

面向6G的低轨卫星通信系统移动性管理技术

陆 航, 张佳鑫, 王海旭

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 低轨卫星系统凭借其全球覆盖、低时延等独特优势, 结合星地直连的通信方式, 在增强全球通信能力方面展现出巨大潜力, 将成为下一代通信网络的重要组成部分。然而, 该系统在移动性管理上面临诸多挑战, 包括频繁的卫星切换、复杂的信令交互以及切换资源的分配管理等。为了推动低轨卫星移动性管理的发展, 首先围绕架构设计、切换机制、业务连续性管理方面概述了近年来在该领域的相关进展, 然后给出面向6G的低轨卫星移动性管理增强技术, 最后探讨未来面临的机遇与挑战。

关键词: 低轨卫星; 移动性管理; 6G卫星通信

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025005

Mobility Management Technologies for 6G-Oriented Low Earth Orbit Satellite Communication Systems

LU Hang, ZHANG Jiaxin, WANG Haixu

Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: The LEO satellite system, with its unique advantages such as global coverage and low latency, combined with the direct satellite-to-ground communication method, has shown great potential in enhancing global communication capabilities and will become an important part of next-generation communication network. However, the system faces many challenges in mobility management, including frequent satellite handovers, complex signaling interactions, and allocation and management of handover resources. To better advance the development of mobility management in LEO satellite communication systems, this paper first provided an overview of recent progress in mobility management related to architecture design, handover mechanisms, and traffic continuity management. It then presented mobility management enhancement technologies for 6G LEO satellite systems. Finally, this paper discussed the opportunities and challenges that future LEO satellite communication systems may face in mobility management.

Keywords: LEO satellite, mobility management, 6G satellite communications

0 引言

随着5G网络的大规模商用, 关于6G网络的研究也全面展开。据中国移动研究院发布的《6G总体愿景与潜在关键技术白皮书》所述, 6G将通过超大带宽和超低时

延实现数据的高速传输。同时, 随着边缘计算与物联网的深度融合, 数据处理的本地化将大幅加速, 从而减少网络拥塞和能源消耗^[1]。并且, 6G强大的计算能力不仅能够为用户提供沉浸式体验, 推动新型智能基础设施的快速发展^[2], 还将助力人类社会实现“万物智联”和

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2025-02-11

通信作者: 张佳鑫, jxz@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2022YFB2902501); 北京邮电大学基本科研业务费项目 (No.2023ZCJH09); 北京市海淀区金桥种子基金 (No. S2024161)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902501), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2023ZCJH09), Haidian District Golden Bridge Seed Fund of Beijing Municipality (No. S2024161)

“数字孪生”的愿景^[3-4]。

然而, 现有地面网络覆盖率有限, 仅能覆盖约 20% 的陆地, 覆盖面积不足地球表面积的 6%^[5]。为实现 6G 愿景中的全域无缝覆盖, 卫星网络需作为地面网络的重要补充, 通过星地直连等方式解决无人区、远洋海域等偏远地区的通信需求, 从而实现更广泛、更可靠的全球覆盖^[6]。在这一背景下, 卫星通信系统的移动性管理成为确保网络稳定性和用户体验的关键因素之一。

根据《面向 6G 的天地一体融合网络技术白皮书》^[5], 卫星通信的移动性管理需要应对更高的技术挑战。其中确保在高速移动环境下的稳定服务、实现跨异构网络的无缝切换, 成为卫星通信移动性管理的重要目标^[7]。为了实现这些目标, 不仅要发展波束级切换技术, 以应对高速移动环境中的切换需求, 还需要优化现有的智能切换算法, 提升其对信号变化的预测与响应能力。同时, 还需要完善分布式管控体系, 增强各网络节点间的协同, 打破异构网络之间的壁垒, 确保跨卫星、跨地面基站和跨异构网络的顺畅切换。这些技术进步对于推动卫星通信移动性管理的发展至关重要, 是有效满足 6G 时代对通信系统更高要求的基础。

1 研究现状

为了解决低轨卫星通信系统移动性管理面临的难题, 学术界已经开展了广泛研究。下面将从移动性管控架构、基本切换机制、业务连续性管理 3 个方面梳理并总结低轨卫星通信系统移动性管理的研究现状。

1.1 低轨卫星通信移动性管理架构

软件定义网络 (Software Defined Networking, SDN) 是一种网络技术, 通过将控制平面与数据平面分离, 实现对网络资源的集中控制和动态管理。根据网络中控制平面与业务平面是否分离, 卫星通信移动性管理架构可以分为传统的非 SDN 架构和基于 SDN 的架构。表 1 对比了不同低轨卫星通信系统移动性管理架构的应用场景和

优缺点。

1.1.1 非 SDN 的卫星移动性管理架构

在传统的非 SDN 架构下, 可以基于控制逻辑的实现方式将网络控制方式分为集中式和分布式两种。其中集中式架构通常参考 IP 网络设计, 采用集中管控的方式^[8]。控制平面和数据平面都集中在少数几个关键代理节点, 这使得终端能够容易地不同网络间保持相同的 IP 地址不变。然而, 用户的位置信息必须通过家乡代理 (Home Agent, HA) 节点进行管理, 如图 1 (a) 所示, 用户位置区域更新时先在新卫星处注册获得新的转交地址 (Care of Address, CoA), 然后需要在该用户的 HA 处进行绑定更新, 每次切换都需要向 HA 节点发送位置更新信令, 该信令传递路由可能较远, 导致位置管理成本大大增加。并且在数据传输过程中, 发送节点的数据必须先找到接收用户的 HA 节点进行路由查询, 导致数据传输路径较长, 从而增加了数据传输成本^[9]。

