



专题：手机直连卫星通信

手机直连低轨卫星的应用场景及业务需求分析

刘悦¹, 田野¹, 赵冬¹, 李彦坤¹, 杨虎啸¹, 高然², 忻向军²

(1. 中国电信股份有限公司卫星应用技术研究院, 北京 100035;

2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 手机直连卫星是低轨 (low earth orbiting, LEO) 星座系统的重要应用方向之一。概述了手机直连卫星的主要技术路线、应用场景及业务类型; 分析了低轨星座的建设成本、承载能力、运营收入; 提出了我国手机直连卫星通信的主要应用应以广覆盖、海量连接为主, 而卫星大流量宽带上网应用存在商业闭环的风险; 最后探讨了结合应用需求的技术发展建议。

关键词: 手机直连卫星; 低轨星座系统; 低空经济; 非地面网络

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024098

Analysis on application scenarios and requirements for direct-to-handset LEO satellite

LIU Yue¹, TIAN Ye¹, ZHAO Dong¹, LI Yankun¹, YANG Huxiao¹, GAO Ran², XIN Xiangjun²

1. Satellite Communications Branch Beijing, China Telecom Co. Ltd., Beijing 100035, China

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: Direct-to-handset satellite service is one of the important applications for low earth orbiting (LEO) satellite constellation systems. The overview on the main technology routes, application scenarios, and business types of satellite communication service for direct-to-handset was provided. The construction cost, capacity and operating income of LEO satellite constellation system were analyzed. The main applications of direct-to-handset satellite in China should focus on wide coverage and massive connections. Furthermore, there was a risk of commercial closed-loop in high traffic and broadband satellite applications. Finally, the technology trend was discussed associated with application requirements.

Key words: direct-to-handset satellite, low earth orbiting satellite constellation system, low-altitude economy, non-terrestrial network

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目“6G 卫星通信接入组网技术”(No.2020YFB1808000)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China “6G Satellite Communication Access Networking Technology” (No.2020YFB1808000)

0 引言

近年来,随着卫星互联网技术突飞猛进的发展,在通信基础设施不完善的欧美、非洲、南美等地区,基于Ka、Ku高频段的低轨星座系统面向用户提供宽带上网的服务得到了快速拓展,至2024年3月,美国Starlink低轨星座累积发射规模达到6 153颗,其中在轨服务卫星数量为4 855颗,用户规模突破260万,初步实现了年度营收平衡。

2023年9月,中国电信基于高轨移动通信卫星的S波段,联合华为公司发布的手机直连卫星双向语音通信的运营级产品,签约用户规模在短时间内突破百万。随后,Space X宣布将基于地面通信运营商的1.9 GHz低频段用于开展手机直连低轨星座试验,并于2024年1月发射了基于V2 Mini (Bus F9-3)版本的6颗试验卫星。Starlink手机直连试验卫星在轨道高度爬升期间,初步实现了手机直连低轨卫星发送推文、图片及17 Mbit/s速率的单星能力。自此,手机直连卫星彻底引爆了业界热潮,学术界、运营商、产业链等各方进一步加强了在手机直连卫星赛道的技术和资源投入,纷纷制定计划发射试验系统、开展上星试验。

结合我国对低空经济、新能源汽车等行业的战略规划及其快速发展,卫星通信行业对于船载、车载、机载终端直连低轨卫星实现语音、物联网、宽带上网等能力,进而渗透千行百业的设计逐步浮出水面,对低轨星座替代地面移动网络通信能力的期盼出现了过热趋势^[1-4]。

作为低轨星座系统的重要应用方向之一,手机直连卫星能否兼顾大带宽、海量连接两大应用需求仍存在不确定和业界观点难以统一的问题。该问题应结合卫星通信系统的主要应用场景、建设成本、通信资费的大众承受度、通信承载能力、业务感知等多维因素综合考量。

