

低轨卫星异网漫游通信网络架构及关键技术研究

王 琪, 李 萌, 薛元星, 赵 治, 陈川涛, 李 铎, 黄 锐

(中国星网网络应用研究院有限公司, 北京 100160)

摘要: 低轨卫星网络与地面网络的深度融合, 将共同支撑6G“终端泛在接入”的愿景。通过异网漫游方式实现星地协同组网, 有助于降低建网成本、扩展覆盖范围并提升通信服务能力。围绕典型应用场景, 提出拜访地运营商在归属地所在国家或地区应遵循的监管框架, 并在此基础上系统分析低轨卫星异网漫游组网架构, 涵盖接入网、承载网与核心网等多个层面的潜在实现方案。针对低轨卫星动态拓扑与远距离传输带来的挑战, 梳理并总结了漫游终端定时同步、抗频偏、链路切换等关键技术; 同时, 针对拜访地难以有效管控漫游终端数量、资源占用及服务质量保障等问题, 提出了基于拜访地核心网的二次业务管控机制与波束服务区域管理等解决方法, 为后续系统实现与商用部署提供参考。

关键词: 低轨卫星; 异网漫游; 组网架构; 资源管理

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025081

Research on the architecture and key technologies of low earth orbit satellite heterogeneous roaming communication network

Wang Qi, Li Meng, Xue Yuanxing, Zhao Zhi, Chen Chuantao, Li Duo, Huang Rui

China Star Network Application Research Institute Co., Ltd., Beijing 100160, China

Abstract: The deep integration of low earth orbit satellite networks and ground networks would jointly support the vision of 6G “ubiquitous terminal access”. Implementing satellite ground collaborative networking through cross network roaming could help reduce network construction costs, expand coverage, and enhance communication service capabilities. Focused on typical application scenarios, the regulatory framework that visiting network operators should follow in their home country or region was proposed. Based on this, a systematic analysis was conducted on the network architecture of low earth orbit satellites roaming in different networks, covering potential implementation solutions at multiple levels such as access networks, bearer networks, and core networks. In response to the challenges posed by the dynamic topology and long-distance transmission of low earth orbit satellites, the key technologies such as roaming terminal timing synchronization, frequency offset resistance, and link switching were summarized. At the same time, in response to the difficulty of effectively controlling the number of incoming terminals roaming, resource occupation, and service quality assurance in the visited area, solutions have been proposed, including a secondary business control mechanism based on the visited area core network and beam service area management, providing reference for subsequent system implementation and commercial deployment.

Key words: low earth orbit satellite, roaming across different network, networking architecture, resource management

0 引言

近年来, 得益于低轨卫星展现出的高带宽、低时延技术特性, 全球各国、各地区加快了低轨卫星轨道及频率抢占速度。低轨卫星与地面网络相互配合、发挥各自

优势, 共同满足下一代6G无线通信网络“泛在覆盖, 深度智联”的愿景^[1]。低轨卫星网络与地面网络组网一体化发展共分为3个阶段: ①基于低轨卫星中继回传的星地组网; ②以双网双待终端驱动的技术体制融合; ③接入网、承载网、核心网系统性共享融合^[2]。低轨星座与地面

网络异网漫游处于第3阶段,是既节约网络建设成本,又扩大区域网络覆盖范围与保障服务质量的重要组网方式。与此同时,低轨卫星制造发射成本正在迅速下降,星链一代卫星单星制造成本约为700万元,二代成本有望降低至500万元以下^[3];SpaceX猎鹰系列发射成本约为1.8万元/kg,若采用下一代StarShip系统,预计成本将大幅降至约6700元/kg。可以预见,未来大规模低轨卫星部署将成为必然,天基网络基础设施将进一步支撑地面网络区域补盲和体制升级。

标准制定和政策先行给予了低轨组网异网漫游技术前瞻性指导。标准化方面,第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)在R15版本引入非地面网络(non terrestrial network, NTN)概念,提出卫星接入对5G网络的需求、场景用例、系统架构、空口设计等内容^[4-6],并在R16~R19版本逐步演进至用户面上星场景、架构及功能增强。异网漫游标准化方面,3GPP R16定义了两种5G漫游架构,包括拜访地路由(local breakout, LBO)和归属地路由(home routed, HR),以及两种架构下归属地和拜访地之间的业务流程;后续版本考虑到计费对账需求,增加了计费标识(charging ID)等相应字段^[7]。政策方面,中华人民共和国工业和信息化部发布《关于促进网络开放共享 推动5G异网漫游的实施意见》,倡导积极推进5G接入网共享和核心网漫游,进一步拓展5G网络共建共享的深度和广度,形成热点地区多网并存、边远地区一网托底的网络格局。

全球主流卫星运营商在低轨卫星异网漫游领域已进入技术验证和初步商用落地阶段。在欧洲地区主导的项目中,美国AST SpaceMobile与沃达丰合作成立欧洲合资企业SatCo,使用45~60颗“蓝鸟”低轨星座为欧洲提供商用级卫星网络服务,支持存量智能手机直连卫星,不需要额外硬件或软件升级。该方案以“蓝鸟”低轨卫星作为接入网,由欧洲地区的沃达丰负责搭建地面基础设施,提供核心网网元,通过申请L频段或收购的方式获得频谱使用权,提供完全自主的卫星回传能力。2025年1月,沃达丰已在美国无地面信号区域使用美国联邦通信委员会(federal communications commission, FCC)授权的Band 14频谱进行试验,通过蓝鸟实验星成功完成首次低轨卫星通话验证,经过规模化验证后推广至欧洲。在北美地区主导的项目中,SpaceX星链和T-Mobile、KDDI、One NZ等地面运营商建立合作,利用661颗卫星作为太空基站,使用经国际电信联盟(international telecommunication union, ITU)批准的可覆盖区域

