



研究与开发

## 星载6G核心网架构与网元功能设计及验证

王尚广<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 马骁<sup>1,2</sup>, 邢若粼<sup>2</sup>, 周傲<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学深圳研究院, 广东 深圳 518063;

2. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 为全面提升卫星的在轨服务能力, 将6G核心网与卫星融合。针对6G核心网在低轨卫星部署的迫切需求, 设计星载6G核心网体系架构, 包括分布式架构、离线自治、网元智能化等功能。对星载6G核心网主要网元进行了优化设计, 包括接入与移动性管理、会话管理、分布式服务注册与发现等。通过在轨部署和仿真试验, 验证了所提星载6G核心网体系架构的有效性。仿真结果表明, 集中式星载5G核心网网元之间的平均通信时延为109.3 ms, 而分布式星载6G核心网的平均通信时延为60.3 ms, 相较而言降低了44.8%; 此外, 5G集中式服务注册和服务发现的平均时延分别为40.53 ms和40.04 ms, 而6G分布式服务注册和服务发现的平均时延分别为35.18 ms和34.91 ms, 分别降低13.2%和12.8%。

**关键词:** 低轨卫星; 星载6G核心网; 分布式架构; 离线自治

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2024202

## Design and verification of the onboard 6G core network architecture and network functions

WANG Shangguang<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>, MA Xiao<sup>1,2</sup>, XING Ruolin<sup>2</sup>, ZHOU Ao<sup>2</sup>

1. Shenzhen Research Institute, Beijing University of Posts and Telecommunications, Shenzhen 518063, China

2. State Key Laboratory of Network and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

**Abstract:** In order to comprehensively improve the in-orbit service capability of satellite networks, it is necessary to integrate 6G core networks and satellite networks. In view of the urgent need of 6G core networks deployment, the system architecture of the onboard 6G core network was designed, including distributed architecture, offline autonomy, intelligent network elements and so on. The network elements of the onboard 6G core network were optimized, including access and mobility management, session management, distributed service registration and discovery, etc. The effectiveness of the proposed 6G core network architecture was verified by the on-orbit deployment and

收稿日期: 2023-12-24; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62032003, No.62372061, No.U21B2016); 深圳市科技计划资助项目 (No. KJZD20230928112759002); 北京邮电大学优秀博士生创新基金资助项目 (No.CX20242013)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62032003, No.62372061, No.U21B2016), Shenzhen Science and Technology Program (No.KJZD20230928112759002), BUPT Excellent Ph.D. Student Foundation (No.CX20242013)

simulation tests. The simulation results show that the average communication delay between network functions of the centralized onboard 5G core network is 109.3 ms, while the value of the distributed onboard 6G core network is 60.3 ms, which is a 44.8% reduction in comparison. In addition, the average delays of 5G centralized service registration and service discovery are 40.53 ms and 40.04 ms respectively, while the average delays of 6G distributed service registration and service discovery are 35.18 ms and 34.91 ms respectively, with average reductions of 13.2% and 12.8% respectively.

**Key words:** low earth orbit satellite, onboard 6G core network, distributed architecture, offline autonomy

## 0 引言

近年, 5G成为全球各国关注的热点, 也成为世界主要国家的竞争领域及国家战略的重要部分。5G自全面商用以来, 已经在国民经济社会中发挥重大作用, 尤其在近几年新冠病毒疫情防控中表现突出。5G的重大战略意义, 使得全球各国更加关注下一代移动通信技术——6G的研发。目前, 美国、欧盟等均已开展6G研究工作, 全球关于6G的竞争已悄然开始。2019年3月20日, 美国联邦通信委员会投票一致决定为6G开放实验频谱许可证, 拟以此绕过5G, 直接进入6G时代。与此同时, 美国抓紧布局6G太空网络, 以填补5G空白, 实现全球网络覆盖, 其SpaceX公司计划发射4.2万颗卫星以构建全球性的卫星宽带网络。欧盟也积极探索支持6G的无线智能社会与生态系统, 并在芬兰召开全球首个6G峰会。2019年11月3日, 我国科学技术部会同国家自然科学基金委员会、教育部等在北京组织召开6G技术研发工作启动会, 标志着我国6G研发正式启动。

目前国内外关于6G的研究还处于愿景阶段, 例如, 6G是人机物灵融合的网络、6G是人类意念相连的网络(基于脑机)等, 至于什么是6G, 无论学术界还是工业界均没有定论。但可以明确的是, 6G将在完善5G系统功能不足的基础上, 融合地面移动通信和卫星通信等网络<sup>[1]</sup>, 支持地面蜂窝设备通过第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)标准频率直接与卫星通信, 实现空天地海全球立体无缝连接与覆盖<sup>[2]</sup>, 而核心网是其中关键技术之一。

核心网不是一个网络, 从5G开始, 核心网已从一个具有特定功能设备的集合逐渐演化成了一个以应用程序接口(application programming interface, API)软件化实现通信功能的系统软件。核心网作为一个通信系统软件, 已成为移动通信网络的核心部分之一, 起着承上启下的关键作用, 主要负责处理用户终端的移动管理、会话管理、数据传输以及策略控制等业务。

5G已经实现了部分核心网功能在卫星上部署。星载用户平面功能可以使转发功能下沉到网络边缘, 有效降低通信时延<sup>[3]</sup>。前期进行的首次轻量级5G核心网星上部署实验<sup>[4]</sup>, 成功将接入和移动性管理功能、会话管理功能和用户平面功能部署在卫星上, 并顺利完功能测试。然而, 6G核心网如何实现对卫星接入的支持, 尤其如何设计星载6G核心网是目前国内外研究的热点和难点, 其主要原因有以下3点。

(1) 5G采用云化与控制面集中部署的方式, 对用户面流量进行集中调度。若将6G核心网集中部署, 用户数据接入后仍须传输到集中机房中才能分流到边缘, 难以为边缘节点提供低时延保障。对于星载6G核心网, 尽管前期研究工作<sup>[5]</sup>提出将地面核心网拆分为云端核心网与边缘核心网, 其中边缘侧就是卫星, 但是缺乏对网元功能的具体设计。为了支持面向天地一体化的分布式接入需求, 需要考虑将核心网分布部署并针对卫星特点进行适配改造, 在降低信令控制和数据传输开销的同时提升服务质量。

(2) 高速移动性和星地链路的动态性是低轨



卫星的固有特征<sup>[6]</sup>。卫星通过信关站与地面网络连接,但是低轨卫星高速运动会导致星地链路不稳定,发生频繁断连。卫星为用户设备(user equipment, UE)提供服务时,核心网状态通常存储在地面服务器中。当星地链路不可用时,星载核心网会因无法获取业务状态而失去服务能力。即使可以通过卫星切换与任务迁移来保证业务连续性,但是频繁迁移势必会带来信令风暴等问题。

(3) 随着用户需求增加,用户对6G服务质量提出更高的要求,UE不仅随时随地都有卫星接入需求,其中大多是计算密集、实时性需求较高的业务,而且用户需求也越来越多样化、智能化<sup>[7]</sup>。未来6G除了支持星地接入,甚至将支持地月、星际接入,业务种类交叉渗透,动态复杂,海量数据亟须高效智能处理。然而卫星资源容量有限,空间资源配置相对固化。在核心网中,控制面和数据面将面临更多业务流程与策略制定需求,因此亟须提升星载6G核心网的业务处理能力与效率。