1 手机直连卫星的技术路线

根据《电信业务分类目录(2015版)》^[5]的规定,卫星通信业务分为卫星移动通信业务和卫星固定通信业务。手机直连卫星是传统卫星移动通信业务下的创新应用,与传统的卫星移动通信应用相比,手机直连卫星应用的用户群体从行业用户扩展到了公众用户。而当前手机直连卫星成为行业焦点的原因之一是切实将卫星通信的用户群瞄准了公众消费者。因此,手机直连卫星聚焦的是面向公众消费者使用的智能手机直接与移动通信卫星连接获取通信服务的应用形式。广义来说,手机直连卫星不仅限于智能手机终端,其他终端如物联网终端等也可以与卫星进行通信,构成更大的通信网络。当前卫星通信行业将手机直连卫星的研发方向分为定制手机直连、存量手机直连、5G非地面网络(non-terrestrial network, NTN)手机直连3种技术路线。

1.1 定制手机直连路线

定制手机直连卫星一般由卫星运营商、手机厂商、芯片厂商、卫星地面段等共同合作研发,共享国际公认的低于3 GHz的L段或S段卫星移动通信频谱,定制双模手机实现手机直连卫星服务。例如:华为Mate50(4G+北斗短消息)、Mate60 Pro(5G+天通语音+短信),苹果iPhone14(5G+Globalstar短消息)等系列终端均基于该路线,提供语音、短信和短报文服务,我国的研究进展暂时领先业界。

定制手机直连路线方案中,终端侧必须支持卫星移动通信技术体制,因此需要在普通智能终端的硬件中额外加载所需定制的模块,同时解决天线适配、系统小型化等问题,以便支持通过卫星网络接入的语音、短信等业务^[6]。另外,支持卫星专用体制的定制终端在卫星网络和地面移动网络两种模式间的对接和转换也是需要解决的问题。



1.2 存量手机直连路线

存量手机的直连卫星技术目前由国外新兴低轨卫星公司主导，通过与地面移动通信运营商合作，共享地面蜂窝网络低于3 GHz的低频段频谱资源，基于先进的卫星相控阵天线技术降低手机天线收发灵敏度，以低轨卫星转发地面蜂窝网信号（或基站上卫星），在信关站或卫星侧实现多普勒效应的预消除等技术，从而支持存量手机直连卫星。美国Space X、AST等公司在该路线上正推进相关试验，宣称具备发送推文、图片和宽带上网的能力，并预计2025年实现商用。

存量手机直连卫星路线落地的关键是存量体制适配卫星（特别是低轨卫星星座快速变化的场景）需要依赖卫星天馈系统及网络侧增强来解决。卫星平台的设计制造水平、大规模相控阵天线的制造能力、火箭运载规模卫星发射能力等因素都是制约存量手机路线推广的关键。

1.3 5G NTN手机直连路线

5G NTN技术是3GPP国际标准组织主导，全球移动通信设备商、运营商、芯片商、终端厂商、卫星运营商等共同参与制定的非地面网技术体制。业界认为，该技术是实现星地一张网、手机直连卫星服务的重要路径，具备与地面移动通信网产业打通，实现业务规模拓展的巨大潜力^[7-8]。

由于5G NTN源自5G新空口（new radio, NR）的整体技术架构，因此可支持实现星地融合的天地一体化设计，为5G NR与5G NTN联合服务提供了基础。例如，在海洋通信应用方面，5G NR可覆盖港口及部分近海区域，而5G NTN可在中/远海区域或者地面网络覆盖有欠缺的船基/岸基区域提供弥补服务^[9]。又如，具备5G NTN能力的车联网用户可以根据用户场景和需求选择接入地面5G NR网络或者5G NTN，并且可以根据网络情况和用户场景在地面5G NR网络和5G NTN中直接切换。

5G NTN又分为窄带IoT NTN和宽带NR NTN。近两年，国内外基于IoT NTN技术的芯片（联发科MT6825、展锐V8821）、终端模组（移远CC950U-LS）、网络设备（中兴、中信科）等产业取得了一定进展，初步完成了功能性星地贯通测试。