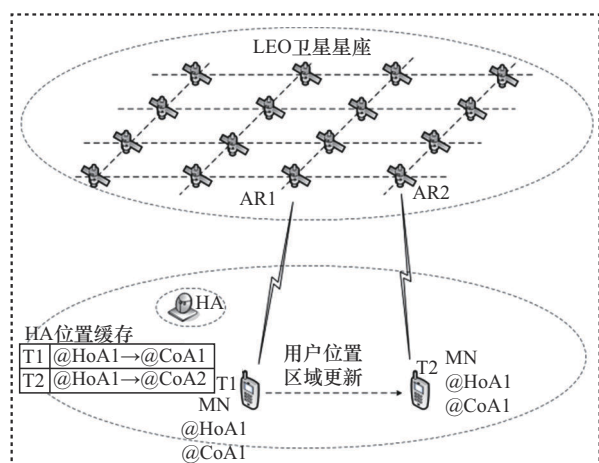
为了应对这一问题, 分布式移动性管理 (Distributed Mobility Management, DMM) 架构被提出, 该架构通过分布式部署多个移动锚点, 减少了数据传输的时延, 并且提高了系统的扩展性^[10]。如图 1 (b) 所示, 分布式移动锚点 (Local Mobility Anchor, LMA) 可部署在地面网关。通过这种方式, 当用户位置区域更新时, 用户能够选择最近的锚点进行位置注册, 从而降低管理成本^[11]。但为了用户位置的全局可知, 所有的分布式锚点也需要进行用户位置的全局更新, 反而带来了额外的管理成本。并且分布式架构的管理复杂度较高, 各个节点之间需要协调同步^[12]。

1.1.2 基于 SDN 的卫星移动性管理架构

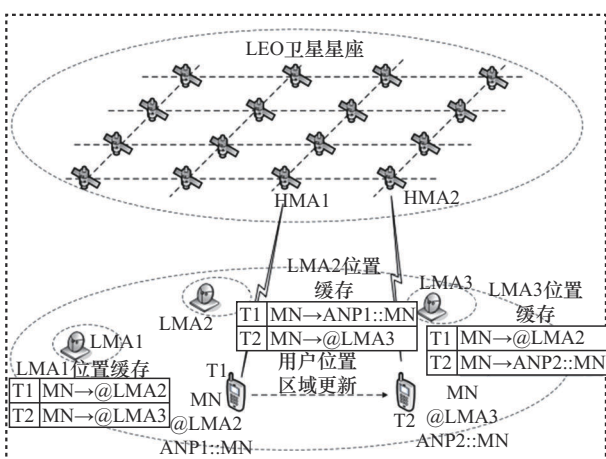
与非 SDN 架构不同, SDN 技术通过将控制平面和数据平面分离, 使得网络的控制逻辑可以通过软件编程灵活调整, 而不依赖硬件设备的固定功能。集中控制器可以根据不同的场景灵活调整切换策略, 有效降低切换时延和丢包率^[13-14]。

表 1 不同低轨卫星通信系统移动性管理架构对比

对比项	架构	场景	架构优点	架构缺点
非 SDN 的卫星移动性管理架构	基于 IP 的集中式移动性管理架构 ^[9]	小规模星座, 应急响应通信	简化管理、移动性管理架构的基础	数据路由迂回增加时延
	基于 DMM 的分布式移动性管理架构 ^[10-12]	大规模星座, 终端呼叫业务	多移动锚点降低数据传输成本	资源利用率低、多点同步问题
基于 SDN 的卫星移动性管理架构	基于 SDN 的集中式移动性管理架构 ^[13, 23]	小规模卫星网络, 互联网业务	控制与业务分离、高灵活性	中心控制器故障, 导致系统瘫痪
	基于 SDN 的分布式移动性管理架构 ^[8, 14-16]	大规模卫星网络, 互联网业务	高可靠性、低时延、高扩展性	管理难、各节点要求协调和同步



(a) 基于IP的集中式移动性管理架构



(b) 基于DMM的分布式移动性管理架构

图1 传统集中式和分布式移动性管理机制

虽然基于SDN的集中式架构提高了灵活性，但它也面临类似于非SDN集中式架构的挑战，尤其是随着卫星星座规模的扩大，单控制器架构逐渐暴露出单点故障、可扩展性低、时延和带宽瓶颈等问题。为了解决这些问题，基于SDN的多控制器分布式架构成为研究的重点^[15]。在该架构中，各控制器可以采用没有从属关系的平面结构或主从结构协作管理卫星网络，提高了系统的可靠性与灵活性^[16]。在主从协作架构中，高轨卫星作为主控制器，与地面控制中心相连，地面控制中心负责统筹管理整个卫星通信系统。在低轨卫星网络中，多个从属控制器负责管理各低轨卫星间的通信需求和位置信息。

用户的终端设备接入低轨卫星网络后，移动性信息将首先由从属控制器感知并上传至高轨主控制器。高轨主控制器与地面控制中心协同合作，优化网络资源分配，确保用户在卫星切换时保持无缝连接和通信连续。该多级协同控制架构通常应用于大规模卫星网络中，能够有效提升移动性管理的效率和网络性能。

1.2 低轨卫星基本切换机制

在低轨卫星通信系统中，链路切换体制相较于地面网络更为复杂。3GPP在TR 38.821中发布了卫星通信的基本切换流程^[17]。该流程借鉴了地面通信系统中的切换机制，但在切换触发、测量上报和切换决策方面存在显著差异，具体见表2。接下来将从这些关键步骤对卫星和地面系统的差异进行探讨。