除上述挑战外,地面与卫星的应用环境、组网架构和协议体制千差万别,卫星的接入管理、移动性管理、业务切换方式以及星座组网都是亟须解决的问题<sup>[8]</sup>。6G与卫星的融合有望具备全球、全天候、全天时的连续服务能力,将带来覆盖范围更广、通信容量更大、受地形影响更小以及灵活度更高等优势<sup>[9]</sup>。针对前述问题与挑战,本文对面向低轨卫星的星载6G核心网进行了研究,主要贡献如下。

(1) 本文提出面向天地一体化的星载6G核心网设计方案,针对前述挑战提出分布式架构,卫星离线自治与网络智能化等方面的设计内容。

(2) 本文对卫星环境下的星载6G核心网功能进行适配设计,提出星载6G核心网基本功能改造方案,包括接入和移动性管理功能、会话管理功能、分布式服务注册与发现功能等。

(3) 为了验证所提星载6G核心网的能力,本文首先通过实际部署的轻量化星载5G核心网

进行可行性验证,然后利用仿真实验证明了星载6G核心网的分布式架构优势。

## 1 相关工作

### 1.1 5G与卫星的融合演进

从5G开始,移动通信网络与卫星的融合已经成为一个重要的趋势。3GPP的非地面网络(non-terrestrial network, NTN)研究项目明确表示对NTN信道建模、新空口、卫星物联网和UE位置上报等内容开展研究,并形成相关标准<sup>[10-14]</sup>。但是5G NTN目前关注更多的是地面核心网如何有效可靠地接入卫星,并没有5G核心网上部署的具体标准规范和大规模应用案例。在无线接入方面,国际电信联盟定义了中继到站、小区回传、动中通以及混合多播场景,进一步明确了卫星支持上述场景所需的智能路由、动态缓存管理、自适应流量支持和网络功能虚拟化/软件定义网络等技术。中国通信标准化协会也成立了航天通信技术工作委员会来专门负责天地一体化相关工作<sup>[15]</sup>。另外,惠普宣布利用空间站Spaceborne Computer-2完成了24项实验,包括卫星边缘计算、5G核心网和图像处理等,在卫星数据下载和处理速度方面取得极大突破。

尼凌飞等<sup>[3]</sup>介绍了5G与卫星融合后应支持的4种典型应用场景,分3个阶段展示了5G与卫星融合演进的详细过程,并提出实现该演进所需的关键技术。王胡成等<sup>[16]</sup>在讨论5G-卫星融合网络架构的基础上强调了卫星与5G融合必须增强的关键技术。Ding等<sup>[17]</sup>基于3GPP提出的NTN架构方案从5G卫星架构、新空口和标准技术规范等角度对天地一体化展开讨论。为满足5G一体化部署,Wang等<sup>[18]</sup>利用端到端基于服务的架构的概念设计了一种基于整体服务的架构,该架构将“网络功能服务”从控制面扩展到业务面,从核心网扩展到接入网,并设计了新一代协议,在降低网络时延同时提高了系统吞吐量。Patrone

等<sup>[19]</sup>介绍了由欧洲航天局开展的卫星互联网项目,该项目旨在为5G卫星通信提供基于人工智能的网络控制器和编排器,进而指导天地一体化的资源分配过程。此外,Gopal等<sup>[20]</sup>和Bisio等<sup>[21]</sup>也讨论了5G卫星的资源管理问题。软件定义网络和网络功能虚拟化被视为5G天地一体化成功集成的一个关键因素。Boero等<sup>[22]</sup>首先调研了软件定义网络/网络功能虚拟化在卫星互联网领域的相关进展,之后从网络切片的角度总结了卫星虚拟化面临的挑战,最后给出了虚拟卫星互联网建设的路线图。

上述工作讨论了5G与卫星的集成,以及天地一体化网络架构设计等相关问题,但是天地一体化网络正在向未来泛在算力网络演进,在卫星上部署边缘应用是必然趋势,因此有必要构建天基核心网。尼凌飞等<sup>[3]</sup>在5G与卫星融合的远期阶段中展望了卫星与5G的完全融合,包括天基5G核心网、天基多接入边缘计算平台和地基5G核心网等;此外还讨论了5G和卫星融合后用户平面功能在星上部署的必要性,同时提供了一种用户平面功能裁剪方案。王胡成等<sup>[16]</sup>在展望天地一体化网络架构发展趋势时,明确了核心网星上部署可以提高系统的运行效率和业务保障质量,特别是提出并讨论了接入和移动性管理功能在卫星上部署的可行性。Liolis等<sup>[23]</sup>介绍了欧洲航天局的5G卫星项目,展示了卫星与5G核心网集成的最新工作。将基站功能部署在卫星上可以明显增强卫星的接入能力,但是卫星的管理和控制功能并未得到有效提升,大量信令还需转发到地面进行处理。为此,Han等<sup>[24]</sup>提出一种移动核心网架构,建议将接入和移动性管理功能部署在卫星上。在这项工作中,作者设计了相应的控制交互协议,在提升移动核心网架构灵活性的基础上优化了网络时延。为解决卫星快速移动带来的信令风暴和间歇性故障等问题,Li等<sup>[25]</sup>提出了星载5G核心网无状态移动设计方案,将业务状态与

核心网功能解耦,通过地理空间寻址来简化状态,冗余的状态信息保存在本地状态存储库中,在卫星上只保存必要的状态信息。

## 1.2 6G与卫星的融合演进

5G到6G的一个关键范式转换是建设天地一体化网络,通过将基站部署在卫星上,实现与地面网络的直接通信。2022年11月15日,AST SpaceMobile公司宣布成功构建了可通过标准手机直接访问的天基蜂窝宽带网络,并顺利完成在轨测试卫星BlueWalker3的通信阵列部署。星载算力的全天候全时供应对6G核心网的星上部署提出了更高要求。Kota等<sup>[26]</sup>展望了天地一体化网络的未来趋势和实现5G/6G卫星融合可能面临的挑战,重点讨论了机器学习、人工智能在处理路由、资源分配和切换决策等问题时可以提供的新思路。Corici等<sup>[27]</sup>对现有的基于服务的5G架构功能重新划分,提出一种全新的“有机6G网络”概念。所提6G核心网架构提供了更多的适应能力来降低系统复杂性。在上述工作的基础上,作者以重构和扩展5G服务化架构为目标,提出一种6G核心网的无基础设施服务架构,重点对功能划分过程进行简化,对时延进行优化,并提升部署运行的灵活性<sup>[28]</sup>。5G到6G意味着从“万物互联”向“万物智联”的转变,人工智能被用于处理高速率连接、低时延高可靠接入等需求,核心网智能化也成为焦点。为此,Chouman等<sup>[29]</sup>深度调研了网络数据分析功能(network data analytics function, NWDAF)的智能分析方法,并将NWDAF集成到开源5G网络中收集相关数据,提供了未来6G的发展动机。

之前的工作<sup>[30]</sup>已经对6G核心网架构和星载核心网部署进行了探究,该工作考虑了一种6G场景中边缘服务器和用户平面功能联合部署方案,通过分析边缘服务器和用户平面功能之间的放置关系逐渐修剪解空间,结果证明提出的边缘服务器和用户平面功能(user plane function,



UPF) 联合部署算法有效优化了服务时延。此外, 基于章鱼神经网络系统设计了一种面向 6G 核心网的认知服务架构, 并提供了实现该架构的使能技术, 包括网络统一语义、多态接口、服务连续性保证和下一代网络切片等<sup>[5]</sup>。同时, 依托提出的天算星座平台<sup>[4]</sup>, 成功部署了接入和移动性管理功能、会话管理功能和用户平面功能, 并完成基本功能验证。上述前期工作为星载 6G 核心网的研究与开发奠定了良好的基础。