地面网络频段^[8],面向苹果、谷歌等多家厂商的存量终端提供短消息业务,用户使用归属运营商SIM卡,在无地面网络的情况下,切换至卫星连接即可使用该业务。以新西兰One NZ为例,用户需采用特定的终端和套餐,在新西兰国土范围内,不需要安装软件,当手机终端出现One NZ SpaceX标志时,即可连接星链低轨卫星。截至2025年8月,One NZ应用Starlink卫星发送的短信已超过200万条。全球星(GlobalStar)与美国苹果公司,联合北美、亚太、非洲等全球范围内几十家运营商,使用当地许可频率,在没有蜂窝网络区域,使用iPhone 14及以上机型发送紧急短信、共享位置、查询并联系道路救援提供者。当终端使用卫星功能时,终端状态栏显示SAT标志(SAT是iPhone终端上的标志,当出现该标志时,可以使用卫星低轨网络),在空旷无显著遮挡环境中,可在30~60 s内发送出文本消息。

综上,低轨组网异网漫游业务正在从标准概念、应用试验走向产业化落地,可满足用户一卡接入、多网通用的需要,用户不需要换卡换号,就可以解决在签约运营商无网络覆盖场景下无法通信的问题。本文首先提出监管框架;其次介绍低轨卫星与地面网络异网漫游的组网架构,从接入网、承载网、核心网3个方面分析潜在方案,为后续更多组网方式提供可能;之后探究卫星通信与异网漫游结合的技术难题,尤其是在低轨卫星快速移动带来的建链、切换和双方核心网配合方面,梳理克服难题的关键技术,为异网漫游业务运营提供网络实现基础。

1 漫游组网监管框架

在全球范围内开展低轨卫星异网漫游组网,采用的技术架构须遵循目标国家或地区的监管政策。多数国家或地区针对频率使用审批、地面站设备管理,以及国际信道数据传输等方面均设置监管要求。因此,在网络架构落地前,拜访地运营商必须取得当地的项目核准与市场准入许可。

频率监管及地面站使用方面,ITU发布的《无线电规则》是各国开展频率申报与协调工作的基础性条约。开展异网漫游业务之前,拜访地运营商需依据该规则完成频率在国际范围内的协调与备案,并在拜访地国家或地区获取本地频率使用授权,未经许可不能使用无线电频率和设置地面站。伊朗无线电主管部门曾向ITU提出,星链卫星系统从2022年起在其境内非法部署地球站并提供服务,该部门出具测试报告作为证据,要求其依照规

则停止操作^[9]。目前ITU已强烈敦促星链业务相关主管部门遵守规定并立即采取行动,在伊朗领土等未经授权操作的国家和地区全面禁用其终端、终止服务,并设立专项议题研究管理措施和可实施性方案。此案例提示,在跨国开展通信服务时,应提前完成频率申报或达成合作协议,在市场准入许可下部署地面站,以规避国际规则上的争议。

在信道与数据传输监管方面,所有用户面数据及控制面信令均须接受落地国家或地区相关部门的监督。以我国为例,按照信息产业部(现已改为“工业和信息化部”)颁布的《国际通信出入口局管理办法》,要求加强对国际通信传输信道的管理,不得利用国际通信传输信道从事非法活动。目前我国已经设立北京、上海、青岛、昆明等15个国际通信业务出入口局,所有跨境互联与数据交换均需经由这些指定节点传输,通过监管业务出入口局,维护国家网络安全,防止非法组织对互联网进行渗透和破坏。

2 低轨卫星异网漫游网络架构

低轨卫星异网漫游网络架构主要由接入网、承载网、核心网3个部分构成。卫星运营商作为拜访地运营商,地面运营商作为归属地运营商,由卫星运营商提供接入网服务,双方的核心网协同完成认证鉴权、漫游接入与业务接续等流程。

2.1 接入网架构

为达到漫游终端按需快速接入低轨卫星网络的目标,应在现有支持地面空口协议的基础上对卫星接入网空口协议进行增强,以适配归属地运营商漫游专用的公共陆地移动网络号(public land mobile network identity document, PLMN ID)选择、多普勒频偏、时偏等情况。在星地协同覆盖区域,将网络控制指令设为优先选择归属地运营商的地面PLMN ID;在卫星网络独立服务区域,选择归属地运营商漫游专用PLMN ID并开启卫星通信连接,通过增强后的接入网空口协议进行接入^[2]。用频方面,根据监管框架,使用该国家或地区合法频段,且与当地开展的业务互不干扰;终端方面,采用双模组或融合模组适配低轨卫星链路。

根据卫星处理能力,接入网可选架构包括透明转发、部分再生处理、全部再生处理3种,考虑到低轨卫星动态拓扑变化和空中转发落地的通信特点,一般采用部分再生和全部再生两种架构^[10],部分再生处理模式架构如图1所示,全部再生处理模式架构如图2所示,F1、N9均为接口。

