

6G 卫星物联网移动性管理：挑战与关键技术

白卫岗, 盛敏, 杜盼盼

(西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要: 卫星物联网是面向 6G 的新一代物联网的重要组成部分, 是实现“泛在连接”愿景的重要网络形态。移动卫星与终端之间的相对高速运动引起了服务连续性问题。阐述了卫星物联网移动性管理技术, 分析了双移动、广域覆盖以及需求非均匀等因素给卫星物联网移动性管理带来的新挑战, 从移动性管理架构、预测及增强等方面探讨了面向 6G 卫星物联网移动性管理的关键技术。

关键词: 6G; 卫星物联网; 移动性管理

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00149

Mobility management of the 6G satellite IoT: challenges and key techniques

BAI Weigang, SHENG Min, DU Panpan

Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: The satellite Internet of things (SIoT) is regarded as a feasible scheme to realize the vision of the “ubiquitous connection” in 6G. The relatively high-speed movement between the mobile satellite and the terminal causes service continuity problems. The mobility management technology of the SIoT was expounded. New challenges to the mobility management of the SIoT caused by the dual-mobility, wide-area coverage and non-uniform demand were analyzed. Key techniques of the mobility management of the SIoT in 6G from aspects of the mobility management architecture, prediction and enhancement were discussed.

Key words: 6G, satellite Internet of things (SIoT), mobility management

1 引言

物联网 (IoT, Internet of things) 是将各种传感设备与互联网结合形成的一个万物互联的网络, 可实现在任何时间、任何地点的人、机、物之间的互联互通。地面物联网在多个领域得到了广泛应用, 如智能家居、智能电网、环境监控、智慧城市等。随着 5G 网络的发展, 地面物联网迎来了广阔的应用前景, 2025 年全球物联网连接数量将达到甚至超过 270 亿^[1]。受限于覆盖能力及建设成本, 以互联网、传统电信网、蜂窝网络等为信息承载体的地面

物联网的发展受到一定制约。2019 年 11 月, 我国正式启动了 6G 网络研发工作, 6G 网络将信息覆盖延伸至太空、天空、陆地和海洋空间, 卫星网络被认为是 6G 网络的重要组成部分, 能够为地面通信“盲区”提供信号覆盖。以卫星网络为信息载体实现人、机、物互联的卫星物联网是面向 6G 的新一代物联网的重要组成部分, 为物联网的发展提供了更广阔的平台^[2]。卫星物联网应用场景如图 1 所示。

相对于地面物联网, 卫星物联网在覆盖范围、通信容量以及网络建设等方面有明显的优势, 尤其是低轨卫星星座系统。由低轨卫星构成的星座系统

收稿日期: 2020-02-02; 修回日期: 2020-03-01

通信作者: 白卫岗, wgbai@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U19B2025, No.91638202)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of China (No.U19B2025, No.91638202)

能够实现对全球的无缝覆盖。新兴的低轨星座容量提升显著,如星链星座(4 425 颗卫星)吞吐量可达到 23.7 Tbit/s^[3]。此外,低轨卫星空间组网不受地面地形与规划的限制,且在自然灾害导致地面网络被损坏的情况下仍可正常工作。拥有上述优势的同时,低轨卫星与终端之间的相对高速运动导致终端在网络中的接入位置不断变化,严重影响服务的连续性和可靠性。为了保障网络服务质量,移动性管理是面向 6G 卫星物联网的关键。



图 1 卫星物联网应用场景

2 卫星物联网发展现状与挑战

2.1 卫星物联网发展现状

轨道通信 (Orbcomm)、高级研究与全球观测卫星 (ARGOS) 和国际海事卫星 (Inmarsat) 是提供卫星物联网服务的典型代表^[1,4]。Orbcomm 系统应用领域广泛,包括交通运输、油气田、水利、环保、渔船和消防报警等。ARGOS 系统能快速、准确、大范围地收集全球海洋环境参数,服务全球范围近两万个浮标终端^[5]。Inmarsat 的 LoRaWAN 网络可在全球提供物联网解决方案^[6]。此外,Telesat、OneWeb、SpaceX 等航天巨头正在加速推进其低轨星座的建设,以支持未来卫星物联网服务。