从目前 6G 核心网相关工作来看, 大多数工作还停留在 6G 核心网架构设计与设想阶段, 对 6G 核心网在卫星上部署的深入研究还相对匮乏。为了全面提升卫星的智能性、自主性, 实现“业务上天、服务在轨”的目标, 迫切需要对 6G 核心网的星上部署展开深入研究。

## 2 星载 6G 核心网架构与功能设计

目前尚未对 6G 以及核心网与接入网之间的功能划分做出明确规定, 但是认为在 6G 中继续采用基于服务的架构是自然的<sup>[31]</sup>。为此, 本文设计星载 6G 核心网的主体思想是: 星载 6G 核心网

在继承地面核心网功能的基础上, 提供扩展的卫星服务能力。星载 6G 核心网采用基于云边体系的分布式架构, 星载 6G 核心网示意图如图 1 所示。将 6G 核心网分为云核心网和边缘核心网, 其中云核心网就是地面核心网, 边缘核心网就是各个星载核心网, 边缘核心网将进一步下沉到网络边缘。星载 6G 核心网网元类型的部署遵循业务导向原则, A 星表示部署了完整的 6G 核心网功能, B 星和 C 星根据业务需求仅部署了部分网元。

星载 6G 核心网中包含的基本功能单元有: 接入和移动性管理功能 (access and mobility management function, AMF), 负责核心网与陆基、天基和空基中各种 UE 的连接, 允许 UE 通过星载 6G 核心网获得注册、鉴权等服务, 同时为 UE 和星载 6G 核心网提供建立和维持连通性的能力, 确保核心网与 UE 之间、UE 与 UE 之间在移动时

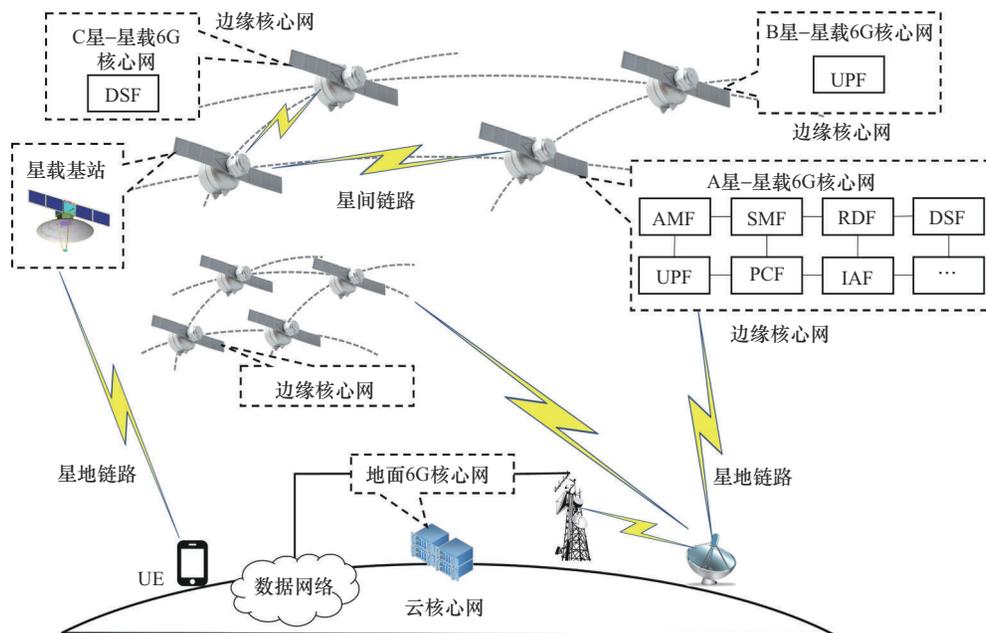


图 1 星载 6G 核心网示意图

and discovery function, RDF), 面向天地一体化的全分布式场景, 支持分布式的UE服务注册与发现, 通过保存网络功能配置文件, 支持服务使用者直接发现并请求合适的服务提供者, 当星载6G核心网的功能实例发生变化时, RDF的配置文件信息会自动更新; 策略控制功能 (policy control function, PCF), 为星载6G核心网提供与会话管理相关的策略控制能力和与非会话管理相关的策略控制能力, 前者包括服务质量 (quality of service, QoS) 策略控制和计费控制, 后者包括接入和移动性策略控制、用户接入选择以及协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 会话选择相关策略控制等; 数据存储功能 (data storage function, DSF), 为星载6G核心网的本地数据存储库, 保存核心网产生的各类数据以及各功能单元的配置文件; 智能分析功能 (intelligence analysis function, IAF), 主动感知并以智能数据流的形式收集6G核心网中其他网元数据, 执行分析并将分析结果与其他功能单元共享; UPF, 负责星载6G核心网中用户面流量的路由和转发。星载基站是指在卫星上部署了基站设备, 可以对UE的信令与数据进行处理, 主要完成数据网络和UE之间的通信和管理功能。

在基于云边体系的分布式核心网架构中, 云边核心网之间、边缘核心网之间、网元之间以及网元内部函数之间采用基于接口的灵活通信方式, 核心网、网元通信逻辑架构如图2所示。将原有网元按照功能细化拆分为一个个独立函数, 当面向特定业务需求时, 函数自由组合装配为一个网元, 执行特定功能。此外, 将网元的业务逻辑与所需的上下文数据、UE状态数据拆解, 将数据拆分为3级: 网元内数据、网元间数据、核心网间数据。网元内部函数共享网元内数据, 网元之间共享网元间数据, 不同核心网之间或云与边核心网之间共享核心网间数据。借助灵活的接口、定制化的功能以及按需的数据, 函数级别的网元功能将提供更加细粒度与精准的网络服务, 简化核心网复杂度的同时提升服务效率, 降低运营成本。

### 2.1 星载6G核心网的接入和移动性管理功能

低轨卫星具有高速移动性, 导致UE接入在卫星之间频繁切换。切换类型有以下两种。

(1) 不同卫星间的切换, 低轨卫星的覆盖区域会快速变化, 一颗低轨卫星只为某个UE提供10 min左右的持续接入。

(2) 同一卫星内波束间的切换, 对于采用多波束的低轨卫星, 同一波束对某个UE只能提供

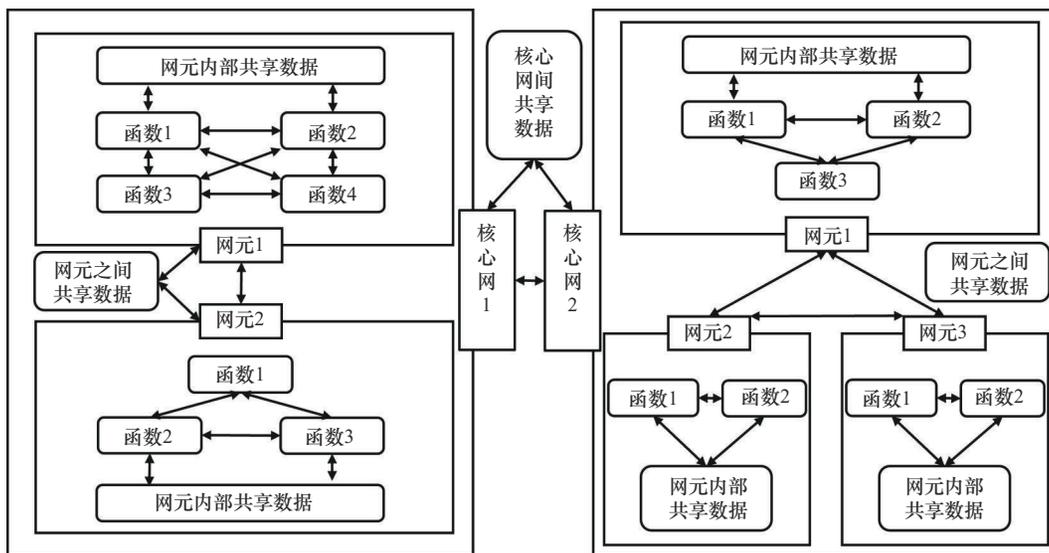


图2 核心网、网元通信逻辑架构



几分钟的覆盖能力。

由于切换频繁，卫星间以及波束间切换必须迅速、高效。此外，卫星小区内信号强度分布较为均匀，可近似为一个定值，但是在小区边缘，信号强度会迅速下降，传统的基于信号无线资源管理测量的切换机制无法适用于星载核心网，尤其当UE接入卫星时，需要多次信令交互。因此需要针对卫星的信道特点，对传统的接入管理功能进行适配改造。