应用中以Skylo为代表的卫星运营商已基于联发科的IoT NTN芯片提供服务，使得智能手机和物联网制造商能够开发使用卫星连接的传感器和可穿戴设备。2023年年底，铱星基于IoT NTN推出了“星尘计划”提供地面窄带物联网及智能手机的语音、短信服务。以EchoStar、Viasat-Inmarsat为代表的卫星公司均有意复用现有高轨卫星支持IoT NTN服务，预计2029年前基于低轨卫星系统的IoT NTN有望落地。面向手机直连的宽带NR NTN服务，预计会在2026年后逐步推进。

2 手机直连卫星的应用需求

手机直连卫星主要涉及手机、车载、船载、机载等通信终端的直连卫星通信能力，面向无地面移动通信网络覆盖的消费级用户和行业用户，提供语音、短信、宽带上网等通信服务。由于中美移动通信网基础设施的完善程度和人群覆盖率的差异，手机直连卫星通信在中美两国的主要应用场景、定位和业务需求存在极大的差异。

当低轨卫星采用小于3 GHz的低频段时，优化后的卫星天线可以小型化到适宜集成进入手机，支撑低轨星座提供手机直连卫星服务。而当低轨卫星采用Ku、Ka等高频段时，由于卫星信号的功率谱密度太低，必须采用较大尺寸的锅型、板状、相控阵天线用于终端侧信号收发，比较适合行业级应用，以行业终端直连卫星模式为主^[10-11]。

2.1 中美基础通信设施对比

中美光纤及通信基站的部署规模见表1，中

国家的光纤入户率超过93%，而美国仅25%，中国的通信基站站址数是美国的5倍、5G基站规模是美国的30倍，在地面通信基础设施上，中国绝大部分用户已实现全面覆盖，而美国则相差甚远。

表1 中美光纤及通信基站的部署规模

对比	家庭光纤入户率 (至2022年)	移动通信基站站址数 (至2022年)	5G基站数 (至2023年)
中国	93%	300万	293万
美国	25%	60万	10万

2023年工业和信息化部统计数据显示，在中国，城市、乡镇、行政村已100%实现光纤入户或移动通信网络覆盖，因生活或日常活动区域缺乏地面通信基础设施而无法接入网络的用户比例小于2%。与之相对，根据国外相关报道，美国约有2 000万人无法接入网络，接近其人口比例的10%，同时约有1/3的美国农户尚未通宽带。

因此，在中国，手机直连卫星通信主要应发挥应急处理突发事件的作用，定位于地面通信网的补充覆盖；在欧美，手机直连卫星通信主要面向缺乏基础通信设施区域的用户群体，发挥基础通信服务承载的作用，定位于基础通信网的重要组成部分^[12]。

2.2 中美手机直连卫星业务对比

由于应用场景不同，中国与欧美用户在手机直连卫星通信上愿付出的成本、选取的业务类型、使用频次等也存在极大差异。

在中国，使用卫星通信或卫星宽带上网基本限于应急救援、大众救援、野外施工、林野旅游、海洋作业等特殊场景，大部分通信需求或成本可接受的通信服务还是以通信接通为主，即资费较低的语音、短数据、物联类应用；在美国，通过卫星网络使用语音、宽带上网等服务则是部分人口的通信刚需。

鉴于中美两国民众对手机直连卫星业务需

求类型的差异，2023年9月，中国电信发布的手机直连卫星语音服务仅收取10元的月功能费、且能自由订阅和退订，通过低价策略以培养用户习惯；同时，Starlink对在欧美发展的卫星宽带上网用户（未手机直连）收取150~250美元的月功能费，该价格仍能被大量民众接受。

由于卫星服务设计贴合用户需求，自2023年9月至2024年3月，中国电信新发展的手机直连卫星语音用户已过百万，Starlink新增卫星宽带上网用户已超过50万。

2.3 手机直连卫星与地面网的资费比较

2.3.1 应急语音、短信类卫星通信资费

应急语音、短信类手机直连卫星通信服务能为民众所接受的资费价格或成本约为10~30元/月。

在国内，2023年9月中国电信推出的手机直连卫星产品，主要面向及使用集成卫星语音、短信等能力的大众消费类终端用户，按当时的产品资费，签约用户在卫星通信服务的每用户平均收入（average revenue per user, ARPU）增值约为10元/（月·户）。