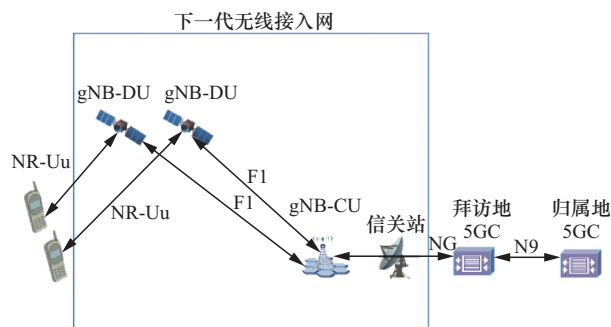


图1 部分再生处理模式架构

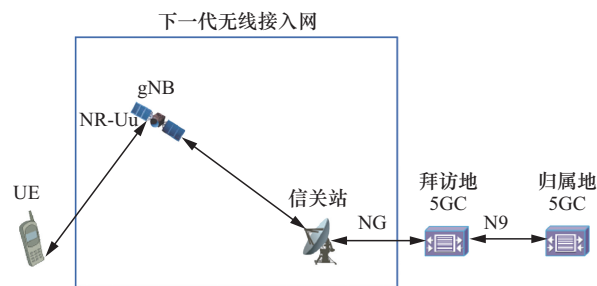


图2 全部再生处理模式架构

在部分再生处理模式架构下,星上需要承担部分下一代基站(next generation NodeB, gNB)功能。为了优化系统性能、提升功能部署的灵活性和可扩展性,3GPP给出星上分布式单元(gNB-distributed unit, gNB-DU)和地面集中式单元(gNB-central unit, gNB-CU)分离部署的接入网架构。星上分布式单元包括信号播发、射频组件、解调器和解码器,在物理层进行信号处理。星上分布式单元接收用户设备(user equipment, UE)上行信号之后,经过解调制、噪声隔离处理后转发至下一颗卫星,再根据馈电链路需要,重新编码调制、变频后发送至地面。终端和卫星之间的用户链路采用5G新空口空中接口(the new radio interface between UTRAN/E-UTRAN/NG-RAN and the user equipment, NR-Uu),卫星和地面站之间的馈电链路采用F1接口,一个gNB-CU可以控制多个gNB-DU。部分再生处理模式架构注重星上处理效率与灵活性,与透明转发架构相比,剔除上行信号噪声,极大提升信号质量,但技术复杂度、实现成本和功耗均高于透明转发架构,增加了毫秒级的处理时延。

在全部再生处理模式架构下,卫星作为一个功能完整的空中网络节点,需要承担全部基站功能,包括物理层的解调制、网络层协议解析、星上路由查找、分组交换、编码调制,能够实现端到端的协议栈处理。终端和卫星之间的用户链路仍采用NR-Uu,卫星和地面站之间的馈电链

路连接 5G 核心网 (5G core network, 5GC) 采用下一代 (next generation, NG) 接口, 此架构对直连卫星的漫游终端友好, 不需要改造适配, 初期部署速度快, 但对星上处理功率、热控设计、能源供应提出了挑战。

部分再生和全部再生处理接入网架构特点对比见表 1。调研显示, 美国 AST SpaceMobile 蓝鸟实验星采用部分再生处理模式架构, 星上部署信号播发、射频放大、解调、预编码功能, 无线资源控制等其余功能在地面实现, 星间链路传输预编码之后的数据流^[11]。美国 Lynk Global 与 SpaceX 采用全部再生处理模式架构, 实现漫游业务的快速部署。其中, Lynk Global 已经与全球 30 多个移动通信运营商签署商业合作协议, 并在 40 多个国家进行演示。SpaceX 为纳入合作伙伴的国家提供漫游服务, 存量终端依靠 4G 空口直连卫星网络, 数据包经过星间链路转发下传至卫星运营商核心网, 再通过 N2 接口传输至地面运营商核心网^[12]。

2.2 承载网架构

承载网主要由星基承载网和地面承载网组成。

星基承载网包括: 星载路由交换载荷与星间链路组成的星间承载网, 地面站与馈电链路组成的星地承载网。借鉴主流的软件定义网络 (software defined network, SDN) 思想, 地面集成天基网络控制器, 通过星地接口将路由信息分配至低轨卫星, 实现地面对承载网拓扑变化、路由选择。承载网架构示意如图 3 所示, 该架构分为控制面和转发面。天基网络控制器处于控制面, 依据星历信息、星间链路状态等参数完成星间路由集中计算; 地面站协议网关处于转发面, 用于数据包向不同端口分发。

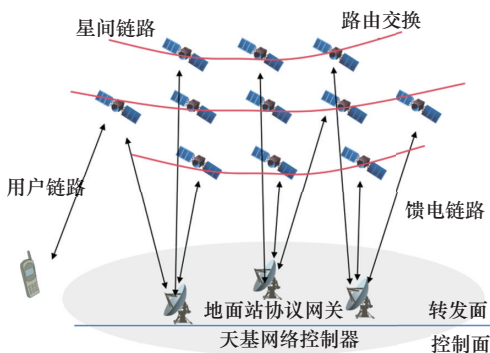


图 3 承载网架构示意

低轨卫星之间的星间链路可选择激光、微波、太赫兹作为载波, 星上基站适配接口将数据信号转化为载波信号, 经过路由选择、连续多跳到达有馈电载荷的星上地址。当低轨卫星“一对多”组网时, 同轨道面可使用激光和太赫兹链路与相邻多颗卫星建立稳定的星间链路; 不同轨道面的低轨卫星高速相对运动使激光链路难以对准, 因此多采用微波链路对接, 进一步提升星间传输的鲁棒性。

在路由算法上, 铱星和星链的做法是设置固定建链方式, 使用同轨道前后左右 4 颗卫星形成稳定的网状网格^[13], 这种路由方式对收发机性能要求低, 同时具有拓扑稳定的优点, 但是这种路由方式在未来巨型低轨星座中, 可能导致端到端的路由转发跳数增多, 引发额外的排队时延。为此, 文献[14-15]在一对四的路由方式基础上, 拓展至不同轨道路由方法, 通过在不同轨道相对运动的卫星之间引入网格间链路, 显著降低端到端的通信时延。与之类似, 文献[16]进一步考虑链路距离、链路建立时间、链路切换频率等约束条件, 以拓扑持续时间最小为目标, 完成“网格间链路”分配, 最终在拓扑动态性和网络时延性能间实现权衡。实际应用中, 在归属地的终端业务需求具有时空分布不均匀的特点, 通过动态调整星间建链, 使均匀分布的低轨卫星星座更好地服务于不均衡的地面流量需求, 从而进一步优化卫星网络传输性能。基于这种考虑, 文献[17]提出根据地面用户特征, 实现动态拓扑条件下的弹性联网, 减少网络路由跳数。

协议使用方面, 与地面网络相比, 星间链路传输速率低、误码率高, 如果直接使用地面成熟的网络层/传输层的传输控制协议/网际协议 (transmission control protocol/internet protocol, TCP/IP), 传输效率和可靠性不足。因此, 需要针对卫星通信特点进一步加强。目前, 星间承载网的潜在使用协议有 3 种^[18]: 增强的 TCP/IP、空间通信协议规范 (space communication protocol specification, SCPS) 和容迟网络 (disruption tolerant network, DTN) 协议。3 种协议栈架构示意如图 4 所示。前两者没有改变协议栈结构, 增强的 TCP 针对低轨卫星切换和端