针对UE在同一卫星的波束间频繁切换的问题，可以考虑利用星历信息对卫星轨道进行估计，提前预知需要切换的波束，为UE预先分配信道来降低切换时延。针对UE在卫星间的切换，可以考虑采用基于UE位置和卫星星历的切换触发机制，具体流程如下。

(1) UE根据全球导航卫星系统定位和卫星星历计算当前所处位置。

(2) 如果UE发现已进入卫星小区重叠覆盖区域，则向原卫星上报当前位置。

(3) 原卫星收到UE上报信息后，根据上报信息和星历信息判断是否需要切换。

(4) 如果需要实施切换，则原卫星向目的卫星发起切换请求。

(5) 目的卫星收到切换请求后，为UE提前分配信道资源，向原卫星返回切换请求确认。

(6) UE按照收到的无线资源控制重配置流程实施切换。

对传统的接入管理功能进行卫星场景下的优化设计，考虑简化传统的4步握手接入流程，改为2步握手接入流程。在5G中，UE接入星载基站时需要经过4步接入流程。

(1) UE通过随机接入信道向基站发送随机接入前导码。

(2) 基站通过下行共享信道向UE发送随机接入响应。

(3) UE通过上行共享信道向基站发送基于

竞争的随机接入资源请求数据。

(4) 基站通过下行共享信道向UE发送竞争解决消息。

简化后的2步接入流程如下。

(1) UE通过随机接入信道向基站发送随机接入前导码和资源请求数据。

(2) 基站通过下行共享信道向UE发送随机接入响应。

与4步接入流程不同的是，2步接入流程将接入前导码和资源请求数据在同一时刻、同一信道以竞争的方式发送给星载基站，减少UE与星载基站之间的交互，从而有效降低接入时延。

在地面移动通信网络中，由于UE处在移动当中，核心网需要根据用户业务来转换UE状态，在UE移动过程中也能保障数据传输的连续性和稳定性。当UE从当前服务区域移动到另一个服务区域时，原服务区域的基站会通过AMF或隧道将UE状态迁移到新服务区域的基站中，AMF的状态也会迁移到新的AMF中。但是在低轨卫星场景中，卫星移动速度高达27 000 km/h，卫星与地面站之间的连接更加不稳定。此外，受限于星地链路的上下行带宽，业务状态的传输更加困难，若大量业务状态传向卫星，可能会引发“信令风暴”<sup>[25]</sup>。卫星移动还会带来服务迁移问题，原卫星与地面站断连后，需要新卫星为当前用户业务提供服务，因此目标卫星的选择以及新连接的建立都是需要考虑的。可以看出，在卫星上部署6G核心网给移动性管理带来的挑战包括卫星切换、服务迁移、状态迁移等。

为解决卫星移动带来的服务迁移以及目标卫星选择问题，基于事件驱动型切换方法，通过对业务的实时感知，综合判断网络与业务状态信息，实现智能化的切换决策，降低星地网络的固有特征对用户业务的影响。由于卫星轨迹具有可预测性，可提前判断即将过顶的卫星状态，决定是否将该卫星作为目标卫星进行任务迁移。对于

UE 状态迁移问题，基于非数据层面中的用户信令流和业务信息流，以及星地网络之间的链路信息、资源信息、配置信息等，探索基于感知信息的智能化迁移决策机制，通过分段式迁移策略，适应星上资源受限的环境。将业务状态与移动性管理功能解耦，设计无状态迁移方案，需要确定哪些业务状态要与星载 6G 核心网解耦，星载 6G 核心网如何在不存储这些状态的前提下工作。此外，地面核心网实现的对 UE 的识别、配置更新以及安全性等通用功能也是星载 6G 核心网 AMF 需要提供的能力。

## 2.2 星载 6G 核心网的会话管理功能

卫星与地面环境相比，前者具有高速移动和星地链路不稳定等特点，同时卫星通信容易受天气影响和空间电磁辐射干扰，通信质量呈动态变化。在地面 5G 核心网的 PDU 会话设计中，并没有针对卫星的高速移动性和链路动态性做出特定配置。

星载 6G 核心网 SMF 遇到的第一个挑战是由卫星的高速移动带来的 UPF 锚点切换问题。在地面场景中，SMF 和 UPF 位置是固定的，由于 UE 移动而触发 UPF 切换的概率相对较低。即使 UE 大范围移动离开当前 UPF 服务区域，也通常会采用插入中继 UPF 的方式维持原有会话流程。当 SMF 和 UPF 在卫星上部署时，UE 可以通过地面卫星基站或者卫星基站接入卫星。在 UE 利用卫星进行通信过程中，作为 UPF 锚点的卫星不断移动必然会造成原有锚点丢失和会话流程失效，进而导致通信服务失败。因此，为了保障 PDU 会话的连续性、可靠性以及 UPF 锚点的有效更新，需要设计新的满足卫星高速移动的 SMF 和 UPF 在卫星上部署的方案。

第二个挑战是链路不稳定导致的丢包和状态无法同步问题。在地面通信网络中，5G 核心网 PDU 会话建立和更新都会收到数据网络的及时响应，因此 SMF、UPF 以及 PCF 等相关网元对该

PDU 会话的状态是同步的。但是在星载 6G 核心网中会出现截然不同的情况。例如，PDU 会话已完整建立，用户面流量正常交付。此时 PDU 会话状态发生改变，SMF 需要从 PCF 获取 PDU 会话相关策略，若此时发生链路中断或波动，SMF 无法与 PCF 同步 PDU 状态信息，SMF 会默认 PCF 不可用，只能使用默认策略配置向用户面路由流量，因此产生了网元状态不一致和丢包问题。若地面通信网络中发生状态不一致的情况，通常会重新启动 PCF 同步信息，但是星地链路不稳定会导致时延增大和丢包率过高等问题。因此需要设计新的星载核心网状态同步方案。

针对第一个问题，可以在星载 SMF 中维护一个公共用户标识映射表。考虑 SMF 和 UPF 部署在一颗卫星上的情况：当 UE 通过地面基站或卫星基站接入星载核心网时，星载 SMF 会为 UE 分配一个初始 UPF 作为锚点，并分配初始用户标识，初始 UPF 锚点为其分配初始接入标识，星载 SMF 更新用户标识映射表用以维护初始用户标识和初始接入标识的映射关系。卫星移动导致 UE 连接不可达时，初始星载 SMF 会感知即将与 UE 连接的新卫星，同时更新用户标识映射表中初始用户标识和初始接入标识的映射信息，UE 将当前接入的 UPF 锚点切换为新连接卫星上的 UPF 锚点，初始用户标识保持不变，初始接入标识更新为新 UPF 锚点分配的新标识。所有星载 SMF 共同维护更新后的用户标识映射表。UPF 锚点切换的简化流程如图 3 所示。