1.2.1 切换触发

不同于地面通信系统中信号强度会随着距离基站的远近而快速变化，低轨卫星通信系统中的卫星小区内信号强度变化非常平缓^[18]。因此，传统地面通信系统中只基于信号强度测量的切换触发机制无法适用于卫星环境。3GPP在TR 38.821中提出了基于终端位置和星历信息的切换触发机制^[19]，根据星历信息设置一个切换安全距离，当用户位置到达这个安全距离时，系统自动触发切换过程。这种方法能够提前感知用户与卫星的相对位置，确保切换过程的及时性和稳定性。在此基础上，参考文献^[20]也提出一种优化策略，即不使用传统的转交地址来标识移动节点的位置，而是直接将用户的实际位置信息发送给地面控制中心，用于更新存储的用户位置数据，这样结合地理信息与通信技术，更准确地管理用户位置，提升了卫星网络的整体性能和用户体验，同时简化了网络管理和维护的流程。

1.2.2 测量上报

在切换流程中，测量上报环节是决定切换决策的重要依据。与地面系统中仅上报邻区参考信号接收功率的情况不同，卫星系统还需上报用户位置信息。这不仅是因为卫星的覆盖范围较大，还因为信号传播的时延较长。通过结合位置信息，系统能够更加准确地判断用户与卫星之间的相对位置，为后续的切换决策提供更加全面的参考^[17]。

表2 地面和卫星通信系统切换关键环节对比

分类	切换触发	测量上报	切换决策
地面通信系统	基于RSRP、SINR	邻区RSRP	单一属性决策(信号强度或质量)
卫星通信系统	基于位置信息和RSRP	用户位置信息、RSRP	多属性决策(信号强度、时延、数据传输速率等)

1.2.3 切换决策

地面通信的切换场景相对固定,用户的移动速度和环境变化较为可控,因此基于单一属性如信号强度、服务质量或信噪比等的切换决策算法在地面通信中通常能取得较好的效果。但是对于卫星切换场景来说,由于卫星网络中卫星和用户终端都可能高速移动,卫星覆盖范围频繁变化,传统基于信号强度、最长剩余服务时间、信噪比、仰角或可用信道数等^[21]单个属性的切换算法虽然比较简单,但在实际卫星切换场景中往往效果不佳。因此近年来的研究逐渐转向基于多属性的切换决策算法,将多个目标属性如信号质量、覆盖范围、通信需求、带宽和时延等综合考虑,针对不同的切换场景制定更为优化的决策策略,以提高切换的准确性和网络性能。

1.3 面向业务的连续性管理

上述对低轨卫星切换机制的研究主要聚焦链路连续性,切换后的业务传输连续性问题仍待解决。要确保用户服务不中断,需同时保障网络连接和业务传输的连续性。常规的硬切换方案,其传输中断时延可高达50 ms,这对业务的连续性造成较大影响^[19]。对此,参考文献[23]提出了软切换策略,用户终端同时连接多颗低轨卫星,持续监测每颗卫星的信号强度,自动选择最佳卫星作为主数据链路。与此同时,利用SDN控制器通过星间链路主动进行数据传输,确保用户通话的连续性。然而这种方案主要适用于传统的语音业务,对于卫星互联网的高带宽需求并不完全适用。为应对这一问题,3GPP在研究中提出了一种基于双主动协议栈(Dual Active Protocol Stack, DAPS)的切换机制^[22]。该机制允许用户在切换执行阶段同时连接到源卫星和目的卫星,从而在理论上可以实现0 ms的切换中断时间。尽管DAPS切换机制显著减少了切换时延,但它对终端设备提出了较高的要求,特别是在处理能力、网络接口支持和电源管理方面。这些要求会增加终端设备的成本和复杂性,随着移动终端的不断更新升级,DAPS切换机制有助于进一步提升整体网络性能和用户体验。

当然,保证切换业务连续性不仅要减少切换中断时间,也要通过数据迁移使得切换前后业务数据不中断。参考文献[24]提出一种通过地面站组播传输数据保证业务连续性的方案。当数据服务器将IP数据包发送到地面站后,地面站通过组播传输给多颗候选卫星,从而在多颗卫星上同时缓存用户的下行数据,当用户切换后,目的卫星会继续发送剩余数据,确保业务不中断。此外,另一种方案则直接利用星间隧道传输剩余数据以保证业务

连续性^[25]。当用户发生切换时,源卫星通过星间隧道将缓冲区内尚未传输的缓冲数据发送至目的卫星,目的卫星再补发这些数据,保证了切换后业务传输的连续性。

综上所述,卫星通信移动性管理在架构设计、切换体制、业务连续等方面已经有了显著的进展,但随着6G网络的深入研究,面对日益复杂的网络环境和多样化的业务需求,现有方案在灵活应对高动态变化的卫星拓扑结构和跨轨道通信等挑战时仍存在不足。因此,本文提出面向6G的卫星通信移动性管理增强技术。

2 移动性管理增强技术

下面探讨如何通过创新的架构设计、资源管理和优化方法来增强卫星通信的移动性管理能力。

2.1 多轨协同移动性管理架构

为实现6G大规模卫星网络的高效移动性管理,需要设计一个能够动态适应不同轨道高度,并融合卫星和地面通信系统的协同架构,如图2所示。下面将围绕弹性多轨融合、网元灵活部署和星地智能协作3个方面展开讨论。

