] 中共中央、国务院: 扩大内需战略规划纲要(2022—2035年)[EB]. 2022.
Strategic plan for expanding domestic demand (2022—2035) issued by the Central Committee of the Communist Party of China, the State Council[EB]. 2022.
- [6] 柯瑞文. 发挥网络强国主力军作用加快发展新质生产力 奋力谱写中国式现代化的电信篇章[J]. 中国信网, 2024(4): 62-65.
KE R W. Give play to the role of the main force of the network power, accelerate the development of new quality productivity, and strive to write the chapter of telecommunications in Chinese path to modernization[J]. Chinese Journal of Cyberspace, 2024(4): 62-65.
- [7] 李屹寰. 天地一体网络架构及标准体制[R]. 青岛: 2023 中国无线电大会, 2023.
LI Y H. Integrated network architecture and standard system of heaven and earth[R]. Qingdao: China Radio Conference, 2023.
- [8] 宋艳军, 肖永伟, 孙晨华. 手机直连卫星关键技术分析与发展展望[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 1-9.
SONG Y J, XIAO Y W, SUN C H. Analysis and future development of direct-to-handset satellite key technologies[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 1-9.
- [9] 胡馨元, 邓若琪, 邸博雅, 等. 可重构全息超表面辅助卫星通信关键技术[J]. 电信科学, 2022, 38(10): 46-56.
HU X Y, DENG R Q, DI B Y, et al. Key technologies of satellite communications aided by reconfigurable holographic surfaces[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(10): 46-56.
- [10] 焦凌霄, 李文静, 童建飞, 等. 面向手机直连的星载相控阵: 关键技术与未来展望[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 30-42.
JIAO L X, LI W J, TONG J F, et al. Satellite phased arrays for direct-to-handset satellite: key technologies and future vision[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 30-42.
- [11] 3GPP. Solution for NR to support non-terrestrial networks (NTN)V1.0.0(Release16): TR 38.821 [S]. 2019.
- [12] ZU J, SUN Y, PENG M. Timing advance estimation in low earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024(3): 4366-4382.
- [13] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.

- [14] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunication Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [15] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5):21-26.
TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation of beamhopping satellite[J]. Mobile Communication, 2019, 43(5):21-26.
- [16] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. NGSO satellites beam hopping strategy based on load balancing and interference avoidance for coexistence with GSO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(1): 278-282.
- [17] HE Y, XIAO Y, ZHANG S, et al. Direct-to-smartphone for 6G NTN: technical routes, challenges, and key technologies[J]. IEEE Network, 2024, 38(4): 128-135.
- [18] BACCI G, DE GAUDENZI R, LUISE M, et al. Formation-of-arrays antenna technology for high-throughput mobile non-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(5):4919-4935.
- [19] 李菲菲, 胡敏. 巨型低轨卫星星座运行管理模式研究: 第三届中国空天安全会议论文集[C]//中国指挥与控制学会, 2021.
LI F F, HU M. Study on operation management mode of Low orbit satellite constellation: Proceedings of the 3rd China Aerospace Safety Conference[C]//Chinese Institute of Command and Control, 2021.
- [20] 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): 493-504.
- [21] 李丹, 胡翔翔, 鄢江兴. 新型网络技术创新发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021(2): 023.
LI D, HU Y X, WU J X. Innovative development strategy of new network technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2021(2): 023.
- [22] ZHANG Y Y, WU Q, LAI Z Q, et al. Enabling low-latency-capable satellite-ground topology for emerging LEO satellite networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1329-1338.
- [23] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(1): 437-461.
- [24] ITU. Radio regulations articles[S]. 2024.
- [25] 杨岭才. 加快我国卫星互联网建设的策略建议: 基于总体国家安全观和新型举国体制的思考[J]. 国际太空, 2022(12): 23-27.

YANG L C. Strategic suggestions for accelerating the construction of China's satellite Internet: based on the overall national security concept and the new national system[J]. Space International, 2022(12): 23-27.

[作者简介]



杨岭才 (1975-), 男, 博士, 中国电信集团卫星通信有限公司高级经济师、总经理, 主要研究方向为通信运营管理、市场经营组织、产品应用创新等。



赵冬 (1981-), 女, 中国电信集团卫星通信有限公司卫星应用技术研究院技术标准与系统研究部负责人, 主要研究方向为卫星通信频轨与干扰技术、星地融合技术等。



杨虎啸 (1991-), 男, 中国电信集团卫星通信有限公司卫星应用技术研究院频率和轨道研究员, 主要研究方向为国际电信联盟法律法规、空间无线电业务、卫星通信技术。



李彦坤 (1982-), 女, 中国电信集团卫星通信有限公司卫星应用技术研究院标准化研究员, 主要研究方向为无线移动通信、卫星通信、星地融合组网技术及标准化。



田野 (1985-), 男, 博士, 中国电信集团卫星通信有限公司卫星应用技术研究院副院长、高级工程师, 主要研究方向为卫星移动通信技术、微波遥感技术、智能城市规划等。