表 1 部分再生和全部再生处理接入网架构特点对比

接入网架构	基站位置	星上处理能力	星上处理时延	关键优势	代表运营商	应用阶段
部分再生处理	gNB-DU 位于星上, gNB-CU 位于地面	解调解码、再生载波、频率转换、星上路由交换	时延较低	重点处理物理层功能, 分离部署能够平衡技术复杂度、成本和系统性能	AST SpaceMobile	实验阶段
全部再生处理	星上全部承载	解调解码, 协议解析, 星上路由交换、频率转换	时延高, 可通过优化路由降低总时延	实现网络层星上交换与本地卸载, 降低不必要的星地往返时延	Lynk Global 与 SpaceX	商用初期

到端时延问题开展 TCP 加速相关协议设计，并针对速率受限、数据拥塞问题设计合理的负载均衡机制；SCPS 则重新定义了应用层、传输层、网络层等完整的协议体系，优化端到端重传协议控制，提供报文交换的完整性和安全性；DTN 协议由美国航空航天局主导，特点是在传输层和应用层之间引入束层，通过先存储再转发实现非连续的数据传输，采用点对点托管机制保障端到端的可靠性传输，还引入了汇聚层支持 TCP、用户数据报协议（user datagram protocol, UDP）等多种协议适配和转换。当前 DTN 协议标准化工作尚未完成，且未经过大规模组网技术验证。同时，SCPS 协议受限于高昂的开发和维护成本，仅支持增强代理方式的 SCPS 传输协议（SCPS-transport protocol, SCPS-TP）仍在一些商用设备中使用，其他协议已全部停止维护^[19]。因此地面相对成熟的 TCP/IP 是相对主流的使用方法，能以较低的成本完成网络部署。

OSI模型	SCPS	TCP/IP	DTN
应用层	SCPS-FP/ SCPS-FTP	FTP/HTTP等	容迟应用
表示层			束层协议
会话层	会话层协议	会话层协议	汇聚层协议
传输层	SCPS-TP	TCP/UDP	TCP/UDP
网络层	SCPS-NP/ SCPS-SP	IPv4/IPv6	IPv4/IPv6
链路层	CCSDS链路 层协议	链路层协议	链路层协议
物理层			

注：OSI：开放系统互联；SCPS-FP：SCPS文件协议；
SCPS-FTP：SCPS文件传输协议；SCPS-NP：SCPS网络层协议；
SCPS-SP：SCPS安全协议；CCSDS：国际空间数据系统咨询委员会；
FTP：文件传输协议；HTTP：超文本传输协议

图4 3种协议栈架构示意

在地面站设置方面，在满足当地相关部门监管的前提下，选址应该在归属地领土范围内，才能确保数据落地后接受归属地相关部门监管。在归属地选址应考虑低轨卫星可见弧段，增加可视卫星数量，以获得更多的星地建链时长；并根据归属地业务密度高低，设计布局与

数量，与地面多个承载节点进行局部分流，缓解数据拥塞，保障承载网灵活和可靠传输。

地面承载网主要由地面网内交换机、路由器及双方的互通网关组成。地面承载节点之间通过光纤进行连接，满足节点之间的数据大容量回传。边界网关（border gateway, BG）是拜访地网络运营商和归属地网络运营商之间的互通网关，异网漫游涉及的安全边缘保护代理（security edge protection proxy, SEPP）之间的互通、用户面功能（user plane function, UPF）之间的互通均需要通过 BG 进行承载。双方网内均部署防火墙，其安全防护策略由运营商在满足业务互通的前提下实施，一般挂载在 BG 内侧，防火墙数量与 BG 数量相同^[20]。

2.3 核心网架构

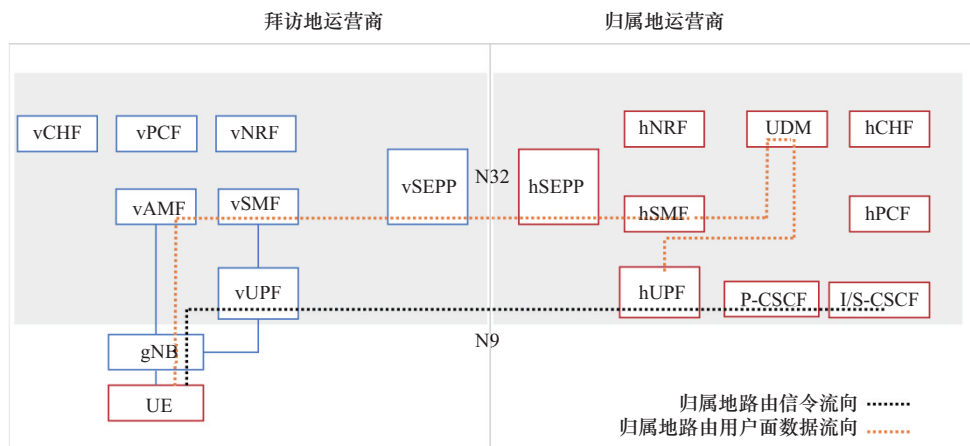
核心网在低轨卫星异网漫游中承担关键控制功能，主要包括漫游终端的认证与鉴权、信令安全交互、移动性管理和会话管理等。根据 3GPP 国际标准，异网漫游架构可分为归属地路由与拜访地路由两种模式，二者在业务路径与功能分配上存在显著差异，归属地路由与拜访地路由架构特点对比见表 2。

在归属地路由中，IP 多媒体子系统（IP multimedia subsystem, IMS）协议数据单元（protocol data unit, PDU）路由至归属地网络激活，会话锚点由归属地网络提供，IMS 注册及会话流程均由归属地运营商处理，端到端时延较长，归属地路由架构的控制面、用户面信息流向如图 5 所示，N9、N32 均为接口。在拜访地路由中，IMS PDU 会话在拜访地网络激活，由拜访地提供 IMS 会话锚点，IMS 注册和会话接入点在拜访网络中，后续业务流程由归属地运营商处理，用户体验接近本地，拜访地路由架构的控制面、用户面信息流向如图 6 所示。