2.1.1 弹性多轨融合

6G网络中的大规模卫星由高中低轨卫星共同构成。每个轨道的卫星在覆盖范围、通信时延和灵活性方面都有其独特优势。其中,中高轨卫星作为骨干控制与承载网络,低轨卫星则专注于用户接入和切换,这种分工协作使得数据流在进入骨干网络后不需要通过多个卫星中继,直接由中高轨卫星进行传输与处理,减少了卫星转发的跳数,从而简化了网络架构。并且充分利用了低轨卫星的低时延特性,从而提升用户在不同轨道间切换时的响应速度,降低切换时延,提高了用户切换过程中的网络效率。此外,该系统通过联合资源调度和优化算法,针对异构的高中低轨卫星网络实现了对移动用户的动态资源分配。这一机制确保在用户移动过程中,网络资源能够及时适应用户的切换需求,从而提升了切换的成功率和服务质量,确保用户在不同轨道间移动时的通信连续性。

2.1.2 网元灵活部署

灵活的网元部署是提升移动性管理能力的关键。在透明转发模式下,卫星仅作为地面基站的中转站,这种部署方式能够快速适应用户移动需求,降低接入时延。在可再生模式下,卫星具备较强的星上处理能力,配合星间链路,能够在用户移动过程中快速响应切换请求,减少对地面网络的依赖,增强移动服务的可靠性。

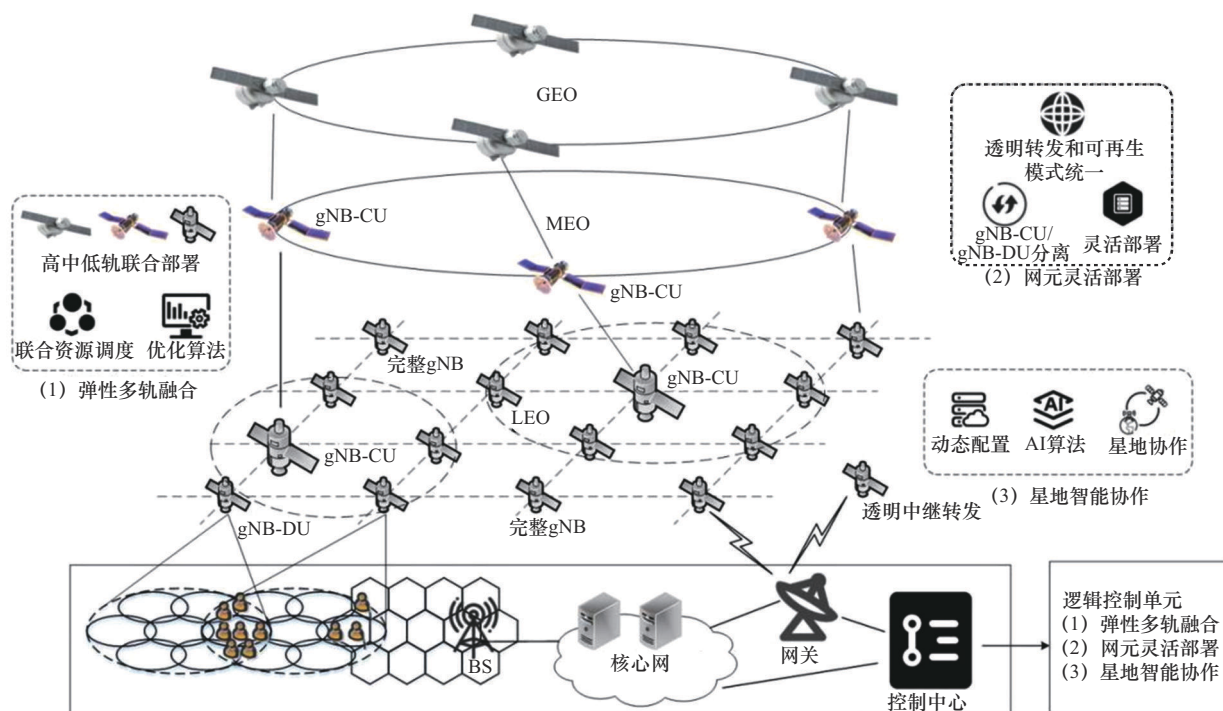


图2 多轨协同移动性管理架构

可再生模式卫星还支持将gNB按照功能模块划分为中央单元（Centralized Unit, CU）和分布单元（Distributed Unit, DU）^[26]，这在移动性管理中发挥重要作用。如图3所示，基于SDN的双边协同移动性管理机制，利用虚拟化网元技术，网络可以根据不同业务需求和场景灵活地在星上部署部分或全部功能。为提升管理效率和降低系统复杂性可以采用卫星分簇的策略，簇内由一颗能力更强的gNB-CU卫星负责管控其余gNB-DU卫星。其中CU卫星负责位置管理和通信数据转发，DU卫星负责接入以及切换时的数据转发。在同一簇内的卫星设置有相同的小区标识，因此当用户在簇内不同DU卫星间进行切换时只需要进行物理层切换，不涉及高层RRC重配，降低管理开销。而当用户在簇间不同DU卫星上切换时，用户只用在当前接入的簇内进行位置注册，显著减少了位置更新所需要路由跳数。同时，为了确保系统全局的一致性，地面SDN控制器会对所有CU卫星的用户位置进行全局更新和同步管理，实现对整个网络的集中式控制。该管理机制不仅降低了系统复杂度，还通过合理分配CU和DU卫星的功能，有效提升了网络的扩展性和管理效率。同时，结合小区标识的簇内统一配置和优化的跨簇切换流程，大幅改善了用户的移动性管理性能。