国内的天通一号、北斗系统均可提供卫星物联网服务^[1]。鸿雁、虹云等低轨星座计划相继发布,首个“天基物联网”被命名为“行云工程”,计划由 80 颗低轨卫星组成^[7]。此外,九天微星的“瓢虫系列”7 颗卫星于 2018 年成功入轨,在野生动物保护、野外应急救援、车辆船舶监测、物流追溯等领域开展星座物联网验证^[8]。2019 年,北京国电高科科技有限公司研制的天启·沧州号卫星成功入轨,实现了天启物联网星座初步组网运行^[9]。

从终端接入模式看,卫星物联网结构可分为间接接入和直接接入^[10],如图 2 所示。间接接入模式的终端先接入地面物联网系统,然后通过卫星中继实现连通。直接接入模式的终端直接接入卫星网络,以卫星网络为传输载体开展物联网服务。面向 6G 网络泛在连接愿景,在沙漠、无人区、海洋等区域的物联网终端直接接入更具吸引力。但无论是以低轨卫星作为中继的间接模式,还是以卫星网络作为接入和传输载体的直接模式,都存在服务连续性问题。

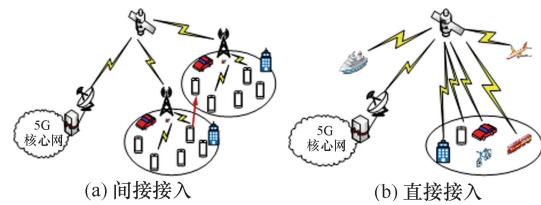


图 2 卫星物联网结构

2.2 卫星物联网移动性管理新挑战

现有移动性管理技术主要针对蜂窝网络、WLAN 等典型地面网络设计。卫星物联网移动场景复杂、全球覆盖、用户群海量及需求非均匀等新特征将给卫星物联网的移动性管理带来新的挑战。

2.2.1 双移动现象导致移动性管理场景复杂

地面物联网主要由终端移动引发移动性切换,卫星物联网中移动性切换的触发是双向的。从终端侧来看,包括终端的位置移动(如个体移动、传感设备随汽车、动车移动等)以及终端业务需求的移动。从网络侧来看,包括卫星节点的高速运动,导致星地、星间链路的断续连通以及网络状态的移动,如信道状态的变化、网络拥塞等。将上述终端侧和网络侧两种移动引起的移动性切换称为双移动现象。进一步地,终端侧业务与移动场景的复杂性会加剧双移动中的移动性管理难度。卫星物联网的业务类型众多,传输的数据类型、持续时长、业务量、频率、峰值时段等个性化显著。终端移动范围与速度差异化明显,从个体低速移动到飞机、导弹的超高速运动,移动范围从小区内可延伸到整个地球。除了终端独立移动外,还存在大量终端群组移动,如部署在交通工具内的各类信息终端、个人可穿戴传感器等。相对于地面物联网主要由终端移动引发移动性切换,双移动现象中的移动性管理更复杂。

2.2.2 广域覆盖导致移动性管理过程复杂

首先,相对于地面数千米的覆盖,卫星节点的

覆盖范围通常在数千千米量级，可同时接入的终端数量巨大。其次，低轨卫星相对地面高速运动，终端对其可视时间通常只有几分钟，如 Iridium 的单星覆盖时间约为 10 min。终端需要在波束、卫星节点之间频繁切换，才能保证服务的连续性。此外，星地大尺度信道使得移动性管理信令传播时延长，进而终端切换时延增加、效率降低。因此，卫星物联网移动性管理需要综合考虑海量终端、频繁切换以及信令传播时延长等影响。

