

面向 6G 的低轨卫星边缘计算架构研究*

吴健, 贾敏, 张良

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘要: 移动边缘计算(MEC)为了满足不断增长的计算需求被提出。在无处不在的连接和全球区域覆盖的驱动下, 低地球轨道(LEO)卫星可以突破地域限制, 实现全球无线覆盖, 是未来 6G 移动通信系统不可或缺的选择。因此考虑通过将边缘服务器放置在卫星上形成边缘计算卫星, 提出了一种卫星边缘计算的系统架构, 可以为地球上的偏远地区的用户或者极端环境需要应急通信的用户提供计算服务。

关键词: 边缘计算; LEO 卫星; 系统架构

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222988

中文引用格式: 吴健, 贾敏, 张良. 面向 6G 的低轨卫星边缘计算架构研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(6): 5-9, 13.

英文引用格式: Wu Jian, Jia Min, Zhang Liang. Research on 6G-oriented LEO satellite edge computing architecture[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 5-9, 13.

Research on 6G-oriented LEO satellite edge computing architecture

Wu Jian, Jia Min, Zhang Liang

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: Mobile edge computing(MEC) is proposed to meet the growing computing demands. Driven by ubiquitous connectivity and global regional coverage, Low Earth Orbit(LEO) can break through geographical restrictions and achieve global wireless coverage, which is an indispensable choice for future 6G mobile communication systems. Therefore, this paper considers the formation of edge computing satellites by placing edge servers on satellites, and proposes a system architecture for satellite edge computing, which can provide computing services for users in remote areas on the earth or users who need emergency communication in extreme environments.

Key words: mobile edge computing; LEO satellite; system architecture

0 引言

随着移动应用程序的快速增长, 虚拟现实、高清直播、自动驾驶、工业自动化、智能家居等众多具有发展前景的应用和服务应运而生。广泛的应用也需要海量的计算能力, 如虚拟现实^[1]和高清视频流^[2]。这些计算密集型应用对资源受限的终端设备提出了很高的要求, 用户仅仅依靠自身微弱的计算能力来处理这些海量的计算任务是远远不够的。

在这种需求下, 移动边缘计算(MEC)的概念被提出^[3]。通过将电信、IT 和云计算结合在一起, 将边缘服务器放置在靠近用户的位置, 直接为用户提供计算服务。MEC 不仅可以节约用户的能耗和延迟, 而且由于边缘服务器靠近用户终端, MEC 可以快速地对任务做出响应。因此, 工业界^[4]和学术界^[5]最近都做出了很多努力。

全覆盖是未来 6G 移动通信网络的重要方向。但是, 由于缺乏通信基础设施, 在偏远/农村地区提供通信计

算服务成为一项具有挑战性的任务。对于沙漠、森林、山地、海洋等一些恶劣环境, 地面网络也无法完全覆盖。此外, 在遭遇自然灾害时这种极端环境时, 地面网络也无法为需要应急通信的用户提供计算服务。低地球轨道(LEO)卫星作为 6G 的重要研究方向^[6], 具有广泛的覆盖范围、高吞吐量以及优秀的系统鲁棒性, 可以在全球范围内实现全覆盖, 并且在极端环境中功能也很强大。它们可以为地面用户提供无处不在的接入服务, 因而备受关注。

因此, 本文将 MEC 和低轨卫星的优势结合起来, 通过将边缘服务器放置在低轨卫星上, 使得卫星具有计算能力。无论用户是在极端的偏远地区, 还是在发生灾害时地面网络受损时地区, 低轨卫星都可以为地面用户提供无处不在的接入以及计算服务, 实现真正意义上的“万物互联”^[7]。不仅如此, 由于用户传输的信息在边缘服务器上执行, 信息的集中度较低, MEC 服务器受到攻击的可能性较小, 因此边缘计算模式可以保证用户信息的安全性和私密性^[8]。

近些年, 芯片得到了快速的发展^[9], 越来越多的处理

* 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900500); 黑龙江省优秀青年科学基金(YQ2020F001)

器模块在卫星上得到了应用,使得卫星获得了更强的计算能力。芯片技术的快速发展为卫星边缘计算的发展提供了强有力的支撑。

1 卫星边缘计算现状

目前,在卫星侧部署 MEC 服务器已成为一个新兴的关注点。在卫星边缘计算的场景下,用户将计算任务卸载到卫星上,以获得更小的延迟和能耗。

文献[10]研究了一种星空集成边缘计算网络(SAIECN),将低轨卫星和空中高空平台(HAP)相结合为地面用户提供计算服务。作者将优化目标定义为最小化 SAIECN 的加权和能耗,为了解决这个问题,作者将这个优化问题分解为 4 个子问题进行求解。对于 GUE 关联子问题,使用了基于二次变换的分数规划(QTFP)和凸函数差分。发射预编码子问题通过 QTFP 和加权最小均方法求解。计算任务分配使用内点方法求解,计算资源分配子问题以封闭形式推导。作者对 4 个问题分别迭代求解,使得系统的能耗可以维持在较低的水平。