2.1.3 星地智能协作

星地智能协作技术在移动性管理中发挥着重要作用。

通过智能调度实现跨轨道、跨网络的高效协作，星地协作技术依托智能平台，实时监控卫星和地面网络的状态，利用机器学习算法预测网络负载、用户行为和切换需求。系统能够根据卫星轨道位置和用户移动轨迹预测最优切换时间点，并在地面基站和卫星之间实现无缝切换。同时，星地智能协作结合网络虚拟化技术和软件定义网络技术，动态配置网元功能。例如，在用户密集或高负载区域，快速激活更多的分布式网元以降低通信时延。当用户移动至覆盖较弱区域时，自动调度机制将部分网元从低负载区域转移至该区域，以确保服务质量的连续性。通过这种方式，确保在卫星高速移动和网元频繁变动的情况下，网络依然能够稳定、高效地运行。

2.2 基于跳波束的波束协作切换

随着卫星网络的不断扩大，网络中的业务类型也逐渐多样化，用户需求复杂、网络资源稀缺，传统的单波束体系覆盖范围小、容量有限，难以满足大面积覆盖和高数据流量业务的需求^[27]。多波束体系虽在一定程度上改善了覆盖范围和容量问题，但在应对复杂多变的业务类型时灵活性不足，尤其是在管理用户移动性方面，无法保证用户在不同波束之间切换时的服务连续性。因此，传统的单波束、固定的多波束体系已经无法满足面向6G的卫星网络需求。

新兴的跳波束技术通过在时间、空间、频率和功率

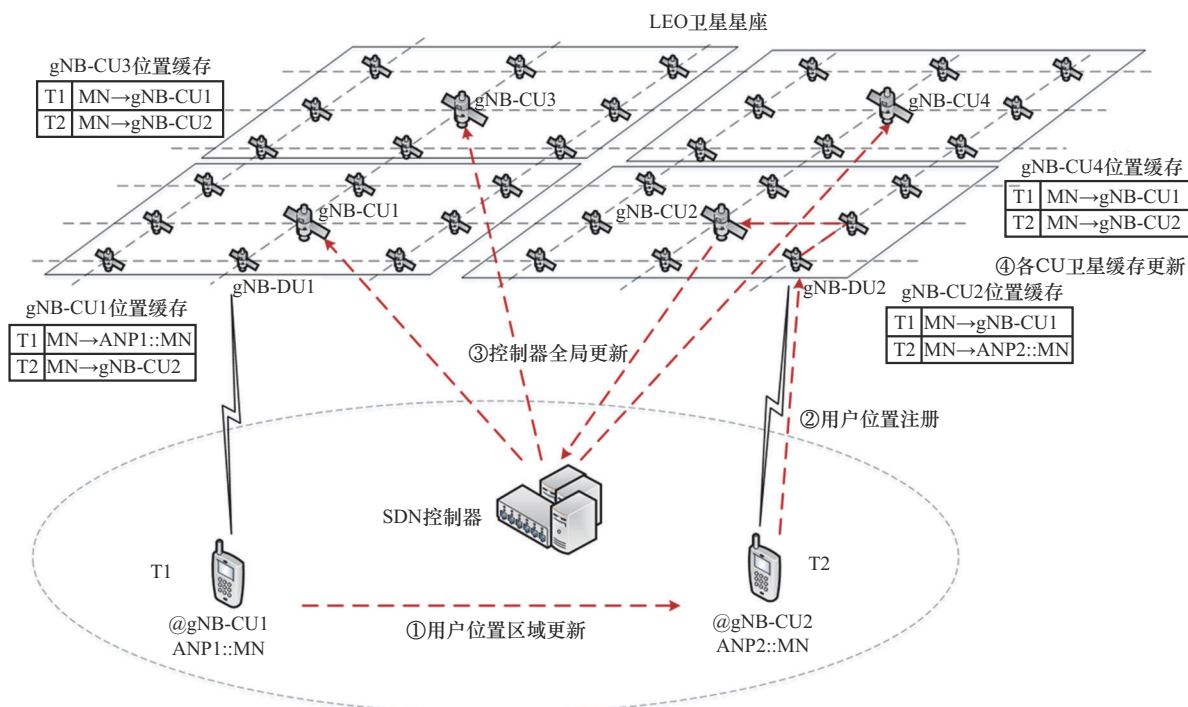


图3 基于SDN的双边协同移动性管理机制

等多个维度上进行资源分配，能够适应动态变化和均匀分布的业务需求。通过时分和空分复用的方式，跳波束可以在不同时间段为不同区域提供覆盖，保证大范围区域的信号覆盖，同时有效减少波束之间的干扰，提升频谱利用率^[28]。

表3给出跳波束体系不同波束切换方案及其特点。一般情况下，按照控制与业务分离体系将波束分为信令波束和业务波束。信令波束主要用于传输控制和管理信息，包括切换触发、切换上报以及切换决策等关键指令的传递。业务波束则用于承载用户业务数据，如语音、视频、文件传输等。在基于跳波束技术的卫星切换场景中，卫星根据星下区域的流量需求以及用户切换需求，按时隙激活特定波束覆盖。这样不仅可以减小波束间的干扰，还可以提高卫星资源利用率。然而，这也带来了新的挑战，如波束的切换时延问题。当多个用户同时发出切换请求时，波束资源可能不足，导致波束无法及时覆盖切

换区域，从而增加了切换时延，导致切换失败率增加。为解决这一问题，系统需要优化切换触发机制、测量上报机制和波束资源分配策略，确保在星下切换需求较多的情况下，波束能够迅速照射到切换目标位置，以完成切换操作。