两种模式在计费能力方面也有所不同。在归属地路由方式下，拜访地会话管理功能（visited session management function, vSMF）网元生成话单，拜访地策略控制功能（visited policy control function, vPCF）网元提供基于服务质量流（quality of service flow, QoS flow）的计量能力，无法对语音和短信业务进行准确计量。归属地通过代理呼叫会话控制功能（proxy-call session control func-

表2 归属地路由与拜访地路由架构特点对比

路由架构	用户面路径	端到端时延	计费与策略控制	安全监管
归属地路由	由归属地运营商提供会话锚点,用户面迂回路径长,需跨网回传至归属地	时延高,增加了跨网传输和归属地路由时延	较为简单,所有流量均从归属地出口,便于实施统一计量计费	数据可监管,拜访地核心网本地化部署,符合归属地法律要求
拜访地路由	由拜访地运营商提供会话锚点,用户面直达路径短,在拜访地完成出口转发	时延低,用户体验接近本地	实现逻辑复杂,双方均具备计量能力,计费策略需双方协商	需要满足拜访地数据本地化存储要求



注: vCHF: 拜访地计费功能; vNRF: 拜访地网络仓储功能; vSEPP: 拜访地安全边缘保护代理;
hSEPP: 归属地安全边缘保护代理; hNRF: 归属地网络仓储功能; UDM: 统一数据管理;
hCHF: 归属地计费功能; hPCF: 归属地策略控制功能; hSMF: 归属地会话管理功能;
hUPF: 归属地用户面功能; P-CSCF: 代理呼叫会话控制功能; I/S-CSCF: 查询/服务呼叫会话控制功能;
S-CSCF: 服务呼叫会话控制功能

图5 归属地路由架构的控制面、用户面信息流向

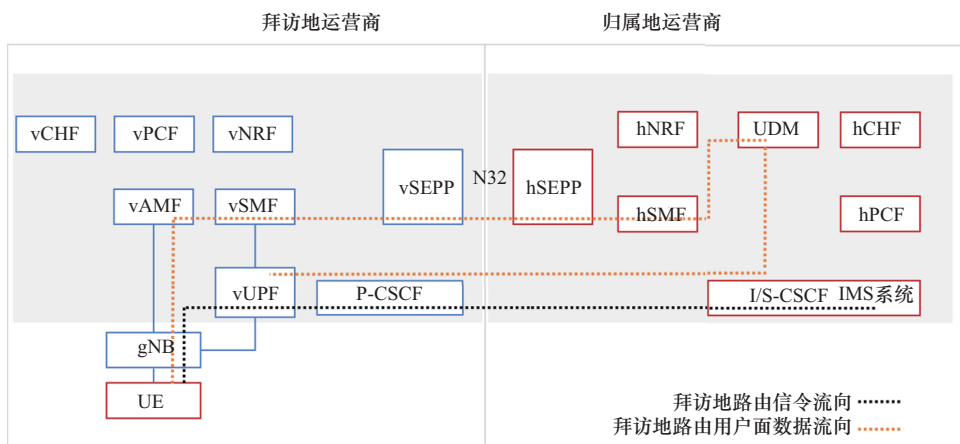


图6 拜访地路由架构的控制面、用户面信息流向

tion, P-CSCF) 网元进行计量, 具备完整计费能力。在拜访地路由方式下, 两者均具备计费能力, 通过各自的IMS系统生成话单并进行计费。

对于拜访地运营商, 第一种归属地路由方式实现较为容易, 仅影响核心网, 对IMS系统无影响, 组网复杂度相对较低。在部署方面, 为配合归属地核心网网元组网最小化改造量, 拜访地核心网网元优先采用独立和就近部署方式。其中, 独立部署是指漫游专用网元与其他业务网元物理隔离, 便于精确评估各网元的接口处理性能, 如拜访地接入和移动性管理功能 (visit access and mobility management function, vAMF) 网元管理的无线资源控制 (radio resource control, RRC) 连接数、拜访地用户面功能 (visit user plane function,

vUPF) 网元转发的数据流量等。当漫游会话数接近系统容量上限或 vUPF 处理带宽利用率接近阈值时 (一般为设计值的 80%), 可针对漫游专用网元进行独立扩容。此外, 独立部署也为后续升级改造与网络运维提供了便利, 避免影响本网业务运行。就近部署主要出于数据合规与传输效率考虑, 确保用户数据尽量不出境, 符合当地监管要求。拜访地运营商核心网应在当地部署, 减少跨国数据传输、减少时延。在此基础上, 拜访地核心网与归属地核心网的网间漫游接口打通, 双方组网实现协同业务管控及运营。

3 关键技术

在上述潜在的接入网、承载网、核心网架构中, 地

面5G通信体系发展较为成熟，且经过多年商用验证，关键技术主要集中在低轨卫星领域，聚焦在低轨卫星快速运动导致的建链和切换问题。为保证接入成功率和稳定性，在拜访地和归属地核心网配合下，对漫游终端进行合理控制与优化，即涉及拜访地的接入网和双方核心网范畴。

3.1 定时同步技术

低轨卫星通信中，信号从漫游终端到卫星的传输距离远大于地面通信，导致传输时延显著变高，通常在50~100 ms。5G空口使用正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）技术，上行链路波形和下行链路波形对时间误差非常敏感，多个漫游终端信号需要在循环前缀范围内到达，避免星上基站侧和漫游终端之间的信号定时失准。为满足与星上基站距离不同的漫游终端发送的上行信号可同时到达的约束条件，漫游终端根据定时提前量（timing advance, TA）提前发送信号，使漫游终端之间的信号维持正确的时间关系。

定时同步包含随机接入过程中的定时同步和后续链路的定时同步。对于随机接入过程中的定时同步，具体步骤是通过消息1~消息4（msg1~msg4）来维持终端上行传输时间与基站下行接收时间对齐。msg1过程是漫游终端向星上基站发送前导序列码；msg2过程是星上基站开启时间窗接收多个漫游终端的前导序列码后，综合计算得出定时提前TA值并分发给各漫游终端^[21]；msg3过程中漫游终端在收到TA指令后发送连接请求；msg4过程在解决多个终端信号竞争问题后，成功实现漫游终端接入卫星网络。该过程漫游终端之间位置互相不知晓，因此TA值为星上基站侧下传，由下行信号控制上行信号发送时间，以此调整多个漫游终端载波发射时间。

