

大型低轨通信星座的地面分布式核心网架构设计

尹曙明, 郝利云, 郭浩然, 薛成成

(北京空间信息传输中心, 北京 102300)

摘要: 卫星通信系统当前主要采用集中方式部署核心网, 存在单点故障风险, 系统可靠性和扩展性不足、整体性能受限。大型低轨通信星座系统, 服务的用户数量和业务量大幅增加, 对系统可靠性和整体性能提出了更高要求。对此, 基于低轨星座“天基基站+地面核心网”的典型布局, 提出一种多节点分布的地面核心网架构。重点针对低轨星座多节点核心网落地选择问题和用户管理问题提出解决思路, 并设计用户漫游和主备切换的基本流程。该分布式核心网具备业务分担和备份接替的能力, 缓解了单节点核心网的承载压力, 提高了系统可靠性和整体性能。

关键词: 卫星通信系统; 低轨星座; 分布式核心网

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024024

Design of Ground Distributed Core Network Architecture for Large Low Earth Orbit Communication Constellation

YIN Shuming, HAO Liyun, GUO Haoran, XUE Chengcheng

Beijing Space Information Transmission Centery, Beijing 102300, China

Abstract: Currently, satellite communication systems mainly deploy core networks in a centralized manner, which poses risks of single point failure and limits system reliability, scalability, and overall performance. The large-scale low-orbit constellation communication system has seen a significant increase in the number of users and business volume, which puts higher demands on system reliability and overall performance. In response, a multi-node distributed ground core network architecture based on the typical layout of low-orbit constellation "space-based base station + ground core network" was proposed. The solutions to the problems of landing selection and user management in multi-node core networks for low-orbit constellations were proposed, and basic processes for user roaming and active/standby switching were designed. The distributed core network had the ability to share services and backup, which alleviated the load pressure of single-node core networks and improved system reliability and overall performance.

Keywords: satellite communication system, low orbit constellations, distributed core network

0 引言

以卫星通信系统为重要组成部分的天地一体化信息网络, 是支撑我国经济发展和信息化建设的重要组成部分, 是我国“新基建”的重点发展方向^[1]。低轨 (LEO) 通信卫星星座以其广覆盖、低时延、大容量、低成本等优势, 正日益成为卫星通信系统主流发展方向^[2]。近年来, 国内外低轨通信星座发展迅速。星链 (Starlink)、OneWeb 系统等已组网运行, 正加速扩展在轨卫星规模;

铱星系统已完成二代系统更新; Telesat 系统、Kuiper 系统即将发射部署^[3]。国内低轨星座虽起步较晚, 但呈加速追赶态势, 国家卫星互联网系统、灵犀星座、千帆星座、智慧天网等数个低轨星座项目同步推进。

与高轨通信卫星相比, 低轨卫星具有时空动态性。为满足通信用户移动性管理需求, 一般采用天基基站+地面核心网的技术架构。通过在地面集中部署核心网 (特别是控制面网元), 实现对全网用户的统一控制管理。星座规模分类及典型代表如图1所示。

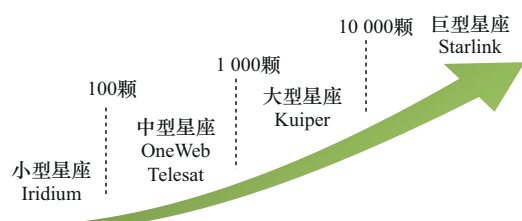


图1 星座规模分类及典型代表

随着全球无线网络覆盖和通信容量需求的不断增长,卫星通信系统正向大型甚至巨型星座发展。星座规模的急剧扩张,不仅提升了系统容量,也增加了系统复杂度。集中部署的核心网严重依赖地面网络承载能力,同时系统健壮性不足,难以满足可靠通信需求。对此提出了一种分布式的核心网架构,通过合理分布核心网网元,实现多地业务负载分担和备份接替,提升了系统整体健壮性,降低了地面承载网容量负担和传输时延。