在国外，自2022年至2023年，美国苹果公司通过在iPhone终端上集成Globalstar的低轨星座短报文能力，为iPhone14用户免费提供两年SOS应急救援卫星短报文通信能力。根据业界相关报道，苹果公司为此已累计向Globalstar支付52.52亿美元，iPhone14在2023年的全球销售量为4 500万部，换算后iPhone14提供的手机直连卫星短报文服务的成本为30元/（月·户）。

2.3.2 国外地面与卫星宽带上网资费

美国高低轨、地面通信网运营商上网资费一览见表2，整理的国信证券调研数据显示，国外传统高轨卫星宽带上网的资费为每月50~100美元，国外地面移动通信网运营商的资费为每月25~35美元，而Starlink面向消费级用户的低轨星座宽带上网资费约为每月150美元、



表2 美国高低轨、地面通信网运营商上网资费一览

流量套餐		价格（美元/月）	设备费用	速率	时延/ms
Starlink residential	无限量	120	599 美元	25~220 Mbit/s	25~50
Starlink business	无限量	250	2 500 美元	100~220 Mbit/s	25~50
Starlink roam	无限量	150	599 美元	5~220 Mbit/s	25~50
Starlink mobility	无限量	250	2 500 美元	100~220 Mbit/s	25~50
Viasat 25 Mbit/s	60 GB	50	10 美元/月	25 Mbit/s, 超出套餐后 1~5 Mbit/s	672
Viasat 30 Mbit/s	100 GB	70	10 美元/月	30 Mbit/s, 超出套餐后 1~5 Mbit/s	672
Viasat 40 Mbit/s	150 GB	100	10 美元/月	40 Mbit/s, 超出套餐后 1~5 Mbit/s	672
Viasat 50 Mbit/s	300~500 GB	150~200	10 美元/月	50 Mbit/s, 超出套餐后 1~5 Mbit/s	672
Verizon LTE	无限量	25~35	—	25~50 Mbit/s	Sub~100
T-Mobile LTE	无限量	30	—	25~50 Mbit/s	Sub~100
国内三大运营商 5G 通信中位套餐	100 GB+1 000 min 语音	<10	—	4~200 Mbit/s	20~100

商业/行业用户的资费约为每月 250 美元。考虑美国地面 5G 基站的部署有限，通过地面通信网可获得的上网速率相比 Starlink 无优势，故 Starlink 的资费在基础设施欠缺的区域尚有一定竞争力。

2.3.3 国内地面移动通信资费

在考虑业务质量（语音与短信主被叫随遇接通，数据上网大于 4 Mbit/s）相近的前提下，已被培养低价高质体验的国内消费者在选取卫星通信前会重点关注资费价格。2023 年中财报数据显示，中国移动、中国电信和中国联通三大运营商移动用户的每月平均 ARPU 值是 52 元、46 元和 44 元，3 家的单用户平均 ARPU 值为 50 元。该费用仅为 Starlink 消费者套餐的 6%，且国内三大运营商的宽带上网速率感知不弱于 Starlink 低轨星座，还提供单独的语音服务时长。

由上述分析可知，在国内，手机直连卫星产品，由于资费价格，更适合作为一种应急、野外、海洋等场景下的低价格增值服务，以补充地面网覆盖的不足。在“宁可备而不用、不可用时无备”的思想逐渐深入人心的背景下，手机直连卫星正快速成为手机、汽车等端侧产品的标配，但实际用户愿意支付的资费价格和预计业务使用率会远低于地面移动通信网的话务模式。

3 手机直连低轨卫星的星座建设成本及运营分析

按业务类型分，大带宽和海量连接是两类完全不同的能力要求，在手机直连低轨卫星系统同时面向两大业务场景提供服务时，要统筹考虑建设成本、承载能力和消费级的价格接受度，才能较清晰地分析未来手机直连卫星规模化的主要应用方向和业务类型。