2.2.3 需求非均匀导致移动性资源调度复杂

由于不同地区的人口密度不同、经济发展不均等因素，物联网业务呈现需求非均匀的特征。以物流监测业务需求为例，我国物流监测需求分布以“胡焕庸线”为界，东西部地区的业务需求差异明显。当卫星网络资源以均匀方式覆盖时，地球自转与卫星节点的运动使得卫星节点会交替覆盖业务密集与稀疏区域，此时需要动态调整资源调度策略以适应不同覆盖区的移动性管理要求，保证业务的连续性及服务质量。

3 卫星物联网移动性管理概述与关键技术

3.1 移动性管理技术概述

从网络协议体系的角度看，移动性管理技术集中在传输层、网络层以及链路层。传输层的移动性管理负责当节点移动引起 IP 地址变化时，仍能确保端到端的链路不中断。网络层的移动性管理协议主要解决移动节点 IP 地址发生变化时的 IP 数据转发机制，以支持通信的连续性^[11]。

链路层的移动性管理主要包括切换控制和位置管理。低轨卫星高速运动或终端移动会导致终端与其服务卫星逐渐远离，为了保障服务的连续性和可靠性，需要将终端业务切换到新的卫星继续服务，该过程即为切换控制。切换控制包括波束间切换、星间切换、星间链路切换以及星地切换^[12]。波束间切换是指同一颗卫星覆盖区域内，链路在相邻波束间的切换。目前，流行的波束间切换策略主要包括非优先切换、排队优先切换和预留信道等。星间切换是指一个链路在相邻卫星间的切换，切换准则包括最小负荷、最长可视时间和最强信号等。波束间与星间切换如图 3 所示。星间链路切换是由星间链路动态通断引起的切换控制。星地切换是指终端在卫星网络与地面网络之间的切换，如图 4 所示。切换控制的优劣直接影响对终端的服务质量。

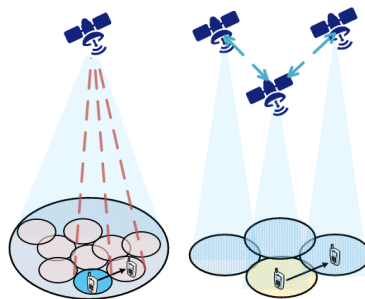


图 3 波束间与星间切换

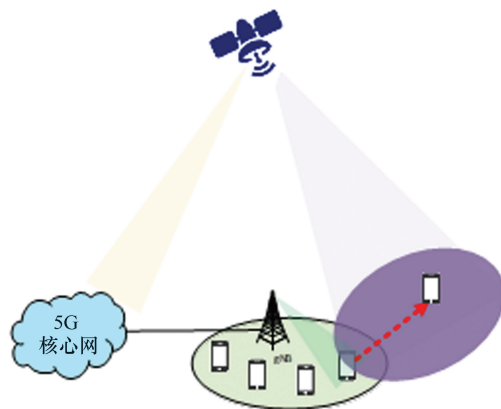


图 4 星地切换

位置管理是对移动终端位置变化进行跟踪、保存、更新和查找的功能，主要包括位置更新和位置查找。位置更新是指由移动终端向系统报告其位置变更的过程；位置查找是指系统查找移动终端所在位置的过程。位置区划分是影响位置更新与查找的重要因素，也是位置管理的前提，一般包括静态位置区和动态位置区两种。静态位置区通常以地理位置区域划分，屏蔽了卫星与终端移动的影响。不同的静态划分方案会引起不同的位置管理开销，如以卫星覆盖划分易引发频繁位置更新，以地面站覆盖划分易引发复杂位置查找过程。动态位置区通常以用户的移动和业务特征相结合划分，如基于时间、基于移动、基于距离、移动与时间结合等^[13]。动态位置划分在追求低负荷位置管理的同时，对终端行为特征模型精度提出了更高的要求。卫星物联网中海量终端的位置更新和查找信令会消耗大量的系统资源，设计低负荷的位置管理策略对卫星物联网至关重要。