1 低轨星座典型架构

1.1 系统架构

与高轨卫星通信系统相同,典型的低轨星座系统包含空间段、用户段和地面段3个部分。由于低轨星座系统由多颗卫星构成,一般情况下需在地面配套部署多个信关站,完成不同轨位卫星的落地接入。各信关站间通过地面网络互联,形成天地双网的基本架构,如图2所示^[4]。

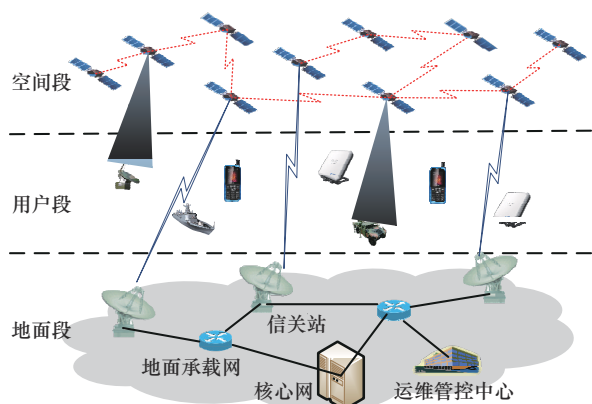


图2 低轨星座典型架构

空间段由低轨卫星和星间链路组成,形成传输主干网络。卫星作为空间网络的接入节点,起到天基移动基站的功能,卫星间可建立微波或者激光星间链路,实现数据中继转发^[5]。大型和巨型星座由于卫星规模庞大,

一般采用多轨道高度、多倾角的子星座构成多层混合星座^[6]。

地面段主要有信关站、核心网、运维管控中心以及地面承载网等基础设施。信关站用于收发卫星信号,实现天基网络和地面网络连接的网关功能^[2]。天基数据经信关站落地,完成星地协议转换后,通过地面承载网汇入核心网,完成通信会话建立和信息交换。运维管控中心对卫星、信关站等进行统一管理。

用户段包括各类用户终端及业务系统等,既可以作为通信节点,也可作为接入节点构建局域网络。根据通信场景的具体需求,用户数据可经卫星转发到另一端的用户,也可以经过单跳或者多跳星间转发到信关站,再通过地面网络完成传输。

1.2 核心网功能结构

低轨通信星座系统在与地面网络竞争发展的同时,也不断借鉴地面网络发展的先进技术。低轨卫星与通信用户空间位置的相对动态性,促使低轨通信星座系统一般采用移动通信技术架构,以解决相对移动性管理问题。当前,“5G+卫星通信”,甚至“6G+卫星通信”已经成为低轨通信星座发展的主流趋势^[7]。

移动通信系统主要由接入网(AN)、核心网(CN)等功能单元组成。接入网负责为通信用户构建无线接入链路,包含无线资源控制、无线链路控制、媒质接入控制等^[8]。接入网功能可部分或全部部署于星上,形成天基基站。核心网负责通信业务的接入控制、移动性管理和会话管理^[9],包含接入和移动性管理、会话管理、策略控制等功能单元。5G核心网架构如图3所示。

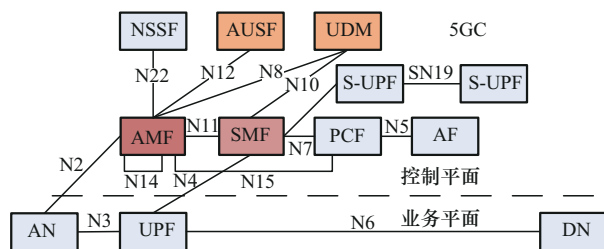


图3 5G核心网架构

核心网是整个卫星通信系统的控制核心,整个系统的业务处理要在核心网的控制下完成。核心网的主要功能之一是移动性管理,即实时记录用户的时空位置,以便于准确高效地向用户所在区域发起寻呼。为便于查询用户实时位置,移动性管理功能一般需要部署于网络拓扑关系稳定的地面,而低轨卫星时空位置具有高动态