3.1 手机直连低轨星座的建设成本分析

以低轨星座运营商的业界头部企业 Starlink 为例。Starlink 报送美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）的资料显示，其计划建设的手机直连低轨星座系统共有 2 016 颗卫星、轨道高度为 525 km，每个轨道 72 颗卫星、支持星间链，单星支持 256 波束、采用波束凝视模式、预计可连续覆盖约 50 万 km²，全部部署后可实现全球连续覆盖。

低轨星座的建设成本主要包括卫星研制、火箭发射两部分。国信证券相关研究报告显示，Starlink 不同版本卫星研制及发射成本见表 3，在采用最新技术以及星舰可回收重复发射 20 次的前提下，基于 V2 版本且规模量产后单星造价为 240 万美元的条件下，Starlink 要部署由 2 000 颗卫星组成的手机直连低轨星座，保守估计，其总成

表3 Satrlink不同版本卫星研制及发射成本

型号	V1.0	V2 mini (Bus F9-2)	V2 mini (Bus F9-3)	V2 (Starship-2)
状态	已规模发射	已发射	与 F9-2 拼车发射	待正式发射
质量/kg	260	800	970	2 000
单星规格/ (长×宽, m)	4.0×1.7	4.0×2.7	7.2×2.7	10.1×2.7
发射能力/ (颗/发射)	60 (猎鹰9)	23 (猎鹰9)	18 (猎鹰9, 预估)	50 (星舰)
卫星成本/次/万美元	3 000	3 500	4 320	12 000
火箭+发射成本/次/万美元	3 000	3 000	3 000	3 000
2 000 颗卫星发射总次数/次	33	86	111	40
2 000 颗卫星部署总成本/亿美元	20	56	81	60

本不低于60亿美元（接近500亿元）。

相关报告分析，基于星舰单次发射的燃料成本约200万美元，火箭成本约5亿美元。若火箭按可回收重复发射20次计算，则星舰单次发射成本约为3 000万美元，按50颗手机直连低轨卫星平摊（V2 Bus Starship-2版本），则发射单价为300美元/kg。该成本仅为目前国内民营航天发射单价（2万元/kg）的1/10~1/9。

若由国内企业建设手机直连低轨星座，假设按单星成本5 000万元估算（卫星研制加发射），则国内建设上述卫星系统预计约需1 000亿元。

3.2 手机直连低轨星座的营收需求分析

低轨卫星的有效运转时间为5~7年，按7年迭代更新周期计算，基于2 000颗卫星的建设成本，则Starlink的手机直连低轨星座每月约需6亿元的营收额才能实现投入和产出平衡。如果以国内当前部署低轨星座的技术能力和成本估算，则国内同等规模的低轨星座系统每月约需12亿元的营收额才能达到投入和产出平衡。

考虑到近年来国际形势日趋严峻、美国正对中国进行各领域的围堵和断链，短期内我国手机直连低轨星座基本以国内用户为主。基于我国消费者使用通信服务的习惯及价格敏感性考虑，假设手机直连卫星的单用户ARPU值与国内地面网运营商一致，即50元/月，则在国内至少需发展2 400万用户才能初步达到营收平衡，且这类用户需要享有不低于地面通信网的日常通信服务能

力和业务感知。

3.3 手机直连低轨星座的用户感知分析

按业界最新的低轨星座承载能力，第3.2节推算的2 400万国内用户难以享有与地面移动通信网相同水平的服务能力和质量。

首先，低轨卫星在地球上空处于高速移动状态，如在距地500 km高度的地球低轨道区间，围绕地球转动一周大约需要94 min，按中国陆地面积占地球表面积约2%的比例测算，2 000颗低轨卫星组成的星座在同一时间处于中国陆地上空的卫星仅有40余颗，由此每颗中国陆地上空的卫星平均需承载60万用户的日常通信需求。根据地面通信网的话务模型经验，按话务忙时50%用户激活率的保守估计，话务忙时每颗卫星需要承载30万用户的通信需求，假设每用户在忙时仅使用20 min卫星通信服务，则忙时单星需支持10万用户的并发能力。如单星上配置的手机直连低频带宽达2×100 MHz，综合2024年3月Starlink基于2×10 MHz系统带宽测得17 Mbit/s手机直连通信速率峰值与地面通信网平均1.7 bit/Hz的经验频谱效率估算，如手机直连低轨卫星具备32个波束同时工作的能力，按照波束频段四色复用规避自干扰的设计，单用户平均通信速率仅为13.6 kbit/s，仅为地面移动网第二代通信系统的能力，即以语音、短信业务为主。