3.2 移动性管理关键技术

为了有效应对双移动、广域覆盖以及需求非均匀等因素对卫星物联网移动性管理造成的新挑战，下文从移动性管理架构、移动性预测技术和移动性管理增强技术等方面展开讨论。

3.2.1 移动性管理架构

传统卫星网络移动管理技术更多地借鉴了 IP 网络，采用集中式的移动性管理架构，难以支持双移动、广域覆盖以及需求非均匀等因素引发的复杂移动性管理场景，面临扩展性低、信令开销大以及管理粒度缺乏等问题^[14]。以卫星为切换锚点、地面网关为位置锚点，采用标识与位置分离的思想，文献[14-15]给出了分布式的移动性管理架构，该架构能够实现移动终端动态、分布式的位置管理。以地面控制中心为控制器负责路由、切换和资源分配，高轨道同步卫星广播转发流表，低轨卫星为交换机的软件定义多层卫星网络架构近年来受到关注^[16-17]。基于该架构，文献[17]提出了一种软交换的卫星切换策略，同时维持两条链路，保证终端始终能够保持通信，终端切换后触发控制器全局更新转发流表。文献[16,18]提出了基于固定虚拟附着点的位置管理方法，将移动终端的位置绑定分为移动终端与固定虚拟附着点的绑定和移动卫星与固定虚拟附着点的绑定，屏蔽了卫星移动对终端接入的影响，降低了绑定更新开销。

针对地面站单控制器方案存在的单点失效、扩展性弱以及时延大等问题^[19]，可以考虑分级控制方案^[19-20]。基于软件定义的卫星网络移动性管理架构如图 5 所示，管理平面负责网络的管理、维护以及

移动性管理策略生成，部署在地面网络控制中心。控制平面可采用分级控制方案，包括高轨（GEO, grand earth orbit satellite）主控制器和低轨（LEO, low earth orbit satellite）从属控制器。GEO 主控制器根据地面控制中心生成的移动性管理策略进行切换管理，LEO 从属控制器一方面补充 GEO 无法覆盖的极地地区的移动性管理^[19]，另一方面可根据业务分布及服务质量需求灵活配置并部署，以适应需求非均匀的特点。接入与转发平面负责终端接入控制和数据转发，由 LEO 卫星构成。

3.2.2 移动性预测技术

采用移动性预测进行切换判决是一种降低切换时延的有效方法，能够提前预测移动终端的位置，为移动终端预留网络资源以及实现预切换，从而保证服务质量^[21]。一方面，卫星运动是可以预测的，有助于在端点之间选择最优切换路径，避免不必要的切换；另一方面，可以通过对个性化业务、多样化移动场景以及复杂切换环境的预测，提高切换效率。在物联网业务特征研究方面，文献[22]给出了车联网、智能家居、智能农业、智能安防等典型物联网业务的特征参数。文献[23]针对物联网终端数据分组发送次数频繁、小数据通信的特性，对物联网中机器与机器（M2M, machine to machine）业务流进行建模，给出了 M2M 业务流的到达曲线。