性，因此移动性管理功能及核心网网元一般部署于地面。

1.3 核心网集中部署的弊端

核心网集中部署实现简单，便于集中管理维护，建设和运营成本低，是当前高轨卫星移动通信系统及中小规模低轨通信星座系统的主流技术方案。核心网集中部署方式，需要全系统数据全部汇聚至一处进行集中处理，将带来以下问题。

(1) 单点故障风险

集中部署的核心网将所有重要的网络功能和数据集中在一个位置，将导致安全风险增加。如果发生异常故障，比如自然灾害、电力中断或网络攻击，整个系统将受到影响。

(2) 高时延和带宽瓶颈

集中部署的核心网需要将大量的数据流量通过有限的网络带宽传输到中心位置，将导致数据传输时延增加，特别是在用户全球分布的情况下，该问题将更加严重。同时，中心位置的网络带宽将成为瓶颈，限制系统整体性能和响应速度。

(3) 难以满足区域化需求

不同地区或业务领域可能有不同的网络需求和服务器要求。集中部署的核心网可能难以灵活适应区域化需求，导致服务质量下降或者无法满足用户需求。

2 分布式核心网技术现状和存在的问题

分布式核心网概念源自地面移动通信系统，专业名称叫作分布式业务网络，是中国移动针对电信业务和移动互联网业务提出的新一代可运营、可管理的分布式核心网体系和功能架构。采用P2P和分布式计算技术，通过一组同质化的节点来实现用户数据管理和会话控制，并结合电信网络可运营、可管理的框架，实现业务核心网的功能。

在地面5G移动通信系统中，基于服务化架构，采用云化部署，已经基本实现分布式灵活部署。从2G到5G，核心网经历了从封闭耦合到全面云化、网元功能虚拟化(NFV)及微服务架构的转变。这一过程极大地提升了核心网的灵活性、可扩展性和可靠性。在5G及未来的5G-Advanced(5G-A)时代，核心网持续演进，聚焦于“分布式”和“去中心化”，以适应更复杂的业务场景和更高的性能要求。

分布式核心网建立在核心网基础之上，其实质是一张叠加网络。分布式核心网络结构与传统网络结构的主

要区别就是，传统网络结构由集中式服务器来完成用户的信令处理，而分布式核心网络结构则通过分布于网络中的各个控制节点来完成信令处理。因此，节点在为分布式网络系统提供服务时是主服务器，也是备用服务器。当部分节点遭到攻击，或者部分网络被破坏时，其他的节点仍然可以正常工作，使其具有高容错、抗攻击的特性。除此以外，由于数据资源是分布在众多节点之中的，这就使整个网络系统的负载更为均衡，能够有效解决传统的集中式服务器所带来的结构复杂、成本增加的问题。分布式核心网基于虚拟化技术构建，可根据不同的用户需求，对资源状况进行动态调配，从而具备更高的灵活性。

随着网络规模的扩大和业务场景的复杂化，分布式核心网面临诸多技术挑战。例如跨地域有效管理、跨网络资源调度、高并发下的高可靠性等问题。特别是在5G-A时代，无线侧的“万兆下行、千兆上行”将给核心网侧带来巨大的转发压力，需要核心网进行更智能化的升级和优化。

虽然分布式核心网在地面移动通信系统中较为成熟，但在低轨星座中的应用仍处于探索阶段。不同于星链卫星主要采用透明转发模式，我国的低轨星座主要采用天基基站+地面核心网的总体布局，接入网功能主要部署于卫星。低轨卫星的高动态特性导致基站与核心网的拓扑关系实时变化。当核心网分布式部署后，将在地面产生多个核心网节点，导致基站与核心网的拓扑复杂度随着核心网节点数量的增多而呈指数级增长。基站部署于卫星，导致用户与基站的连接关系高动态变化，用户的移动性管理相对复杂，多个核心网节点将进一步加大移动性管理的技术难度。这对地面核心网的设计带来了巨大挑战。