理想情况下，假如部署的手机直连低轨星座能达到6万颗的巨型规模，且卫星可用低频带宽



为2×100 MHz，当在中国区发展2 400万用户时，中国区单用户的通信速率仅为400 kbit/s，尚不足地面移动网第四代通信系统服务能力的1/5。

另外，部署上述低轨巨型星座的代价高昂。一是星座的建设投入预计高达2万~3万亿元；二是星座需占用国内地面三大移动通信运营商在Band3或Band1频段的整个频率，基于该频段服务地面通信产业链上下游的电子产业、通信产业相关企业将受到巨大冲击，涉及每年为国家贡献数万亿GDP的产业群；三是由于卫星部署需考虑星间安全距离等因素，低频频率资源用于低轨卫星的使用效率远不及地面移动通信基站^[13]。

当前国内三大运营商为用户提供的通信服务主要基于4G和5G移动通信系统，能为每个用户提供4 Mbit/s以上速率的通信承载能力。由此可见，低轨星座为用户提供日常通信服务时的规模化承载能力远不及地面移动通信网，在同等资费条件下，国内用户基本不会选取手机直连卫星通信作为自身的主要通信手段^[14]。

3.4 面向低空经济的直连卫星承载能力分析

即使面向行业用户，也存在小规模低轨星座容量不足以承载规模化行业需求、巨型低轨星座代价太高的情况^[15]。本节以低空飞行器的通信传输需求为例进行说明。

3.4.1 低空经济的产业领域

低空一般指从100 m到6 000 m之间的空域。低空飞行器类型如图1所示，低空航空器类型一般分为载人飞行器、物流无人机、行业无人机和消费级无人机，其应用场景包括载人交通、安全巡检、农林保值、地理测绘、安防监控、快递物流和应急等。

低空经济作为新质生产力的代表，成为各方看好的新赛道。低空经济是以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的低空飞行活动（低空飞行产品/服务）为牵引，带动相关领域融合发展的综合性经济形态。涵盖农业、工业、服务业等，贯通制造、飞行、保障、服务等领域，具有“多领域、跨行业、全链条”的特点^[16-17]。

云图智行披露的信息显示，2023年全国低空经济市场规模约为2.5万亿元。《国家立体交通网络规划纲要》中明确，至2035年，国内支撑经济发展的商用和工业级飞行器预期达到2 600万架，无人机驾驶员需求也将增长到63万名。

3.4.2 低空经济的通信需求分析

借助地面移动通信网和卫星通信网的通信管道，低空运管服系统可实现对低空航空器的全程监管^[18]。根据调查，各类低空应用场景的通信需求见表4。



注：根据公开新闻及其引用的罗兰贝格材料汇总

图1 低空飞行器类型

表4 各类低空应用场景的通信需求

场景	上行通信速率/ (Mbit·s ⁻¹)	下行通信速率/ (kbit·s ⁻¹)	上行图传 时延/ms	控制 时延/ms
低空物流	0.2	600	200	10
航拍娱乐	15~60	600	200	10
城市管理	30	600	200	10
高空巡视	15	600	200	10
植保测绘	30	600	200	10
未来交通	30	600	200	10

以使用频次最高的低空物流和未来交通为例，基于我国政府预测的2035年2 600万的商用和工业级飞行器规模，假如其中90%用于物流、10%用于未来交通，则测算得出的上行通信速率总计约需82.68 Tbit/s、下行约需15.6 Tbit/s。