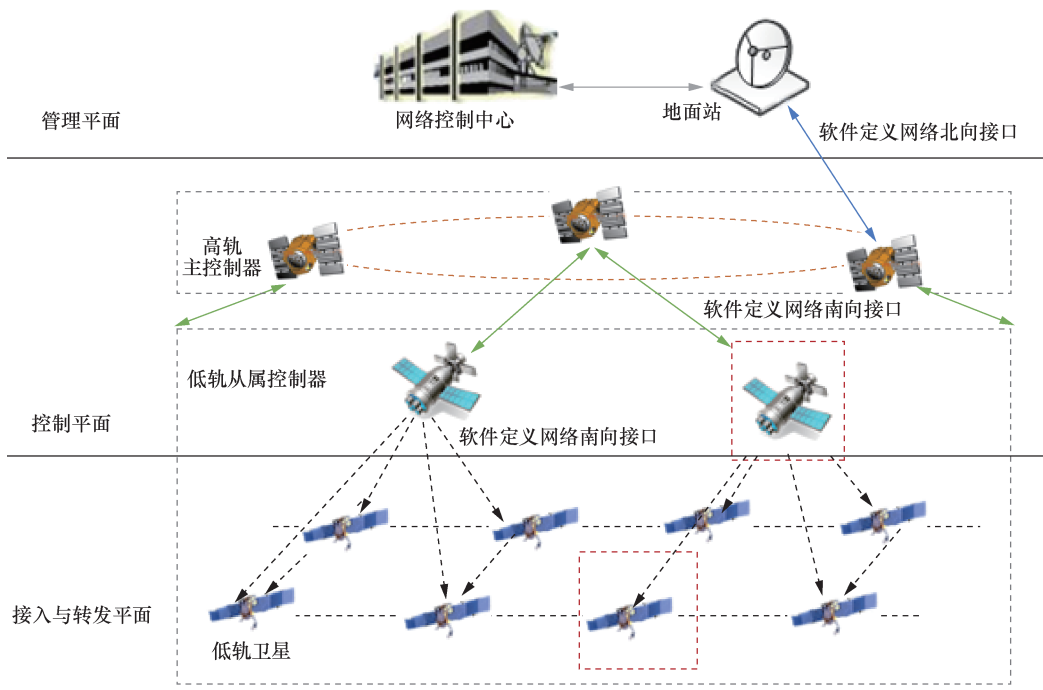


图 5 基于软件定义的卫星网络移动性管理架构

移动场景预测方面,文献[24]针对具有相同运动特征的用户,提出了一种基于群组质心向目标位置运动预测的质心目标模型,减少了单用户移动性管理中存在的重复开销。此外,基于终端移动轨迹和卫星运动规律,文献[25-26]提出了一种基于时间演进图的星间切换方法。综合多参数对切换性能的影响,文献[27-28]给出了基于智能学习的切换算法。上述针对业务特征、移动场景的研究能够为移动性预测提供有效的支持,综合终端侧移动与业务的预测和网络侧的运动与状态,是应对双移动现象的一种可行解决方案。

3.2.3 移动性管理增强技术

面向海量物联网终端,对业务时延不敏感的物联网终端,由于上行数据发送时无线信号质量差会严重影响终端能耗,可根据业务的时间容忍程度配置不同的时延传输时间。对具有弱移动特征的物联网终端,通过调整移动性管理的频率或简化管理过程来降低信令数量。对具有群组特性的物联网终端,网络可以对整个组统一管理,降低冗余的信令^[29]。

面向6G网络泛在连接,可以利用异构融合网络(地面蜂窝网、无线局域网、卫星网络)各自的优势,增强对终端的移动性支持。一方面,终端可以选择在最佳服务网络中切换;另一方面,终端可同时保持与多个无线接入网络的连接,终端不同的应用可使用不同的网络连接。如文献[30],针对密集网络频繁切换问题给出了单用户与双基站同时连接时的双连接切换方案。文献[31]给出了卫星网络和地面蜂窝网双连接模式下的流量切换管理方法。

4 展望

如何提供无缝移动性管理支持、保证服务质量将是卫星物联网面临的关键问题。从网络建设角度来看,我国卫星物联网星座结构与规模的设计需要综合考虑物联网业务需求总量及分布特征、网络建设成本、轨道及频率资源等因素^[32],兼顾广域覆盖与局部高容量覆盖的特点。从移动性管理的角度来看,网络架构是支持移动性管理的核心动力,基于软件定义的移动性管理架构提供了可编程、可管理的能力,面向业务服务质量,优化控制器实体的部署与功能定义是网络移动性管理能力提升的关键;构建基于终端业务、移动模型、切换边界环境以及

网络状态的智能学习模型,寻找终端侧个体移动、业务需求移动与网络侧节点运动、网络状态移动之间的匹配,最终实现网络自主切换管理;面向6G泛在连接,优化物联网终端在多异构网络中的接入和切换选择是增强服务质量的重要手段。