3 分布式核心网架构设计

相对于中小型星座系统，大型低轨星座的系统容量和带宽将呈指数级增长，所服务的用户类型和用户需求将更加多样，系统的整体可靠性要求也必然更加强烈，因此必须建设分布式核心网以满足可靠性、灵活性等需求。

3.1 设计原则

设计分布式核心网的最终目的是解决单点故障风险，提升面向全球用户的服务保障能力，因此，必须遵守以下原则。

(1) 异地备份原则

为应对自然灾害等导致的单点故障风险，必须异地

多点位部署核心网。各节点核心网具备完整的核心网功能,能够不依托其他点位核心网独立运行。当某个甚至多个节点核心网发生故障后,能够应急接替,使得面向用户的通信服务基本不中断。

(2) 负载分担原则

各节点核心网能够按照一定策略分担全网业务量,以解决单点位部署存在的带宽瓶颈。用户与节点核心网不存在强绑定关系,可根据通信需求,灵活接入任意节点核心网。

(3) 面向用户部署原则

节点核心网根据用户分布灵活部署,以降低信号传输时延,满足用户时延敏感型通信需求。节点核心网设计遵守统一的基本标准,但具体建设具有适当的灵活性,以满足各区域用户群差异化的通信需求。

3.2 基本架构

分布式核心网以标准核心网为基础,根据地理位置、用户密度、业务需求及网络拓扑等因素,合理规划地面节点核心网的位置。通过去中心化处理,将处理和存储能力分散到多个空间节点,并通过地面承载网互联互通。节点分散部署于不同地理区域,以减少自然灾害、人为破坏等单一事件对整个系统的影响。

分布式核心网的设计基本按照“集中运维管理、统一业务控制、分散业务交换”的思路设计。集中运维管理是指在一地建设运维管理系统,具备对核心网全局进行运维管理的能力,确保分布式核心网按照统一的策略运行,同样能够降低运维管理难度。统一业务控制是指在控制面统筹管理用户,确保用户可随遇接入任意核心网节点。分散业务交换是指在用户面灵活分散布局,用户业务数据可以就近落地、就近转发,降低数据处理传输时延。分布式核心网基本架构如图4所示。

分布式核心网部署主要需要解决的是落地选择问题和用户注册管理问题。

(1) 落地选择问题

落地选择问题是为用户的通信业务处理选择和分配合适的节点核心网。由于各节点核心网均具备对任意用户的通信处理能力,天基基站具备与任意节点核心网互联的能力,因此必须根据预设策略选择唯一的节点核心网进行业务处理。落地选择问题主要通过星地承载网解决。通过为各节点核心网进行统一的地址规划,星地承载网根据各节点核心网唯一的地址标识,就可按照预设策略建立天基基站与合适节点核心网的数据传输链接,为各个用户选择合适的落地处理节点核心网。

落地选择问题按照“以接入位置为基础+智能流量调度”的策略选择落地节点核心网。“以接入位置为基础”是指根据用户分布,将低轨卫星的服务覆盖区划分为多个片区,并对应建设节点核心网。星地承载网建立卫星位置的时空态势。当用户接入对应片区的星载基站后,星地承载网根据接入卫星的时空坐标,分别对应用户的接入片区,并将该基站处理的数据转发至对应节点核心网。“智能流量调度”是指通过智能的流量调度算法,实现各节点间的负载均衡,确保业务流量均匀分布,避免单一节点过载。

虽然在低轨星座系统中天基基站与节点核心网无法固定绑定,但通过基于接入位置的落地选择策略,基本实现了节点核心网按地域分担服务的目标。

(2) 用户注册管理问题

用户注册管理问题是分布式核心网必须解决的另一问题,目的是使各节点核心网均衡承担用户通信业务,具备随遇接入能力。对此主要采用“一地注册、分组管理、多地备份”的解决思路。具体方法是建立跨节点的统一用户数据库,根据用户的地域分布,将全部用户划分为多个子集;分别为每个区域建立节点核心网作为该地域用户的唯一注册地,管理和存储该地域子集的用户数据,并在其他地域节点核心网备份存储。通过高效的同步机制,确保各节点间用户数据的一致性。