在跳波束体系中可以单独基于信令波束、业务波束切换，也可以基于信令波束和业务波束协作切换，如图4所示。对于基于信令波束切换的方案，虽然波位轮询可以覆盖较大区域，但其时延较大，导致用户切换时延可高达800 ms^[29]，切换失败率增加。为了降低切换时延，可以采用信令波束调度机制，当检测到用户有切换需求时，系统优先调度信令波束到切换区域，完成资源分配，降低切换等待时间。对于基于业务波束切换的方案，系统可以设置切换优先级，在切换和数据传输需求冲突时，优先为切换用户提供波束资源，确保切换顺利进行，切换时延降低至150 ms^[29]。但是业务波位较小可能会导致

表3 跳波束体系不同波束切换方案及其特点

方案	功能	工作方式	特点
基于信令波束切换	负责接入和切换	波位轮询	轮询导致用户切换等待时延较高、掉话率高
		随切换需求调度	根据切换需求灵活调整信令波束资源分配
基于业务波束切换	负责数据传输和切换	随切换需求调度	业务波束覆盖区域较小导致切换更加频繁
基于信令波束和业务波束协作切换	信令波束用于同步、业务波束传递信令	信令波束轮询、业务波束调度	既减少切换频次也降低切换时延

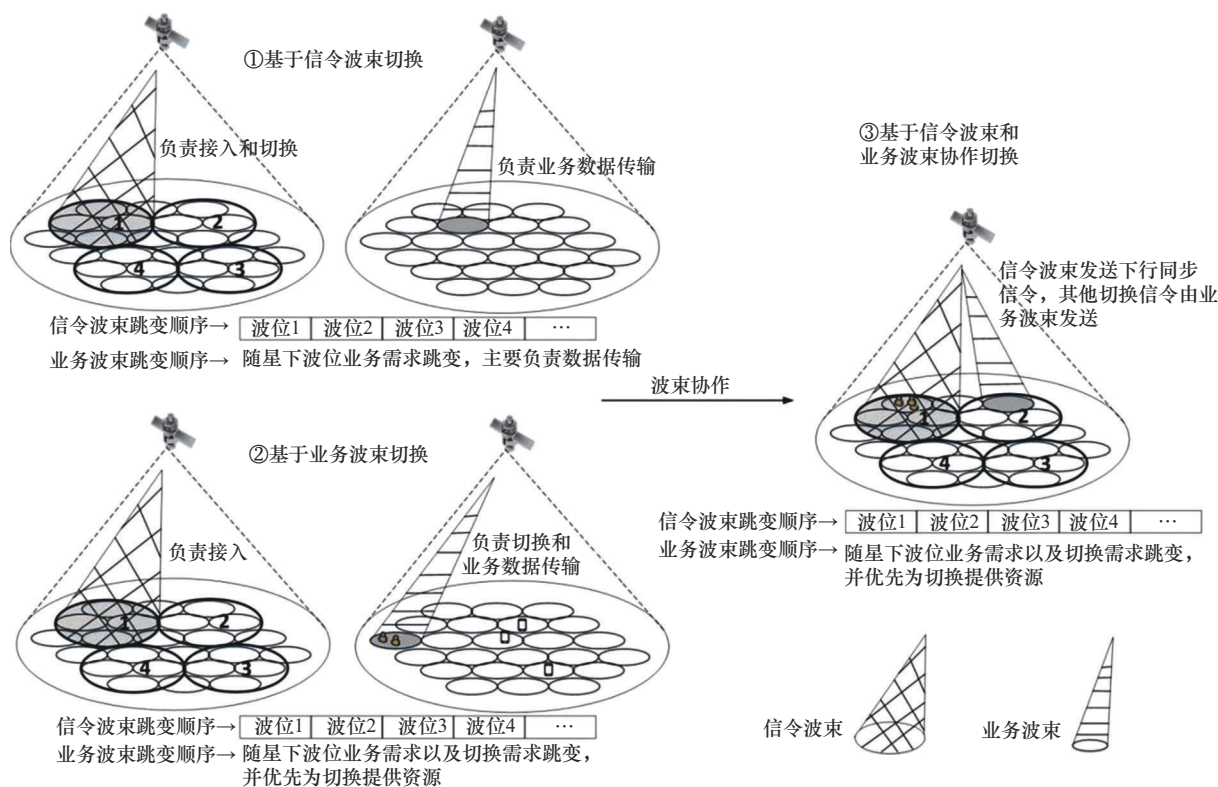


图4 跳波束体系下不同波束切换方案

切换发生频繁, 增加开销。另外, 也可以结合信令波束和业务波束的特点, 使用两个波束进行协作切换。在整个切换流程中, 信令波束完成目的卫星的下行同步, 其他信令由业务波束传递, 既减少了切换频次又避免了切换时延过大^[29]。

跳波束技术为6G卫星网络的移动性管理提供了新的解决方案。通过合理调度信令和业务波束, 系统可以有效应对频繁的用户切换需求, 降低切换时延, 提升网络的覆盖效率和服务质量。

2.3 基于AI的切换决策方案

面向6G时代, 卫星移动性管理致力于实现超低时延、超高可靠性以及终端的无缝切换。然而, 低轨卫星网络的切换场景复杂多样, 传统的切换决策方案在应对持续变化的用户需求和通信环境时表现出明显的局限性。鉴于此, AI技术在切换决策中展现出巨大的潜力, 能够有效提升切换后的业务体验^[30]。