针对第二个问题可以考虑状态延迟响应机制。星地链路的稳定性受多方面因素干扰，包括不可避免的环境和天气因素。若将所有网元部署在同一颗卫星上，网元之间的通信可以忽略链路因素的干扰，因此可以保障网元之间的状态同步。若 SMF 与其他网元部署到不同的卫星上，可以考虑设计一种状态延迟响应机制，为网元之间的通信设置一个延迟响应阈值，该阈值可以相对

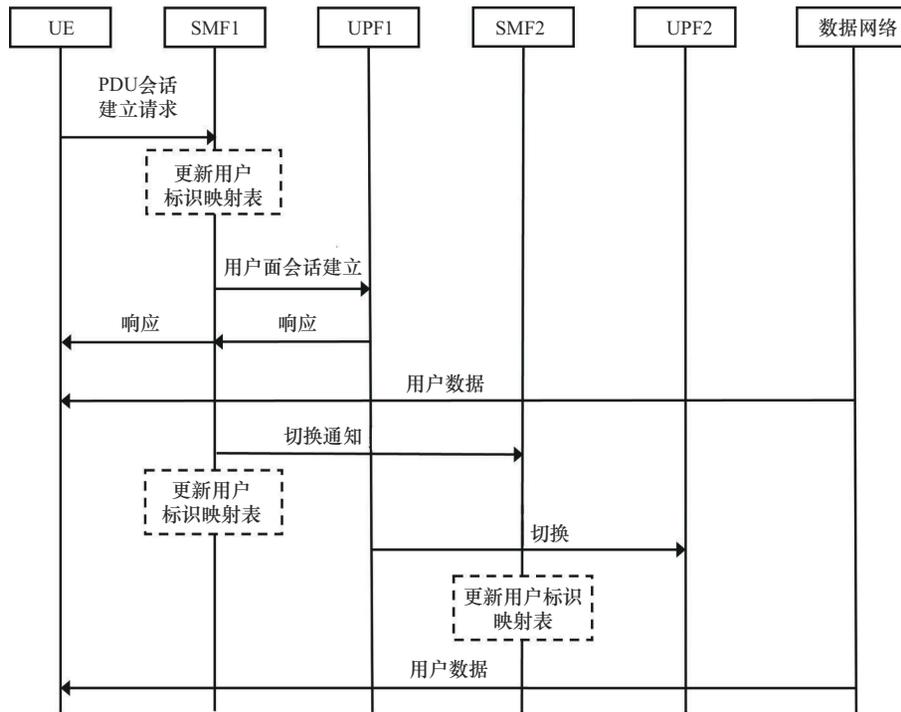


图3 UPF锚点切换的简化流程

较大，规定在该阈值之内的响应都是有效的，相当于为链路故障提供一种容错机制。若当前PDU会话状态因为链路故障而无法同步，那么可以在阈值范围内等待链路回复再进行状态同步。但是这种机制无法满足对实时性要求较高的业务，此时可以考虑路径切换、服务迁移、状态复制等方案。

### 2.3 星载6G核心网的服务注册与发现功能

在AMF、SMF等网元实现星上部署的前提下，如果卫星上没有部署RDF，那么卫星上的网元需要在地面核心网的RDF进行登记。由于星地链路稳定性差，6G服务质量和性能将会受到影响，需要将RDF部署在卫星上。

若将RDF部署在低轨卫星，AMF、SMF等网元在RDF中进行登记注册，由此开展核心网服务。部署在低轨卫星的RDF的注册和服务发现能力比较稳定，服务质量较好，但是服务范围相对较小，仅能负责单星或者星群的服务注册与发现。若将RDF部署在高轨卫星，可以充分利用高轨卫星覆盖范围大的优势，能够实现星座级服务

注册与发现，但是这种方案受制于星间链路的稳定性和通信成本。

以上两种部署方式属于集中式的服务发现与注册，这样能够保证整个系统数据的一致性，且结构简单、管理方便。该模式存在的问题是一旦出现单点故障，整个系统可能都会出现通信问题，导致系统的可靠性不高，而且网元与网元之间通信过程较为繁杂，时延较高。分布式核心网架构是未来6G核心网的研究方向之一。如果在卫星上部署分布式的RDF，将进一步提高整个卫星核心网的自组织能力和负载均衡能力，这也是实现分布式星载6G核心网架构的基础。

在星载6G核心网中，每个网元都是通信网络中的一个节点，要解决节点之间的通信问题，可采用分布式哈希算法。该算法旨在保证各个节点可以进行端到端通信，同时保证任意一条端到端路径的路由长度尽可能短，通信时延尽可能低，此外还要保证任一节点的邻节点尽可能少，以降低通信开销。该算法用于星载核心网存在的

问题是,核心网规模和算法效率存在一定互斥性,即分布式哈希算法在节点较多的情况下反而效果更好。同时,考虑并非所有卫星节点都具有足够的存储能力和计算能力,可以将同轨卫星或者小范围内的卫星看作一个卫星簇,簇内通过一个集中的节点进行集中服务注册与发现,簇与簇之间通过分布式哈希算法连接成一个有机体,进行分布式的服务注册与发现。

分布式服务注册与发现架构可以划分为基础设施层和服务注册与发现层,两层分别负责处理特定的任务,实现控制逻辑和数据传输逻辑的分离,方便整个架构后期的维护和扩展。基础设施层提供了网络的基础设施,包括物理设备、网络连接、系统资源等。每个卫星节点上部署一个或多个网元,各个网元提供了核心网所需的关键功能和服务。服务注册与发现层提供核心网服务的注册、更新和访问功能。该层将基础设施层的物理节点等实体根据ID等信息进行映射,将节点和注册信息都映射至同一个虚拟环中,以此确定在该虚拟环中的相对位置。该层通过哈希运算对节点和信息进行映射。

基于分布式的RDF架构,进一步设计分布式星载6G核心网数据备份方法。由于6G核心网部署在不可靠的太空环境中,网元节点故障时有发生。在服务注册与发现过程中,网元发生故障一方面会导致服务注册信息丢失,另一方面会使网元实例的服务无法及时更新。例如,当UE执行会话建立等流程时,服务消费者将对需要调用的服务进行发现过程,假如服务信息丢失或节点不可达,将无法获取正确的服务提供者信息。因此,星载6G核心网的数据备份工作也极为重要。

## 2.4 其他功能

PCF提供基于策略的用户服务,包括控制用户和数据会话、控制数据流规则和管理等。常用的策略控制一般分为接入移动性相关策略控制和会话管理相关策略控制。PCF为AMF提供与接入

和移动性管理相关的策略,能够评估由AMF收到的事件触发的运营商策略。AMF在注册、接入、切换等过程中,PCF将会随时根据运营商定义的策略对其进行选择和限制。SMF提供的会话管理服务也会受PCF的控制,包括计费、QoS、使用情况监控、流量转向等服务策略。除此之外,PCF也能为第三方服务提供策略支持。在卫星上部署PCF可以为网络运营商提供更广阔的商业和工业发展空间,为卫星商用、卫星智能化和开放化的实现奠定良好基础。

DSF负责保存星载6G核心网的各类数据以及网络功能的配置文件,关键数据包括签约数据、定义各种网络类型的数据、用户策略数据等。DSF允许一个功能单元主动发现并使用目标功能单元提供的服务,当星载6G核心网功能单元实例发生变化时,其存储的网络功能配置文件会自动更新。当星地连接不可用时,星载6G核心网会请求DSF获取UE服务需要的数据,之后所有服务都基于该数据库运行。该功能单元可以有效支撑星载6G核心网的离线自治。