以建设5个节点核心网为例说明,如图4所示。全网用户根据地域被划分为5个地域子集,分别用①~⑤表示。每个节点核心网作为该区域子集用户数据的主存储服务器,并作为其他多个区域子集的备份存储器。在图4中,核心网1存储了用户子集①②③的数据,核心网2存储了用户子集②③④的数据。以此类推,核心网5存储了用户子集⑤①②的数据,其中核心网*i*是用户子集*i*的主要归属用户位置存储器。各个核心网节点间通过地面网络实时同步主备数据,通过划分用户子集的方式实现了节点核心网的负载分担,通过用户数据异地备份的方式,解决了单点故障后的应急接替需求。

3.3 业务流程设计

分布式核心网需要重点设计用户漫游和主备切换的业务流程。

(1) 用户漫游设计

当用户终端从一个卫星覆盖区移动到另一个时,系统能够自动识别并触发漫游流程。通过核心网节点间的协作,实现无缝切换,保证用户通信的连续性。当用户

移动至非归属注册地时，根据地理区域与归属站核心网的映射路由，将落地至非归属站核心网，产生漫游问题。对此采用落地站业务处理、归属站鉴权认证的策略。

用户漫游至非归属注册地后，开机入网后会在非归属站核心网注册登记（称之为落地站）。落地站核心网登记漫游用户的状态信息，同时向该用户的归属站核心网查询获取认证鉴权数据，并通知归属站核心网变更状态。

当漫游用户作为主叫时，由落地站的核心网根据归属站同步的漫游用户鉴权数据，完成会话处理，如图5

所示。

当漫游用户作为被叫时，同样会在初次接入落地站时完成鉴权数据同步及归属站状态信息更新。当其他用户对漫游用户呼叫时，主叫所在落地站的核心网将根据被叫用户号码编码规则前往漫游用户归属站核心网查询漫游用户当前位置。获知漫游用户落地站后，向被叫落地站核心网发送寻呼信令，完成会话。会话结束后，漫游用户落地站核心网向归属站核心网同步位置更新数据，如图6所示。