基于AI的切换决策方案通过深度分析和学习大量的用户行为、网络状态以及环境因素等数据, 能够精准预测用户终端的移动趋势与业务需求^[31], 在星内、星间、星地切换场景中都能发挥重要作用。例如, 使用深度学习 (Deep Learning, DL) 技术中的循环神经网络 (Re-

current Neural Network, RNN) 或长短时记忆网络 (LSTM), 系统能够分析用户在卫星覆盖范围内的移动模式, 提前规划切换时机, 避免信号中断或性能下降。在星内波束间切换的场景下, AI能提前感知终端靠近波束边缘, 及时触发平稳切换, 从而避免信号中断或质量下滑, 同时对业务处理流程进行优化, 以确保服务的连贯性。再者, 在星间切换的场景中, AI能够综合考量多颗卫星的轨道位置、载荷能力、链路质量以及业务迁移的可行性和效率, 选取最优切换目标, 在实现无缝过渡的同时, 保障业务在迁移过程中的稳定性和连续性。而在星地切换场景中, 依据地面基站覆盖范围、负载状况、终端位置和移动速度, 智能判定切换时机, 不仅降低切换时延、提升可靠性, 还能合理规划业务迁移路径, 以适应不同的网络环境和业务需求。

此外, 基于AI的切换决策方案能够有效应对低轨卫星网络中复杂的资源分配难题。它能够根据不同业务的优先级、QoS要求以及网络资源实时可用性, 动态调整切换策略, 从而保证高优先级业务的连续性和稳定性^[32]。同时, 通过优化切换参数和流程, 可以抑制切换带来的信令风暴, 减轻网络负担, 提高整体网络运行效率。面向6G时代, 基于AI的智能切换决策方案将作为卫星移

动性管理的关键技术, 在实现无缝切换的同时, 出色地完成业务的高效迁移以及资源的合理分配, 为用户呈上更优质、稳定且高效的通信服务。

3 机遇与挑战

3.1 机遇

低轨卫星通信系统移动性管理的快速发展得益于多个方面的推动。

首先, 场景的多样化成为移动性管理技术创新的重要动力。例如, 全球范围内的远程通信、跨境物流监控、海洋和极地探测等场景, 对高效、稳定的卫星通信提出了更高的要求。这些多样化的应用场景对快速、无缝的用户切换体验产生了巨大需求, 推动了移动性管理技术的进一步发展。

其次, 星载边缘计算技术的发展为低轨卫星通信的移动性管理提供了新的思路。通过将计算和存储资源分布在卫星上, 卫星系统可以在更接近用户的地方处理数据, 降低时延并加速切换决策的执行。这种方式不仅减少了对核心网的依赖, 还提高了切换过程中的响应速度, 为用户提供了更流畅的通信体验。

最后, 标准化工作的逐步推进为低轨卫星系统的移动性管理提供了有力支持。全球范围内的标准化组织正在加快相关技术标准的制定, 这将促进低轨卫星系统在移动性管理上与其他通信系统的互操作性和协同发展, 减少技术壁垒, 推动低轨卫星通信系统的广泛应用。

3.2 挑战

当然, 面向 6G 的低轨卫星通信系统移动性管理技术仍面对诸多挑战, 亟待进一步研究。

首先, 多星边缘用户的移动性管理问题尤为突出。这些用户位于多颗卫星信号覆盖的交界区域, 信号强度不稳定, 导致频繁切换, 增加了移动性管理的复杂性和切换失败率。为解决此问题, 系统需要更精确的资源管理和切换决策机制, 以确保在用户移动时提供稳定的信号和服务。

其次, 移动性管理的跨层优化也是一个重要问题。低轨卫星系统的动态性较强, 涉及通信链路、网络协议栈等多个层面的协同工作。在切换过程中, 如何在物理层、链路层和网络层之间实现高效的资源分配和优化, 尤其是在平衡时延、带宽、能耗等因素上是一大难题。特别是在卫星切换时, 必须优化波束和功率配置, 以确保移动用户在快速变化的环境中保持持续的服务。

最后, 回程链路切换的挑战也是移动性管理中的关

键问题。在低轨卫星通信系统中, 地面信关站的数量相对较少且覆盖范围有限, 而卫星处于不断移动的状态中, 这就导致卫星在运行过程中要与当前信关站中断连接并发生切换。当这种情况发生时, 大量用户链路需要集中同步切换, 这对切换的及时性和准确性提出了极高要求。不仅如此, 众多用户链路同时切换还涉及安全性问题, 如何确保在切换过程中用户数据的安全传输至关重要。在地面站资源有限的情况下, 如何协调不同卫星之间的回程链路, 实现高效的数据传输, 避免拥塞和时延, 同时保障安全性和满足大连接需求, 是移动性管理中亟待解决的难题。

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[Z]. 2021.
IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G white paper on overall vision and potential key technologies[Z]. 2021.
- [2] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 130-150.
HUANG T, LIU J, WANG S, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 130-150.
- [3] 刘光毅, 金婧, 王启星, 等. 6G 愿景与需求: 数字孪生、智能泛在[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 3-9.
LIU G Y, JIN J, WANG Q X, et al. Vision and requirements of 6G: digital twin and ubiquitous intelligence[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 3-9.
- [4] 崔春风, 王森, 李可, 等. 6G 愿景、业务及网络关键性能指标[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 10-17.
CUI C F, WANG S, LI K, et al. 6G vision, scenarios and network requirements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(6): 10-17.
- [5] 中国移动通信研究院. 面向 6G 的天地一体融合网络技术白皮书[R]. 2024.
China Institute of Mobile Communications. 6G-oriented white paper on integrated network technology[R]. 2024.
- [6] IMT-推进组. IMT-2030(6G)推进组正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书[J]. 互联网天地, 2021(6): 8-9.
IMT Promotion Group. IMT-2030(6G) Promotion Group officially released the white paper “6G Overall Vision and Potential Key Technologies” [J]. China Internet, 2021(6): 8-9.
- [7] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向 6G 的空天地一体化系统设计和关键技术[J]. 信息通信技术与政策, 2022(9): 18-26.
KANG S L, MIAO D S, SUO S Q, et al. System design and key technologies for the integrated air-space-terrestrial communication toward 6G[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(9): 18-26.