5G核心网的数据收集与分析依赖大量网元之间的服务调用,若数据发生变化,需要相关网元进行服务更改,存在模式固定、流程烦琐和变化迟滞等问题。本文通过IAF为星载6G核心网提供智能服务,以智能认知流的形式定义核心网数据收集和分析流程并将其作为触发事件。认知流是由各个网元提取的业务数据和环境状态数据,在数据收集时,其他网元作为数据提供方,拥有简单的学习推理能力,将原始数据通过模型智能筛查后,生成智能数据流,主动向IAF推送本网元的关键数据,因此数据收集流程中不需要网元之间预先进行服务调用。IAF收到数据后,需要向数据提供方异步反馈此次推送数据的质量指标,如果后续数据收集发生变化,仅需要对返回的数据质量指标进行修正,反馈至边缘端模型,调整学习推理过程。IAF可以采用深度学习、强化学习等网络模型进行训练推理,依据训



练结果做出分析与决策，将决策结果下发给其他网元后执行该决策操作，进而产生新的认知流。将认知流作为触发事件可以将消息处理过程和认知对象解耦，使所有认知流消息的处理逻辑统一，从而完成全域信息的感知。数据源端网元训练的模型初态可能存在不可用问题，因此允许 IAF 利用标准数据集实现数据源端网元模型的预训练，将模型下发至数据源网元处，利用网元处产生的新数据和来自 IAF 的智能数据的反馈指标进行微调。该功能单元的实现可以有效支撑星载 6G 核心网的智能化。

### 3 实验验证

为证明所提星载 6G 核心网架构的有效性，首先进行了星载 5G 核心网实验，证明在卫星上部署核心网是可行的。基于该可行性，对星载 6G 核心网进行了仿真实验，测试了分布式网络架构中用户访问数据存储功能以及分布式服务注册与发现功能的性能。

#### 3.1 可行性验证

基于云原生能力对低轨卫星“宝酝号”进行升级改造，成功实现卫星上的容器部署。宝酝号是天算星座发射的第一颗先导卫星，同时是全球首颗具备云原生能力的卫星，主要为天算星座中的计算与通信平台开展前期试验验证<sup>[4,32]</sup>，星地通信利用 X 波段。以云原生平台作为应用支撑，将轻量级星载 5G 核心网（包含接入和移动性管理功能、会话管理功能和用户平面功能）以容器的方式部署在宝酝号上，基于该星载 5G 核心网可以实现用户注册与会话建立等基本流程，并实现了与地面 5G 专网的互联互通。本次实验对宝酝号上部署的星载 5G 核心网实验进行了简化，为星载 6G 核心网中信令交互的可行性提供支撑依据。于 2022 年 11 月 5 日利用位于铜川的地面站与宝酝号建立连接。单次通话时长持续 30 s，测试在每秒间隔内数据包发送时延，单次通话数据包发送时延如图 4 所示。

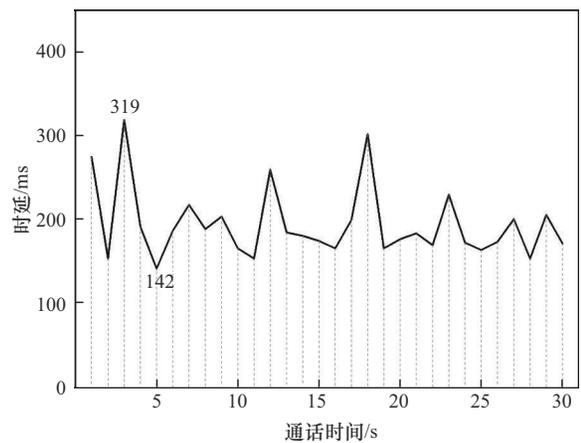


图 4 单次通话数据包发送时延

在单次通话测试中，第 2~3 s 中的数据包发送时延最高，为 319 ms；第 4~5 s 内的数据包发送时延最低，为 142 ms。因此，通话过程的时延抖动为 177 ms。整体来看，此次通话过程的数据包发送时延保持在一个相对稳定的水平，因此可以通过星载核心网有效支持通话功能。

之后在两台客户机之间建立了 10 次通话流程，得到了每次通话的平均时延与平均带宽，10 次通话平均时延与带宽如图 5 所示。多次通话的测试结果表明该通话方式整体性能稳定，可以保证较低的时延。

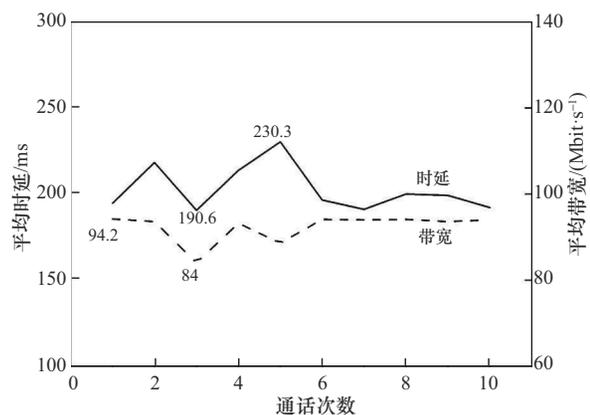


图 5 10 次通话平均时延与带宽

上述实验表明在卫星上部署核心网是可行的，为后续 6G 核心网的星上部署提供了理论与实践依据。随着移动通信技术的发展以及与卫星

的深度融合演进，UE可以通过部分无线波段直接接入低轨卫星核心网中。当提供核心网服务的地面基础设施损坏时，卫星可以为UE建立应急通信链路，提供一部分核心网的服务，将流量路由到任意数据网络。考虑卫星覆盖的广阔区域，在偏远地区以及海洋航空等无法接入地面网络的UE可以接入星载核心网，在紧急情况下可以满足特定的应急通信需求。

### 3.2 星载6G核心网仿真验证

基于5G核心网成功在卫星上部署并顺利验证的事实，开展星载6G核心网仿真实验。基于STK的仿真实验拓扑如图6所示，共包含6个轨道面，每个轨道面均匀部署12颗卫星，轨道高度为1 000 km，卫星倾角为30°。每颗卫星与同轨道相邻的两颗卫星以及异轨的两颗邻居卫星建立星间链路，形成+Grid卫星拓扑。由于目前不具备在真实卫星上部署6G核心网的条件，先对所提的部分方案进行仿真验证，而分布式部署是星载6G核心网的架构基础，离线自治、网元智能化等功能可以在该架构基础上展开，因此先针对星载6G核心网的分布式架构展开仿真实验。参照图1所示的星载6G核心网架构在STK模拟的卫星拓扑上进行了部署。

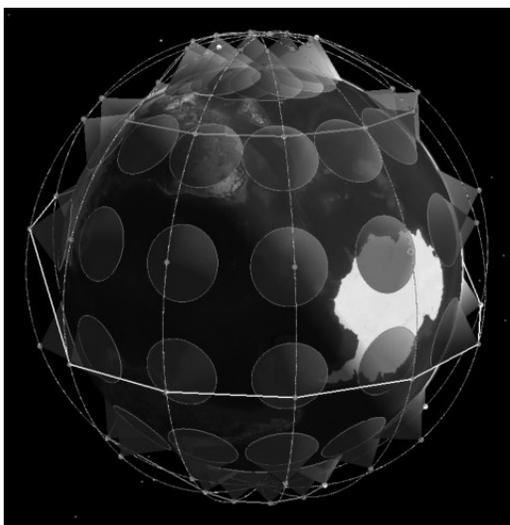


图6 基于STK的仿真实验拓扑

#### (1) 网元通信时延仿真验证

星载5G核心网采用集中式部署模式，数据存储功能部署在唯一卫星上，用户接入卫星后需要与数据存储功能所在卫星通信以获取数据。星载6G核心网采用分布式部署模式，数据存储功能分别部署在若干颗卫星上，并维护该核心网内部数据与状态的一致性，根据用户接入卫星的位置选取数据仓库提供服务。在固定的卫星拓扑条件下，测试用户接入不同位置的卫星访问数据存储功能的时延，用户接入不同卫星的数据获取时延如图7所示。