为了解决多个漫游终端信号难以同时到达范围前缀的问题，主流方法通常为改进前导序列设计。文献[22]通过在基站侧延长前导序列检测的持续时间，来确保跟踪区域码（tracking area code, TAC）覆盖范围内的大多数漫游终端能够同时接入。文献[23]提出级联相同的根序列构造前导序列。文献[24]提出级联不同根序列。该类方法存在明显的局限性，延长检测持续时间会增加系统计算开销，对星上资源受限的场景不友好。此外，可通过计算的方式得到TA值，如文献[21]采用3GPP给出的解决思路，提出基于地理位置和时序漂移拟合的终端分组方法，得出漫游终端的定时提前TA值。

当漫游终端随机接入成功，终端由空闲态进入连接态，进行后续链路的定时同步维持。对于后续链路传输，

当基站检测到传输时序的误差超过定时误差门限时，将对漫游终端发出TA调整指令，如何进行调整，需要按照3GPP规定，TA每次变化量和变化率都有规定^[25-26]。该过程与随机接入过程相同，漫游终端相对位置不透明，由基站侧下发TA调整指令，伴随低轨卫星位置高速变化来调整信号发射时间。

3.2 抗频偏技术

频偏控制的目的是消除漫游终端与卫星之间的高速运动带来的频率漂移影响，通过补偿机制将误差控制在一定范围内，确保星载调制解调模块能够正常工作，是完成终端与卫星之间连接建立的关键。在没有频偏同步时，以卫星轨道高度600 km、频率2 GHz为例，星地最大频偏可达40 kHz^[11]。因此，漫游终端需要与通信系统进行初始的频偏同步，并在分配资源之后不断进行跟踪和纠正来维持同步状态，确保数据正常传输。对于初始同步过程的频偏补偿，漫游终端接收同步信号和物理广播信道块（synchronization signal and physical broadcast channel block, SSB）播发的信号后，基于星历信息和位置信息计算频偏值，该值用于msg1过程前终端侧频偏补偿，漫游终端将上行频率向相反方向调整后再发送信号。卫星接收预补偿信号之后，卫星本地通过M序列检测并调整残余偏差，再转发给星载调制解调单元。

针对初始同步过程中的频偏计算方法，现有研究成果多在有定位授时的条件下，进行更精细的频偏补偿研究。文献[27]提出当终端接收下行信号时，将OFDM系统的子载波间隔频偏估计拆分为两部分计算，即整数频偏估计和小数频偏估计，仿真结果表明，在800 kHz大频偏、信噪比-2 dB的条件下，偏移估计成功率接近98%。文献[28]在文献[27]算法的基础上对比了分时间段的频偏估计方案，结果表明，并不是滑动窗口时间分段越多估计准确性越高，需要平衡计算复杂度和计算速度的关系。实际应用场景多变，导航定位授时拒止情况可能存在，因此需要研究无导航定位授时能力下的解决方法，即在基站发射机处进行时频预补偿，但该类研究目前较少，有待进一步深入研究。

当终端随机接入成功、链路建立完成之后，进入持续的数据传输阶段。由于卫星仍在高速运动，频偏仍在连续变化，需对其进行实时、精确的跟踪并补偿。在数据传输的帧结构中，周期性插入导频符号，接收机通过周期性接收导频符号原始值并不断纠正，实现频偏预补偿。

3.3 星地链路切换技术

低轨卫星移动速度高达 7.5 km/s, 单颗低轨卫星服务区覆盖时长有限, 一般在几分钟至十几分钟不等。漫游终端在连接态时, 为了保证用户链路不中断, 当低轨卫星经过波束服务区上空时, 星载设备会检测业务传输质量。如果质量指标低于预设阈值, 漫游终端需要与下一颗过境卫星建立连接, 以保证业务传输不中断。同理, 卫星与地面站之间的馈电链路经过切换条件确认、资源分配、切换指令下发后完成链路切换。在此过程中, 星地链路的切换须综合考虑卫星链路的切换条件与切换控制方式。

用户链路及馈电链路切换条件一般由星载监控设备根据低轨卫星可见周期、信号强度、误码率等多项指标综合判断。当多次检测到信号强度小于 90 dBm 且误码率超过 1×10^{-5} 时, 触发切换条件。这种方法的判断指标较为单一, 因此须构建多属性联合决策指标集, 综合评估是否执行切换动作。星地数据传输信道存在显著的空间变化特性, 受大气变化影响较大, 在强对流情况下, 阈值存在切换误差, 易出现过早切换的情况。因此, 在原有较为单一的判断条件下, 应增加大气衰减模型, 将太阳风强度、地磁等指标纳入阈值判断, 综合加权后输出动态阈值切换策略, 能够显著降低乒乓切换概率。

用户链路的控制方式与地面 5G 基站类似, 主要包括 NG 接口控制切换和 Xn 接口控制切换两种^[10]。在 NG 切换模式下, 地面的天基网络控制器为切换指令下发单元, 根据链路质量状态、下一个接续卫星负载情况等分配新路由地址, 通知正在与之通信的终端, 之后完成业务数据在两颗相邻卫星之间的传递, 但此过程的决策指令在星地之间多次往返会造成传输时延增大。在 Xn 切换模式下, 漫游终端信息由星间链路传递, 从源低轨卫星基站传递给目的卫星基站, 由源低轨卫星基站选择哪颗卫星接替链路, 这要求源低轨卫星集成边缘计算能力, 以选择最优切换路径, 此时切换指令下发单元为星载边缘计算单元。同理, 馈电链路切换存在站切星和星切站两种方式, 可根据拜访地运营商现有计算能力选择不同的控制方式。

3.4 二次漫游业务管控技术

由于异网漫游业务使用归属地号码, 是在归属地运营商核心网开通的, 用户签约信息存储在归属地核心网, 拜访地运营商完全信任归属地运营商提供的签约信息。由于拜访地运营商与归属运营商共享卫星接入网, 拜访地运营商难以有效控制漫入用户的数量及其对网络资源