(2) 备份切换设计

为提升大型星座通信系统整体可用性,各节点核心

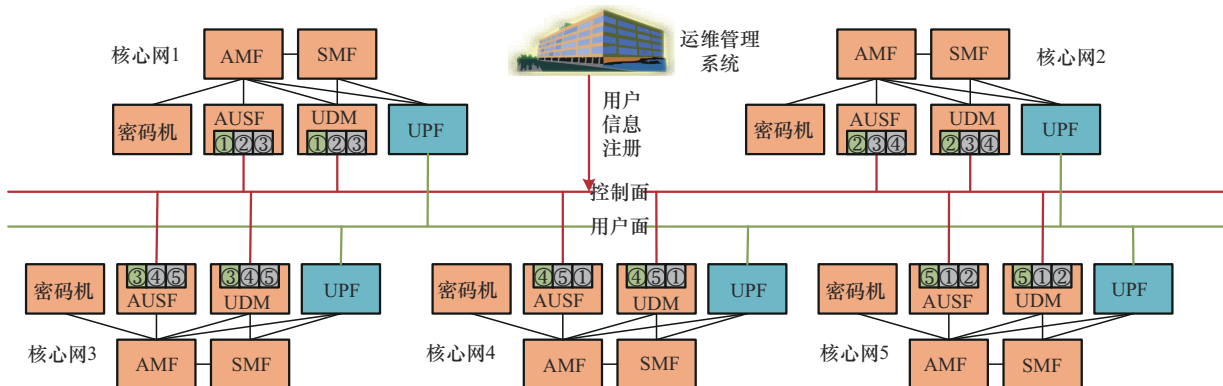


图4 分布式核心网基本架构

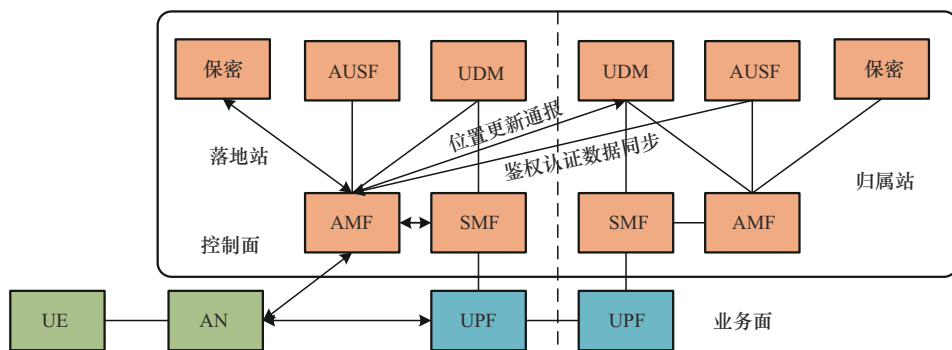


图5 主叫漫游策略

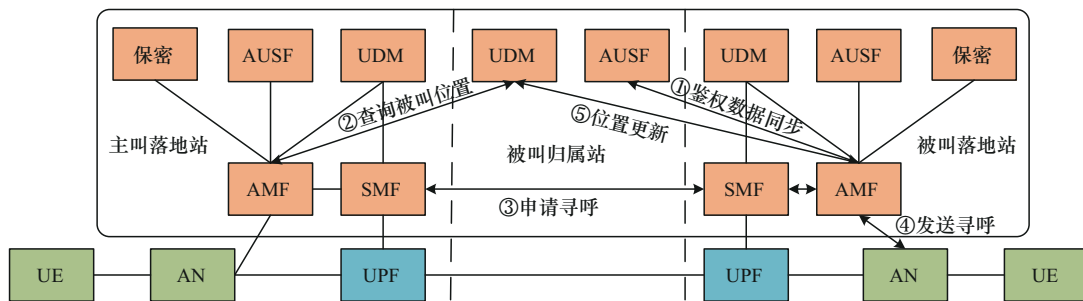


图6 被叫漫游策略

网具备互为备份能力。各节点核心网间采用心跳检测、性能监控等手段,建立活跃性检测,一旦发现故障,立即触发切换流程,将业务流量平滑迁移至备份节点,确保服务不中断。

核心网故障后,主要有两项切换操作。一是对星间路由策略进行重配置,将故障核心网对应通信区域的入网请求路由至备份核心网处理;二是配置备份核心网存储的用户数据切换为主用;三是通知各节点核心网,故障核心网注册用户的归属地变更为备份核心网所在地。

举例说明,以3号节点核心网故障为例,根据切换策略,2号节点核心网将接替成为原3号节点核心网用户的归属站,并通知1号、4号、5号节点核心网。3号节点核心网对应通信区域的用户,将通过重配置的星间路由落地至2号节点核心网处理,其他用户寻呼原3号节点核心网归属用户时,将向2号节点核心网数据库查询。

3.4 预期效益

(1) 系统可靠性有效提升

卫星通信系统,一般作为保底通信手段,必须具备实时在线服务的能力。通过对地面核心网进行分布式部署,实现了异地备份能力,避免了单点故障风险,可有效应对自然灾害等极端情况发生,提升了系统的整体可用度。

(2) 便于灵活扩容

地面核心网处理能力受地面承载网等基础设施限制,单点位链路带宽等承载能力有限,一定程度上成为限制低轨星座服务容量的瓶颈。通过分布式部署核心网,实现了多点分布、负载分担,降低了对地面链路带宽等基础设施的需求,便于按需扩容。