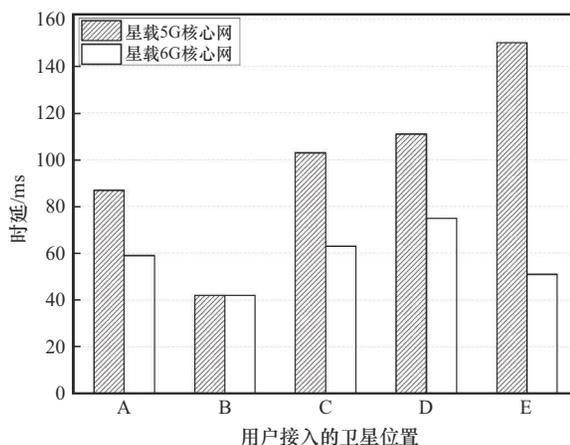


图7 用户接入不同卫星的数据获取时延

在星载5G核心网中，由于数据存储功能集中部署在一颗卫星上，用户接入卫星后需要选取一条通路来访问目标卫星的数据存储功能，在此过程中可能跨越较多跳数的卫星，导致较高时延。而在星载6G核心网中，数据存储功能分布部署在多颗卫星上，用户接入卫星后可以就近访问数据存储功能，避免了多跳路由，因此通信时延比星载5G核心网的时延要低。

由于卫星拓扑会随着卫星移动而发生变化，需要考虑时变的卫星拓扑给网络服务带来的影响。测试在不同的卫星拓扑条件下，即不同时刻用户接入获取数据服务的时延，用户在不同时刻接入的数据获取时延如图8所示。

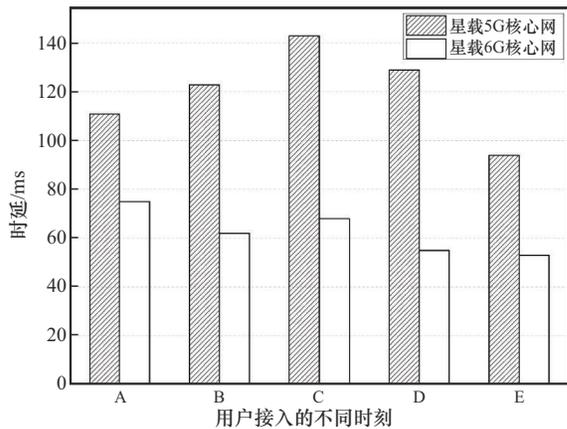


图8 用户在不同时刻接入的数据获取时延

用户接入星载6G核心网后访问数据存储功能,该过程本质是星载6G核心网网元之间彼此通信。即使在不同时刻接入卫星,由于分布式部署的优势,用户在星载6G核心网中访问数据存储功能的时延比在星载5G核心网中的时延明显降低。这是因为用户接入5G核心网后需要访问唯一的、集中的数据存储功能,而星载6G核心网提供分布式数据存储功能,用户可以就近访问。整体来看,集中式星载5G核心网网元之间的平均通信时延为109.3 ms,而分布式星载6G核心网的平均通信时延为60.3 ms,时延降低了44.8%。由此说明面向未来天地一体化的星载6G核心网的分布式部署是有必要的。

#### (2) 分布式服务注册与发现功能仿真实验

该仿真实验验证了分布式星载6G核心网的服务注册与发现功能,并与5G核心网的集中式服务注册与发现进行了对比。服务注册时延对比如图9所示,服务发现时延对比如图10所示。

在多用户请求并发向星载核心网进行服务注册与发现时,由于集中式星载5G核心网通过服务注册与发现功能进行服务注册与发现,单一节点集中管理所有服务,任意网元在进行服务注册和服务发现时都需要向服务注册与发现功能所在的卫星节点发送请求并等待响应。在需要服务频繁、快速响应的场景下,集中式会形成性能瓶颈、出

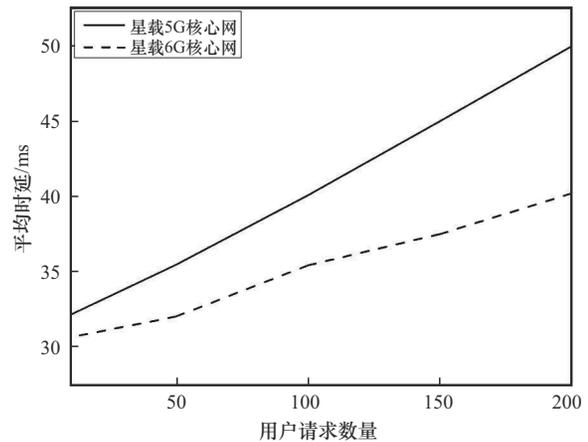


图9 服务注册时延对比

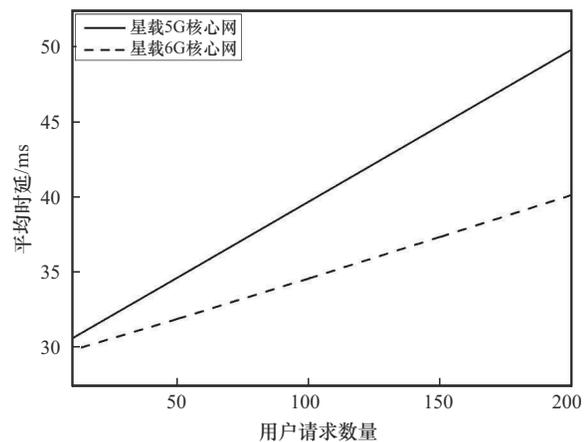


图10 服务发现时延对比

现请求阻塞等问题,所以时延会有所增加。而星载6G核心网的分布式服务注册与发现方法同时将各类请求分散至不同的节点,避免了大量请求同时涌入同一节点的情况,进而明显降低了整体请求的时延。随着并发用户请求数量增加,星载5G核心网和星载6G核心网的服务时延都会有所增加。整体来看,5G集中式服务注册、服务发现平均时延分别为40.53 ms、40.04 ms,而6G分布式服务注册、服务发现的平均时延为35.18 ms、34.91 ms,分别降低13.2%、12.8%。

## 4 结束语

### 4.1 总结

卫星通信在覆盖、可靠性及灵活性方面的

优势能够弥补地面移动通信的不足, 卫星通信与地面核心网的融合能够为用户提供更高质量的服务体验, 并进一步连通空、天、地、海多维空间, 形成一体化的网络格局。本文将6G核心网与卫星的融合作为切入点, 首先在分析传统核心网上星面临挑战的基础上, 提出星载6G核心网架构; 然后, 基于该架构, 详细介绍了不同网元上星需要做出的适配改造, 设计了新网元; 最后, 设计了星载6G核心网验证方案, 通过实际部署与仿真测试, 验证了核心网上星的可行性。