5 结束语

6G网络全球覆盖的能力给物联网的发展提供了更加广阔的平台,但移动卫星节点与终端设备之间的相对高速运动带来了服务连续性问题。本文首先分析了双移动、广域覆盖以及需求非均匀等因素对卫星物联网移动性管理的挑战,然后阐述了卫星网络移动性管理技术,讨论了应对上述挑战的移动性管理关键技术,包括面向卫星物联网的移动性管理架构、基于预测的移动性切换以及移动性管理增强技术等。最后,分析了面向卫星物联网移动性管理技术的发展趋势。

参考文献:

- [1] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-9.
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 6-9.
- [2] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景, 挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication network: vision, challenges and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [3] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [4] 孙晨华, 肖永伟, 赵伟松, 等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学, 2017, 33(12): 43-52.
SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. Development conception of space-ground integrated information network LEO mobile and broadband Internet constellation[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(12): 43-52.
- [5] 柳翌, 陆洲, 周彬, 等. 天基物联网发展设想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(6): 586-592.
LIU G, LU Z, ZHOU B, et al. Research on development of the space-based Internet of things[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(6): 586-592.
- [6] LYSOGOR I I, VOSKOV L S, EFREMOV S G. Survey of data exchange formats for heterogeneous LPWAN-satellite IoT networks[C]//2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). IEEE, 2018: 1-5.
- [7] 张勇, 杨林森, 李晓钰. 低轨卫星通信系统及多波束切换技术综述[C]//