的使用情况^[29], 须研究并部署针对漫游业务的二次管控机制, 保障拜访地本网高优先级业务或关键任务的服务质量。

在未实施二次业务管控的情况下, 接入网根据 TAC 跟踪区和用户 ID 决定是否提供服务, 并根据网间接口访问归属地统一数据管理 (unified data management, UDM) 获取用户签约信息, 完成用户认证鉴权及接入管理, 继而进行数据传输。在引入二次业务管控后, 归属地业务开通签约信息并提前同步至拜访地运营商, 拜访地运营商根据用户 ID, 在出现更高等级业务或任务时, 对漫游终端实行限速或紧急下线等资源拆除手段。

针对用户接入数量, 可针对归属地同步的用户 ID, 在漫游终端初始注册过程中, 对 vAMF 强制执行下线操作, 实现用户粒度管控, 待情况恢复后, 解除强制下线操作。

针对网络资源使用量管控, 在漫游终端初始注册时, vPCF 可重新定义不同于漫游终端在归属地运营商 UDM 中的签约数据, 覆盖漫游终端在 UDM 中的原始签约信息, 设置终端业务用量使用策略, 从而实现对单个漫游终端的时段限速或使用量限制, 有效抑制漫游业务对网络资源的过度占用。

3.5 服务质量保障等级协商

服务质量保障是对不同用户和业务提供差异化服务的能力。在本网的业务管理中, 业务管理人员通过综合网关为系统内各网元配置并管理 QoS 相关参数, 各个网元设备依据 QoS 策略运行和调度资源。在异网漫游中, 拜访地运营商与归属地运营商对 QoS 参数的设置往往不同, 根据 3GPP 标准, vSMF 为漫游用户配置拜访地 QoS 参数, 参与端到端的 QoS 协商, 当归属地为其配置带宽过高时, vSMF 可拒绝 PDU 会话, 因此双方须协商确定网络策略并确定漫游业务服务等级, 以保障跨运营商的业务体验连续性。

vSMF 按照拜访地 QoS 保障策略对漫游终端 QoS 参数进行映射, 经接入网管透传至基站侧接口, 完成基于空口优先级的资源调度。此外, 不同场景对于服务质量要求不同, 消防、医疗等紧急呼叫业务需被赋予最高服务优先级。系统应协同完成此类业务流的分类、标记、队列调度与拥塞管理, 确保其在网络能力范围内获得最高优先级的处理。

3.6 波束服务区域管理

漫游业务的服务范围可能受归属地运营商在地理位置上的限制。例如星链为新西兰和澳大利亚提供服务时,

其覆盖范围被严格限制在合作伙伴所在国家的陆地、湖泊以及近岸12海里(1海里=1 852 m)海域,且不包括政府规定的无线电静默区,因此漫游业务服务区域应限制在双方约定范围内^[30]。

为实现此类地理范围控制,vAMF、UDM、vPCF相互配合可解决此类问题。vAMF从UDM下载漫游终端的服务区域限制信息初始值,并发送给vPCF,vPCF根据实际情况设置黑白名单和区域列表,用来覆盖UDM中的原有签约信息初始值,这一操作表示允许或禁止该用户ID进入该区域,从而基于用户位置动态判断是否允许终端接入相应波位。

3.7 业务传输优化技术

漫游终端须兼顾接入地面网络与卫星网络两种通信模式,其轻量化与小型化设计是实现便携性与广泛推广的关键。然而,若采用高性能天线以支持卫星链路,普通手持终端的集成难度较大。为此,当前低轨卫星系统常以窄带传输为代价,换取终端的轻便与小体积。例如,部分卫星链路的传输速率仅为1~3 kbit/s,此种低速率环境对IMS平台带来显著挑战。一是语音建立时间过长,低速率环境下通话建立之前的信令消息传输时间增加,包括呼叫发起、路由选择、资源分配、返回确认等过程,信令确认时间延长导致通话建立时延较长;二是语音编解码速率高于可用带宽,3GPP定义的语音编解码器包括自适应多速率(adaptive multi-rate, AMR)和增强语音服务(enhanced voice services, EVS)两种,其中AMR编解码速率为4.75~12.2 kbit/s, EVS编解码速率为5.9~128 kbit/s^[31],其最低速率仍超出可用带宽,导致语音编解码难以正常进行,因此需要引入更低速率的新型编解码方案。

为解决上述难题,需在IMS初始会话协议(session initial protocol, SIP)的消息和机制方面进行增强,提升语音通话成功率。一是压缩SIP中的消息头,仅保留from、to、callID等必要字段,减少冗余传输;二是调整SIP定时器时长,适当延长标准定义的响应时间,使消息发送时长大于标准值,避免因超时而触发的消息重复发送,从而提升信令交互效率。

4 结束语

本文梳理了低轨卫星异网漫游在标准制定、政策引导与国内外实践层面的发展现状。在此基础上,结合监管框架要求,从接入网、承载网和核心网3个层面提出了潜在可行的组网方案。同时,针对典型应用场景中拜访地漫游终端在定时同步、抗频偏、链路切换、漫游业务