- [8] 李恒智, 王春峰, 王为众, 等. 基于SDN的卫星网络分布式移动管理研究[J]. 通信学报, 2017, 38(S1): 143-150.
LI H Z, WANG C F, WANG W Z, et al. Research on distributed mobile management of satellite network based on software defined network[J]. Journal on Communications, 2017, 38(S1): 143-150.
- [9] CHAN H A, YOKOTA H, XIE J, et al. Distributed and dynamic mobility management in mobile Internet: current approaches and issues[J]. Journal of Communications, 2011, 6(1): 4-15.
- [10] 韩维. 卫星网络分布式移动性管理关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
HAN W. Research on key technologies of distributed mobility management in satellite networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [11] HAN W, WANG B S, FENG Z Q, et al. Distributed mobility management in IP/LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Piscataway: IEEE Press, 2016: 691-695.
- [12] 朱洪涛. 低轨卫星网络分布式移动性管理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
ZHU H T. Research on distributed mobility management in LEO satellite network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [13] 李蕊. 基于SDN的卫星物联网接入与路由技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LI R. Research on satellite Internet of Things access and routing technology based on SDN[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [14] YANG H, KIM Y. SDN-based distributed mobility management [C]//Proceedings of the 2016 International Conference on Information Networking (ICOIN). Piscataway: IEEE Press, 2016: 337-342.
- [15] 杨丹, 刘江, 张然, 等. 基于SDN的卫星通信网络: 现状、机遇与挑战[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 34-41.
YANG D, LIU J, ZHANG R, et al. SDN-based satellite networks: progress, opportunities and challenges[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 34-41.
- [16] 郭剑鸣. 基于SDN的低轨卫星网络架构设计与优化研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
GUO J M. Research on design and optimization of LEO satellite network architecture based on SDN[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [17] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821, 03 2023, 16.2.0.[S]. 2023.
- [18] KHAN W U, ALI Z, LAGUNAS E, et al. Rate splitting multiple access for cognitive radio GEO-LEO co-existing satellite networks [C]//Proceedings of the GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 5165-5170.
- [19] HUANG X. Mobility management approach for co-orbital regenerated LEO satellites[C]//Proceedings of the 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 55-60.
- [20] 苏思睿. 基于终端地理位置的低轨卫星移动切换协议研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
SU S R. Research on mobile handover protocol of LEO satellite based on terminal location[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [21] 陈鹏. 非地面网络的移动性管理策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
CHEN P. Research on mobility management strategy of non-terrestrial network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [22] LEE C, JUNG J, CHUNG J M. Intelligent dual active protocol stack handover based on double DQN deep reinforcement learning for 5G mmWave networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7572-7584.
- [23] YANG B W, WU Y, CHU X L, et al. Seamless handover in software-defined satellite networking[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1768-1771.
- [24] LI J, XUE K P, LIU J Q, et al. A user-centric handover scheme for ultra-dense LEO satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1904-1908.
- [25] 王朝宇. 天地一体化物联网接入与传输关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2022.
WANG C Y. Research on key technologies of Internet of Things access and transmission with integration of heaven and earth[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [26] 谢彼聿. 一种支撑5G基站CU-DU灵活部署的配置管理方法[J]. 电子技术与软件工程, 2022(16): 5-8.
XIE X S. Configuration management method for supporting flexible deployment of CU-DU of 5G base station[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2022(16): 5-8.
- [27] 方应勇, 何辉. 宽带卫星通信系统的跳波束技术综述[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2020(12): 95-96.
FANG Y Y, HE H. Overview of beam hopping technology in broadband satellite communication system[J]. Satellite TV & IP Multimedia, 2020(12): 95-96.
- [28] 赵旭东, 张晨, 张更新. 宽带卫星通信系统的跳波束技术综述 [C]//第十五届卫星通信学术年会论文集. 出版地不详: 出版者不详, 2019: 35-41.
ZHAO X D, ZHANG C, ZHANG G X. Overview of beam hopping technology in broadband satellite communication system [C]//Proceedings of the 15th Annual Conference on Satellite Communication. [S.l.:s.n.], 2019: 35-41.
- [29] SUN S H, HOU L M, MIAO D S. Beam switching solutions for beam-hopping based LEO system[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [30] YANG J Y, XIAO Z Y, CUI H X, et al. DQN-ALrM-based intelligent handover method for satellite-ground integrated network[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(4): 977-990.
- [31] ZHANG C C, ZHANG N, CAO W, et al. An AI-based optimization of handover strategy in non-terrestrial networks[C]//Proceed-

ings of the 2020 ITU Kaleidoscope: Industry-Driven Digital Transformation (ITU K). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

- [32] JI S J, ZHOU D, SHENG M, et al. Dynamic space-ground integrated mobility management strategy for mega LEO satellite constellations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11043-11060.

[作者简介]



陆航 (2001-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信。



张佳鑫 (1990-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授, 博士生导师, 主要研究方向为空地一体化信息网络、边缘计算等。



王海旭 (2001-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为卫星通信。