- 第十五届卫星通信学术年会论文集. 2019.
- ZHANG Y, YANG L S, LI X Y. A survey of the low orbit satellite communication system and multi-beam switching technology[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference on Satellite Communications. 2019.
- [8] 沈慧. “瓢虫系列”卫星应用先行[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2019, 483(2): 28-29.
- SHEN H. “Ladybug series” satellite application trials[J]. Satellite TV and Broadband Multimedia, 2019, 483(2): 28-29.
- [9] 沈淮, 杨庭辉. 天基物联, 毫瓦服务商业航天撬动万亿市场[J]. 卫星与网络, 2019(8): 5.
- SHEN H, YANG T H. Satellite IoT, milliwatt services: commercial spaceflight leverages trillion market[J]. Satellite and Network, 2019(8): 5.
- [10] FRAIRE J A, CÉSPEDES S, ACCETTURA N. Direct-to-satellite IoT—a survey of the state of the art and future research perspectives[C]//International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless. Cham: Springer, 2019: 241-258.
- [11] 陈山枝, 时岩, 胡博. 移动性管理理论与技术的研究[J]. 通信学报, 2007, 28(10): 123-133.
- CHEN S Z, SHI Y, HU B. Survey on the mobility management theory and technology[J]. Journal on Communications, 2007, 28(10): 123-133.
- [12] CHOWDHURY P K, ATIQUZZAMAN M, IVANCIC W. Handover schemes in satellite networks: state-of-the-art and future research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(4): 2-14.
- [13] WANG L, ZHANG N T. Dynamic location management in LEO networks[C]//The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. IEEE, 2002: 1397-1401.
- [14] 李恒智, 王春锋, 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(Z1): 143-150.
- LI H Z, WANG C F, WANG W Z, et al. Research on distributed mobile management of satellite network based on software define network[J]. Journal on Communications, 2017, 38(Z1): 143-150.
- [15] HAN W, WANG B, FENG Z, et al. Distributed mobility management in IP/LEO satellite networks[C]//2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). IEEE, 2016: 691-695.
- [16] ZHANG Z, ZHAO B, FENG Z, et al. MSN: a mobility-enhanced satellite network architecture: poster[C]//Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2016: 465-466.
- [17] YANG B, WU Y, CHU X, et al. Seamless handover in software-defined satellite networking[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(9): 1768-1771.
- [18] ZHANG Z, ZHAO B, YU W, et al. Supporting location/identity separation in mobility-enhanced satellite networks by virtual attachment point[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 42: 1-14.
- [19] XU S, WANG X W, HUANG M. Software-defined next-generation satellite networks: architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4027-4041.
- [20] YIN X, WANG L, JIANG S. A hierarchical mobility management scheme based on software defined networking[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2019, 12(2): 310-325.
- [21] 田洁, 赵季红, 曲桦. 泛在网络环境下移动性预测方法的挑战及关键思想[J]. 电信科学, 2013, 29(11): 66-71.
- TIAN J, ZHAO J H, QU H. Challenges and solutions of mobility prediction technology in ubiquitous network[J]. Telecommunications Science, 2013, 29(11): 66-71.
- [22] 王海陶, 宋小明, 卢纪宇. 物联网业务特征及业务模型研究[J]. 广西通信技术, 2013(3): 43-49.
- WANG H T, SONG X M, LU J Y. The research on characteristics and service model of Internet of things[J]. Guangxi Communication Technology, 2013(3): 43-49.
- [23] 吴璇, 朱晓荣. 基于随机网络演算的物联网业务流量建模与分析方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 22-28.
- WU X, ZHU X R. Stochastic network calculus approach for traffic modeling and analysis in Internet of things[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2018, 38(2): 22-28.
- [24] 林晓勇, 俞洋, 糜正琨. 一种基于用户行为预测的群移动性管理模型[J]. 电信科学, 2017, 33(8): 94-99.
- LIN X Y, YU Y, MI Z K. A model of group mobility management based on user behavior prediction[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(8): 94-99.
- [25] WU Z, JIN F, LUO J, et al. A graph-based satellite handover framework for LEO satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1548-1550.
- [26] 胡欣, 宋航宇, 刘帅军, 等. 基于时间演进图的 LEO 星间切换实时预测及更新方法[J]. 通信学报, 2018, 39(10): 43-51.
- HU X, SONG H Y, LIU S J, et al. Real-time prediction and updating method for LEO satellite handover based on time evolving graph[J]. Journal on Communications, 2018, 39(10): 43-51.
- [27] CHEN M, ZHANG Y, TENG Y L, et al. Reinforcement learning based signal quality aware handover scheme for LEO satellite communication networks[C]//International Conference on Human Centered Computing. Cham: Springer, 2019: 44-55.
- [28] 熊丹妮, 李屹. 星地融合网络中基于 Q 学习的切换算法研究[J]. 通信学报, 2015, 36(9): 252-258.
- XIONG D N, LI Y. Q-learning based handoff algorithm for satellite system with ancillary terrestrial component[J]. Journal on Communications, 2015, 36(9): 252-258.
- [29] 陈山枝, 王胡成, 时岩. 5G 移动性管理技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- CHEN S Z, WANG H C, SHI Y. Mobility management technology for 5G[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2019.
- [30] KANG S, CHOI S, LEE G, et al. A dual-connection based handover scheme for ultra-dense millimeter-wave cellular networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference: Mobile and Wireless Networks (2019 GLOBECOM MWN). IEEE, 2019.
- [31] WANG D, WANG Y, DONG S, et al. Exploiting dual connectivity for

handover management in heterogeneous aeronautical network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 62938-62949.

- [32] JIANG J, YAN S, PENG M. Regional LEO satellite constellation design based on user requirements[C]//2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2018: 855-860.

[作者简介]



白卫岗（1987- ），男，陕西宝鸡人，博士，西安电子科技大学博士后，主要研究方向为卫星互联网架构及移动性管理技术、水声通信及组网技术等。



盛敏（1975- ），女，湖南长沙人，博士，西安电子科技大学教授，主要研究方向为移动通信系统、移动自组织网、认知无线网络、异构网络融合以及空间信息网络等。



杜盼盼（1990- ），女，安徽砀山人，西安电子科技大学通信工程学院博士生，主要研究方向为卫星网络移动性管理技术等。