根据Starlink发布的信息，其V2版卫星在采用Ka、Ku频段提供宽带上网服务时，单星通信速率最高预计可达170 Gbit/s，中国区至少需要约500颗低轨卫星才能满足2035年中国区低空飞行器群的实时通信需求，推测该低轨星座的整体规模预计达2万颗卫星，建设成本约需1万亿元。考虑低轨卫星生命周期为7年，最终计算出单架飞行器需支付的通信资费约为3 200元/月。在国内现有的用户习惯和地面网通信资费状况下，低空飞行器用户对上述通信费用基本不可接受。即使可通过海外发展部分用户承担星座建设成本，但代价仍然太高。

3.5 面向低速海量连接的手机直连服务能力分析

前面各节主要基于用户日常通信中的语音、宽带上网等综合需求，采取“尽力而为”模式来评估手机直连低轨星座的成本、效益和用户感知。假设将手机直连低轨卫星的业务类型限定于语音（2.4 kbit/s）和低速数据（<50 kbit/s）为主

的应急和非消费级的日常通信需求，则随着话务模型的变化，直连卫星通信服务的资费可以更低、可发展用户规模呈数十倍增加、单用户使用卫星服务时的感知大幅提升。

以国内部署2 000颗卫星的手机直连低轨星座为例，预计投资1 000亿元。面向应急场景模式下的营收分析见表5，采用应急通信模式时，卫星通信以增值业务方式签约，单用户的ARPU值降低为5元、通信速率提升至50 kbit/s级别，语音、图文和小视频业务可顺利承载，国内可发展的用户规模能扩展到3亿，单月营收可增长到15亿元。该模式在提升用户感知的同时，也易于实现低轨星座的成本收回。

面向应急场景时，手机直连低轨星座主要提供的是语音、物联、中低速数据业务，通过限定用户使用次数、时长或流量，提供海量连接能力，将低轨星座资源发挥到极致。

采用类似思路，面向低空经济的终端直连低轨星座如果以提供海量连接、保持连接不中断为主要目标，抛弃对宽带回传的过高要求时，低轨星座的总体规模和建设成本将大幅下降，更容易形成营收平衡，潜在可发展的用户规模也将大幅提升。假设2035年低空飞行器规模增至2 600万台，采取海量连接的业务模式、单用户卫星通信速率限定不高于100 kbit/s，卫星通道常在线且仅传送飞行器姿态、状态、位置、控制指令等低速数据时，低轨星座的规模将大幅降低到800颗，单用户资费下降到128元/（月·户），更易被低空行业接受。面向低空的卫星通信模式、成本和资费对比见表6。

表5 面向应急场景模式下的营收分析

业务特性	单用户资费/ (元·月 ⁻¹)	用户规模/户	忙时用户 激活率	忙时单用户 通信时长/min	单星需支撑并发 通信用户数/户	单用户可获通信 速率/(kbit·s ⁻¹)	营收情况/ (亿元·月 ⁻¹)
日常通信模式	50	2 400万	50%	20	10.0万	13.6	12
应急通信模式	5	3亿	10%	2	2.5万	54.0	15



表6 面向低空的卫星通信模式、成本和资费对比

业务特征	上/下行典型带宽	比例	状态	上/下行总带宽/ (Tbit·s ⁻¹)	所需卫星数量/颗 (基于 Starlink V2 卫星容量)	低轨星座 总规模/颗	星座总 建设成本	盈亏平衡的 用户资费/ (元·(月·户) ⁻¹)
尽力而为-物流	30 Mbit/s 600 kbit/s	90%	永远在线	4.68/14.00	486	24 000	1 万亿元	3 200
尽力而为-交通	200 kbit/s 600 kbit/s	10%	永远在线	78.00/1.56				
海量连接	100 kbit/s 100 kbit/s	100%	永远在线	2.60/2.60	16	800	400 亿元	128

4 结束语

在中国，卫星通信服务应更多面向应急、防灾、救援等特定场景或大众消费者的特定时刻，作为语音、低速数据等通信保底手段的形式存在。如果期望手机直连低轨星座系统作为面向大众消费者、行业普及化、日常化的通信手段，其建设成本、营收压力和地面通信网相关产业都将面临不可测的影响和巨大冲击。