文献[11]利用虚拟化,设计了资源立方体来描述多维虚拟资源的整合和状态。为了实现更高的资源利用率和更智能的连接,作者提出了分层架构和多个 M/M/1 排队模型,然后设计了资源立方体算法来降低系统总延迟。

文献[12]提出了一种新型卫星边缘计算框架。为了最小化用户侧的加权和能量消耗,作者将公式化的问题分解为两个分层的子问题。通过顺序分数规划方法和应用拉格朗日对偶分解方法解决了两层子问题,有效地降低了用户端的能耗,而且提高了卸载率。

文献[13]提出了一种具有 3 层计算架构的混合云和边缘计算低轨卫星网络,它可以为地面用户提供异构计算资源,并使地面用户能够获得全球计算服务。使用 CECLS 架构,研究了计算卸载决策,以最小化地面用户

的总能耗,同时满足每个 LEO 卫星的覆盖时间和计算能力方面的限制。作者提出了一种分布式算法逼近最优解,可以有效降低地面用户的总能耗。

文献[14]介绍了一种对于具有多颗卫星和多颗卫星网关的 MEC 增强型 SAT-IoT 网络架构。MEC 增强型 SAT-IoT 网络的延迟和能量优化被表述为一个动态混合整数规划问题,作者将这个复杂问题分解为两个子问题,并基于深度强化学习(DRL)对这两个问题进行求解,获得了较低的系统延迟和能耗。

在卫星边缘计算中,计算卸载问题和资源分配问题也得到了广泛的研究。

文献[15]研究了星地边缘计算网络中的任务卸载问题,其中任务可以由卫星或地面云中心执行。作者提出一种学习类算法,可以通过调整候选位置的数量来加速学习过程,可以用极少的运行时间消耗实现接近最优的卸载成本。

文献[16]针对一种新型星地双边边缘计算系统,提出基站任务执行顺序和卫星资源分配算法使得 MEC 资源提供者获得满意的效益。

文献[17]提出了一种航天辅助混合云边缘计算框架,优化目标是最小化系统终端用户之间的最大计算延迟。在保证收敛的前提下,本文提出了一种替代优化算法对系统进行优化,实现了更好的收敛性和更低的计算延迟。

文献[18]介绍了在一些特殊的极端场景下,空天地一体化网络(SAGIN)结合边缘计算可以为偏远地区的用户提供车联网服务。作者提出了预分类方案和基于 DIL 的决策算法,得到了最短的任务完成时间。