## 4.2 未来展望

星载6G核心网是未来积极探索的方向。首先, 对于网元部署方式, 基于云边体系的星载6G核心网架构需要依据具体业务需求来决定网元如何部署, 随着卫星技术的不断进步, 星载核心网功能有望更加完善。未来将深入探讨业务驱动的星载网元部署方案。其次, 在地面5G核心网中, 移动性管理主要是由UE的跨小区运动引起的。但是在卫星场景中, 相对于UE运动, 低轨卫星高速运动将成为影响移动性管理的关键因素。在已有的解决方案中<sup>[25]</sup>, 通过无状态管理, 将星载核心网功能与业务状态解耦, 可以避免卫星移动带来的核心网状态管理问题, 但是该方案可能面临用户端协议栈更新与状态同步的问题。当在卫星上部署更加完善的核心网功能时, 需要其他移动性管理方案来保障星载核心网正常运行。之后, 星地网络全IP化是大势所趋, 可以借助与云边协同相关技术实现地面-卫星之间的有效协同, 甚至是卫星侧的离线自治, 云原生技术将在星地融合中发挥重要作用。最后, 未来也将逐步开展更加全面的星载6G核心网功能验证, 包括离线自治、智能化能力实现等, 为6G核心网与卫星的融合提供参考。

## 参考文献:

- [1] RAY P P, KUMAR N, GUIZANI M. A vision on 6G-enabled NIB: requirements, technologies, deployments, and prospects[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(4): 120-127.
- [2] 张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G移动通信技术展望[J]. *通信学报*, 2019, 40(1): 141-148.  
ZHANG P, NIU K, TIAN H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications[J]. *Journal on Communications*, 2019, 40(1): 141-148.
- [3] 尼凌飞, 胡博, 王辰, 等. 5G与卫星网络融合演进研究[J]. *移动通信*, 2022, 46(1): 51-57.  
NI L F, HU B, WANG C, et al. Research on fusion evolution of 5G and satellite network[J]. *Mobile Communication*, 2022, 46(1): 51-57.
- [4] XING R L, MA X, ZHOU A, et al. From earth to space: a first deployment of 5G core network on satellite[J]. *China Communication*, 2023, 20(4): 315-325.
- [5] LI Y Z, HUANG J, SUN Q B, et al. Cognitive service architecture for 6G core network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(10): 7193-7203.
- [6] VASISHT D, SHENOY J, CHANDRA R. L2D2: low latency distributed downlink for LEO satellites[C]//*Proceedings of 2021 ACM International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*. New York: ACM Press, 2021: 151-164.
- [7] WANG C, LIU L, JIANG C X, et al. Incorporating distributed DRL into storage resource optimization of space-air-ground integrated wireless communication network[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2022, 16(3): 434-446.
- [8] GUO Y, LI Q, LI Y Z, et al. Service coordination in space-air-ground integrated network[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(5): 168-173.
- [9] MUKHERJEE M, MUKHOPADHYAY S, ROY S. Design of wideband planar antenna with inverted I-shaped tuning stubs for application in 5G, satellite communication, and Internet of things[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2022, 35(11): 1-17.
- [10] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non terrestrial networks: TR38.811[R]. 2017.
- [11] 3GPP. Solutions for NR to support non terrestrial networks



- (NTN): TR38.821[R]. 2018.
- [12] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): non-terrestrial networks (NTN) related RF and co-existence aspects: TR38.863[R]. 2018.
- [13] 3GPP. Study on management aspects of IoT NTN enhancements: TR28.841[R]. 2022.
- [14] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS22.261[S]. 2022.
- [15] 王爱玲, 潘成康. 星地融合的3GPP标准化进展与6G展望[J]. 卫星与网络, 2020(9): 58-61.
- WANG A L, PAN C K. 3GPP standardization progress and 6G prospect of satellite ground integration[J]. *Satellite and Network*, 2020(9): 58-61.
- [16] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 融合卫星通信的5G网络技术研究[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 535-542.
- WANG H C, XU H, SUN S H. Research on 5G network technology integrated with satellite communication[J]. *Radio Communication Technology*, 2021, 47(5): 535-542.
- [17] DING R, CHEN T T, LIU L, et al. 5G integrated satellite communication systems: architectures, air interface, and standardization[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). [S.l.: s.n.], 2020: 702-707.
- [18] WANG X Y, SUN T, DUAN X D, et al. Holistic service-based architecture for space-air-ground integrated network for 5G-advanced and beyond[J]. *China Communications*, 2022, 19(1): 14-28.
- [19] PATRONE F, BACCI G, GALLI A, et al. Data-driven network orchestrator for 5G satellite-terrestrial integrated networks: the ANChOR project[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [20] GOPAL R, BENAMMAR N. Framework for unifying 5G and next generation satellite communications[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 16-24.
- [21] BISIO I, LAVAGETTO F, VERARDO G, et al. Network slicing optimization for integrated 5G-satellite networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [22] BOERO L, BRUSCHI R, DAVOLI F, et al. Satellite networking integration in the 5G ecosystem: research trends and open challenges[J]. *IEEE Network*, 2018, 32(5): 9-15.
- [23] LIOLI P K, CAHILL J, HIGGINS E, et al. Over-the-air demonstration of satellite integration with 5G core network and multi-access edge computing use case[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [24] HAN Z Z, XU C, LIU K, et al. A novel mobile core network architecture for satellite-terrestrial integrated network[C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [25] LI Y J, LI H W, LIU W, et al. A case for stateless mobile core network functions in space[C]//Proceedings of 2022 ACM International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 2022: 298-313.
- [26] KOTA S, GIAMBENE G. 6G integrated non-terrestrial networks: emerging technologies and challenges[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [27] CORICI M, TROUDT E, MAGEDANZ T, et al. Organic 6G networks: decomplexification of software-based core networks[C]//Proceedings of 2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit). [S.l.:s.n.], 2022: 541-546.
- [28] CORICI M, TROUDT E, MAGEDANZ T. An organic 6G core network architecture[C]//Proceedings of 2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN). [S.l.:s.n.], 2022: 1-7.
- [29] CHOUMAN A, MANIAS D M, SHAMI A. Towards supporting intelligence in 5G/6G core networks: NWDaf implementation and initial analysis[C]//Proceedings of 2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). [S.l.:s.n.], 2022: 324-329.
- [30] LI Y Z, MA X, XU M W, et al. Joint placement of UPF and edge server for 6G network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(22): 16370-16378.
- [31] MOGYORÓSI F, BABARCZI P, ZERWAS J, et al. Resilient control plane design for virtualized 6G core networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(3): 2453-2467.

[32] WANG S G, LI Q, XU M W, et al. Tiansuan constellation: an open research platform[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE). Piscataway: IEEE Press, 2021: 94-101.



马骁 (1991- ), 女, 博士, 现就职于北京邮电大学计算机学院和北京邮电大学深圳研究院, 主要研究方向为边缘计算、卫星计算和5G/6G核心网。

[作者简介]



王尚广 (1982- ), 男, 博士, 北京邮电大学计算机学院教授、副院长, 北京邮电大学深圳研究院副院长 (兼), 主要研究方向为服务计算、移动边缘计算、卫星计算和5G/6G核心网。



邢若飏 (1997- ), 男, 现就职于北京邮电大学计算机学院, 主要研究方向为5G/6G核心网和卫星计算。



王超 (1996- ), 男, 现就职于北京邮电大学计算机学院和北京邮电大学深圳研究院, 主要研究方向为5G/6G核心网和卫星计算。



周傲 (1987- ), 女, 博士, 北京邮电大学计算机学院副教授, 主要研究方向为服务计算、移动边缘计算和卫星计算。