根据本文分析，建议业界后续聚焦广覆盖下的应急处突、海量连接、中低速数据速率等卫星通信主要业务类型和应用场景，对手机直连低轨星座的技术体制进行相应优化和关键技术攻关，基于天地一体化，共同推进我国低轨星座系统的健康发展和技术演进。

参考文献：

- [1] 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]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] 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.
- [3] 沈俊, 高卫斌, 张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019, 35(5): 113-119.
SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5): 113-119.
- [4] 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, 36(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.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 电信业务分类目录(2015版). 2019.
MIIT. Classified catalogue of telecom services (2015 Version). 2019.
- [6] 王文哲, 安岗, 李忻, 等. 面向空地一体化场景的5G卫星双模终端需求及应用探讨[J]. 电信科学, 2022, 38(Z1): 221-230.
WANG W Z, AN G, LI X, et al. Discussion of 5G satellite dual-mode terminal requirement and application in the integration communication scenario of satellite and UTRAN[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(Z1): 221-230.
- [7] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术研究及演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [8] 孙建成, 孙嘉颖, 缪德山, 等. 5G NTN 网络架构标准化演进思考[J]. 电信科学, 2023, 39(9): 76-86.
SUN J C, SUN J Y, MIAO D S, et al. Thoughts on the standardization evolution of 5G NTN network architecture[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(9): 76-86.
- [9] 瞿逢重, 来杭亮, 刘建章, 等. 海洋物联网关键技术研究与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 25-33.
QU F Z, LAI H L, LIU J Z, et al. Research and application on key techniques of marine IoT[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 25-33.
- [10] QU Z C, ZHANG G X, CAO H T, et al. LEO satellite constellation for Internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5: 18391-18401.
- [11] WANG R B, KISHK M A, ALOUINI M S. Evaluating the accuracy of stochastic geometry based models for LEO satellite networks analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(10): 2440-2444.

- [12] 纪凡策. 2020年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2021(2): 36-41.

Ji F C. Summary of the development of foreign communication satellites in 2020[J]. Space International, 2021(2): 36-41.

- [13] 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.

- [14] 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.

- [15] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. LEO-satellite-assisted UAV: joint trajectory and data collection for Internet of remote things in 6G aerial access networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 9814-9826.

- [16] 何耀宇, 张超. 面向无人机应用的低轨卫星通信技术适航分析[J]. 电信科学, 2023, 39(6): 96-104.

HE Y Y, ZHANG C. Airworthiness analysis of low earth orbit satellite communication technology for UAV application[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(6): 96-104.

- [17] 张勃, 冯毅, 马丹, 等. 5G低空网络解决方案和运营应用[J]. 电信科学, 2020, 36(1): 28-33.

ZHANG Q, FENG Y, MA D, et al. 5G low altitude network service and operation solutions[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(1): 28-33.

- [18] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 1-9.

LIU C X, MA R, PENG M G. UAV-enabled integrated sensing and communication: architecture, techniques, and future vision[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 1-9.

[作者简介]



刘悦 (1975-), 男, 中国电信股份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4G/5G地面移动通信体制、天地一体组网、卫星终端芯片研发、高轨卫星系统工程。



田野 (1985-), 男, 博士, 中国电信股份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。



赵冬 (1981-), 女, 中国电信股份有限公司卫星应用技术研究院前沿研究部团队负责人, 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。



李彦坤 (1982-), 女, 中国电信股份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、星地融合组网技术与标准化。



杨虎啸 (1991-), 男, 中国电信股份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、卫星通信技术等。



高然 (1984-), 男, 北京理工大学教授、博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者, 主要研究方向为光通信与卫星通信等。



忻向军 (1969-), 男, 北京理工大学信息与电子学院执行院长、教授、博士生导师, 国家杰出青年科学基金获得者, 国家863计划首席专家, 主要研究方向为光通信与卫星通信等。