二次管控、服务质量协商、波束服务区域管理及业务传输能力优化等方面存在的 key 问题,分析了可能的解决方案。上述研究可为低轨卫星异网漫游的网络架构实现与业务应用创新提供参考。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2021.
IMT-2030(6G)Promotion Group. White paper on overall vision and potential key technologies of 6G[R]. Beijing: China Academy of Informations Technology, 2021.
- [2] 孙耀华, 彭木根, 赵亚飞, 等. 低轨卫星互联网: 从星地融合迈向通导遥一体化[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(6): 69-98.
Sun Y H, Peng M G, Zhao Y F, et al. Low earth orbit satellite network: from satellite-terrestrial convergence to the integration of communication, navigation and sensing[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(6): 69-98.
- [3] 申碧霄, 穆雨萱. 星链发展历程研究及电信运营商布局建议[J]. 通信企业管理, 2025(8): 41-45.
Shen B X, Mu Y X. Research on the development course of satellite chain and suggestions on the layout of telecom operators[J]. C-Enterprise Management, 2025(8): 41-45.
- [4] 3GPP. Study on architecture aspects for using satellite access in 5G (release 17): TR 23.737 V17.2.0[R]. Geneva, 2021.
- [5] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (release 16): TR 23.737 V17.2.0[R]. Geneva, 2021.
- [6] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial network (NTN) (release 16): TR 38.811 V15.4.0[R]. Geneva, 2020.
- [7] 许元波, 刘为. 5G国际漫游网络架构解析及部署方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(3): 15-21.
Xu Y B, Liu W. Research on architecture and deployment scheme of 5G international roaming network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(3): 15-21.
- [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] 张嘉骞, 王杨昊. 低轨卫星通信系统未经授权地球站使用国际规则研究[J]. 中国无线电, 2025(7): 26-29.
Zhang J Q, Wang Y H. Study on international rules for the use of unauthorized earth stations in LEO satellite communication systems[J]. China Radio, 2025(7): 26-29.

- [10] 宋艳军, 孙晨华, 谢文轩, 等. 面向低轨卫星的NTN随机接入技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(4): 17-24.
Song Y J, Sun C H, Xie W X, et al. Random access technology of NTN network for low orbit satellite[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 17-24.
- [11] 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.
- [12] 陈宏. 全球手机直连卫星应用发展与思考[J]. 卫星应用, 2023(11): 37-43.
Chen H. Development and thinking of global mobile phone direct satellite applications[J]. Satellite Application, 2023(11): 37-43.
- [13] Chaudhry A U, Yanikomeroglu H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [14] Handley M. Delay is not an option: low latency routing in space[C]// Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 85-91.
- [15] 孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(4): 57-74.
Sun Y H, Feng X A, Peng M G. Mega LEO satellite constellations networking: challenges and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 57-74.
- [16] Qi X X, Zhang B, Qiu Z L, et al. Using inter-mesh links to reduce end-to-end delay in walker delta constellations[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(9): 3070-3074.
- [17] Fan G J, Li H W, Liu J, et al. User-driven flexible and effective link connection design for mega-constellation satellite networks[C]// Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 793-799.
- [18] 孙耀华, 冯昕澳, 彭木根. 低轨巨型星座组网: 挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(4): 57-74.
Sun Y H, Feng X A, Peng M G. Mega LEO satellite constellations networking: challenges and key technologies[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 57-74.
- [19] 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): 39-45.
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): 39-45.
- [20] 骆训赋. 基于核心网漫游的5G异网漫游组网构架及部署策略探讨[J]. 广播电视网络, 2024(S1): 46-49.
Luo X F. Discussion on the architecture and deployment strategy of 5G heterogeneous network roaming based on core network roaming[J]. Radio & Television Network, 2024(S1): 46-49.
- [21] 陈美漪, 闫一婷, 孙耀华, 等. 手机直连低轨卫星通信上行时间同步技术研究[J]. 移动通信, 2025, 49(10): 52-61.
Chen M Y, Yan Y T, Sun Y H, et al. Research on uplink time synchronization technology for direct to low earth orbit satellite communication[J]. Mobile Communications, 2025, 49(10): 52-61.
- [22] 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): 39-45.
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): 39-45.
- [23] Li C M, Ba H B, Duan H X, et al. A two-step time delay difference estimation method for initial random access in satellite LTE system[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Advanced Communication Technology. Piscataway: IEEE Press, 2014: 10-13.
- [24] 孙腾. 5G卫星移动通信系统随机接入前导设计与检测算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2021.
Sun T. Research on preamble design and detection algorithm for random access in 5G satellite mobile communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [25] 段相龙, 刘留, 周涛, 等. 一种低轨卫星通信的定时提前计算方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(3): 278-284.
Duan X L, Liu L, Zhou T, et al. A timing advance calculation method for Low Earth Orbit satellite communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(3): 278-284.
- [26] 3GPP. Requirements for support of radio resource management (FDD): TS 36.133 (V10.7.0)[S]. Geneva, 2012.
- [27] 徐玲. 5G NTN下行时频同步技术研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(15): 171-175.
Xu L. Research on the downlink time-frequency synchronization technology of 5G NTN[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(15): 171-175.
- [28] 杨德伟, 孙为宗, 李念祖, 等. 面向5G低轨卫星的下行初始时频同步算法[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(5): 513-520.
Yang D W, Sun W Z, Li N Z, et al. Downlink initial time frequency synchronization algorithm for 5G low earth orbit satellites[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(5): 513-520.

- [29] 何元智, 杨岭才, 肖永伟, 等. 天地一体化新路径: 手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 1-11.

He Y Z, Yang L C, Xiao Y W, et al. New approach of integration space-ground: hotspots, challenges, and key technologies of direct-to-smartphone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 1-11.

- [30] 薛元星, 赵治, 段乔曼. 星链手机直连卫星业务商业模式及组网方式[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 85-91.

Xue Y X, Zhao Z, Duan Q M. Starlink business model and network mode under the direct-to-satellite service of mobile phone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 85-91.

- [31] 龚乐中, 庄跃迁. 天地一体化网络融合研究及应用分析[J]. 现代传输, 2025(3): 34-42.

Gong L Z, Zhuang Y Q. Research and application analysis of network integration of heaven and earth integration[J]. Modern Transmission, 2025(3): 34-42.

[作者简介]



王琪 (1994-), 女, 中国星网网络应用研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为卫星通信领域业务运营服务。



李萌 (1981-), 男, 中国星网网络应用研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为移动网络核心网、IMS 核心网等。



薛元星 (1979-), 男, 中国星网网络应用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架构。

赵治 (1980-), 男, 中国星网网络应用研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为空天地一体化网络的组网方案及相关领域的标准化。

陈川涛 (1981-), 男, 中国星网网络应用研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信领域业务运营服务。

李铎 (1983-), 男, 中国星网网络应用研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信领域业务运营服务。

黄锐 (1973-), 男, 中国星网网络应用研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信领域业务运营服务。