(3) 有效避免地面路由时延

低轨星座运行一般具备星地双路由,相对于星上直接通信的星间路由,地面路由需经多次转发、复杂路由,导致地面路由耗时巨大。分布式部署的核心网,为时延敏感型用户提供了就近落地的选择,避免了地面路由耗时,降低了通信时延。

(4) 便于定制、部署差异化服务

低轨星座一般服务于全球用户,各地用户需求具有区域化差异。分布式部署的核心网便于分区域部署差异化的后台应用,为各地用户提供定制化的服务。

4 结束语

针对大型低轨星座容量大、落地点位多、可靠性要求高的特点,设计了一种分布式的核心网架构,具备业务负载分担和故障备份接替的能力。分布式核心网通过去中心化,将处理和存储能力分散到多个节点上,突破了单节点能力上限,避免了单点故障风险。通过合理的节点布局、高效的业务分担与备份接替机制以及完善的用户管理与漫游策略,该架构能够显著提升系统的整体性能和用户体验。同时,每个节点核心网可针对所属区域用户的需求特点进行差异化设计和特色功能扩展,更好地适应不同类型用户的使用需求。基于多节点分布的地面核心网架构为大型低轨通信星座系统提供了更为可靠、高效和灵活的网络支撑。

参考文献:

- [1] 周笛,盛敏,郝琪,等.巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J].天地一体化信息网络,2020,1(1):26-35.
ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation and resource control technology of giant constellation system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1):26-35.
- [2] 陈全,杨磊,郭剑鸣,等.低轨巨型星座网络:组网技术与研究现状[J].通信学报,2022,43(5):177-189.
CHEN Q, YANG L, GUO J M, et al. LEO giant constellation network: networking technology and research status[J]. Journal on Communication, 2022,43(5):177-189.
- [3] 王全平,刘欣,衣春轮,等.国外新型低轨卫星星座发展及其潜在军事应用研究[J].战术导弹技术,2021,(3):67-74.
WANG Q P, LIU X, YI C L, et al. Study on the development of new LEO satellite constellations abroad and their potential military applications[J]. Tactical Missile Technology, 2021,(3):67-74.
- [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. A summary of the development of Space-Integrated-Ground Information Networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020,1(1):1-16.
- [5] CHEN Q, YANG L, LIU X F, et al. Multiple gateway placement in large-scale constellations networks with inter-satellite links[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021,39(1):47-64.
- [6] PACHLER N, PORTILLO I D, CRAWLEY E F, et al. An updated

comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021:1-7.

- [7] 王艳峰, 谷林海, 刘鸿鹏. 低轨卫星移动通信现状与未来发展[J]. 通信技术, 2020, 53(10): 2447-2453.

WANG Y F, GU L H, LIU H P. Current situation and future development of LEO satellite mobile communication[J]. Communication Technology, 2020, 53(10): 2447-2453.

- [8] 祝婵婵, 刘晨宇, 顾少龙, 等. 卫星移动通信系统无线接入网模拟实现[J]. 通信系统与网络技术, 2017, 43(6): 24-27.

ZHU C C, LIU C Y, GU S L, et al. Simulation of wireless access network of satellite mobile communication system[J]. Communication System and Network Technology, 2017, 43(6): 24-27.

- [9] 余莉, 张治中, 程方, 等. 第五代移动通信网络体系架构及其关键技术[J]. 重庆邮电大学学报, 2014, 26(4): 427-433.

YU L, ZHANG Z Z, CHENG F, et al. The architecture of the fifth generation mobile communication network and its key technologies

[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2014, 26(4): 427-433.

[作者简介]



尹曙明 (1979-), 男, 北京空间信息传输中心高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、天基测控等。

郝利云 (1987-), 男, 博士, 北京空间信息传输中心工程师, 主要研究方向为卫星移动通信。

郭浩然 (1987-), 男, 博士, 北京空间信息传输中心高级工程师, 主要研究方向为卫星移动通信、天基测控等。

薛成成 (1991-), 女, 博士, 北京空间信息传输中心工程师, 主要研究方向为卫星移动通信。