2 卫星边缘计算系统架构

卫星边缘计算的系统架构图如图 1 所示,其中每个

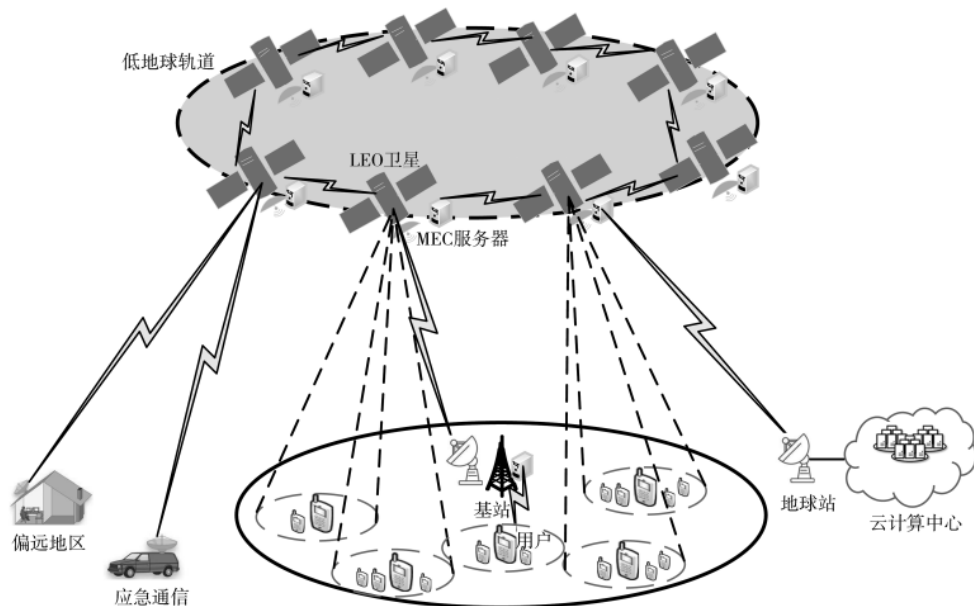


图 1 卫星边缘计算系统架构

LEO 卫星上都配置了 MEC 服务器, 可以为偏远地区的用户或者地面基础设施受损需要应急通信的用户提供计算服务, 用户可以将计算任务卸载到低轨卫星上进行计算, 也可以将任务通过低轨卫星转发到远处的云中心进行计算。

图 1 所示的卫星边缘计算的系统架构图中出现的模块解释如下:

(1) LEO 卫星: 配备 MEC 服务器的 LEO 卫星为地面用户提供服务, 或者将用户卸载的计算任务转发到远处的云计算中心进行计算。如果卫星想将计算任务转发到远处的云计算中心进行计算, 需要先将任务卸载到地面站, 地面站再将任务发送给远处的云计算中心。

(2) 地面站: 地面站可以分析从 LEO 卫星接收到的原始数据, 或将数据发送到远程云计算中心。有计算需求的地面用户分为两类: 一类是分布密集的密集用户, 一类是分布稀疏或者需要应急通信的稀疏用户。

(3) 云计算中心: 计算资源丰富, 而且可以为外界提供高性能计算服务、存储服务的机构。

针对本文提出的卫星边缘计算的系统架构图, 本文考虑了两种应用场景: (1) 针对密集用户, 当用户分布得比较密集, 而且地面基础设施可用的情况下, 用户可以通过具有强大功能的地面站与卫星连接通信, 对于地面系统, 可以通过搭建基站来构造地面网络为用户提供计算服务; (2) 针对稀疏用户, 当用户分布稀疏时, 例如当用户处于偏远地区, 或者当发生自然灾害基础设施受损时, 地面用户需要应急通信, 地面网络此时可能无法为用户提供计算服务。本文考虑配备 MEC 服务器的 LEO 卫星为地面用户提供服务, 也可以将用户卸载的计算任务转发到远处的云计算中心进行计算。

3 卫星边缘计算机遇、优势与未来展望

机遇: 对于卫星边缘计算架构来说, 无论是产业界还是学术界, 相关的成果都是很有局限的。目前关于卫星边缘计算的文献研究还不是很多, 相关标准还在讨论和制定过程中, 相关的白皮书还比较空缺, 通信的技术细节还有待商榷。针对为偏远地区的用户或者地面基础设施受损需要应急通信的用户提供的业务来说, 卫星边缘计算系统目前可能只能提供简单的语音通信业务或者视频通信业务, 所以需要对卫星边缘计算的业务范围进行扩展, 以满足不同用户的不同业务需求。对于这些空缺和需求, 相关领域的机构和人员仍然需要开展大量的工作。

卫星边缘计算具有很大的优势, 主要有 3 点: (1) 计算卸载, 可以为计算能力受限的地面用户提供更强大的计算能力; (2) 内容缓存/存储, 它能够缓存内容并存储数据文件, 以减少相同内容的重复传输; (3) 安全性, 由于边缘计算减少了传输到云中心的数据数量, 使得用户数据可以在边缘进行处理, 这大大增加了用户信息的安全性。

计算卸载: 对于计算资源有限的地面用户, 通过将计算任务卸载到具有 MEC 服务器的低轨卫星中, 可以大大减少用户处理任务所需的延迟和能耗, 用户可以得到更好的体验质量。而且当用户处于偏远地区, 或者当发生自然灾害基础设施受损时, 地面用户需要应急通信时, 由于低轨卫星具有广泛的覆盖范围和高吞吐量以及优秀的系统鲁棒性, 低轨卫星可以为任何位置的用户提供计算服务。

内容缓存/存储: 随着用户数据的爆炸增长, 用户每天需要处理海量的数据, 尤其是多媒体数据, 给移动网络带来了很大的压力。针对数据的爆炸性增长问题, 其中一种有效的解决方法是使用缓存^[19]来减少系统中数据的传输, 通过将内容缓存在卫星或地面站中, 可以避免相同内容的重传, 大大减少系统的流量。

安全性: 对用户信息的隐私保护和安全能力是 MEC 的一个优势。对于传统的云计算, 用户将计算任务卸载到公共的远程云计算平台进行计算, 如 AWS^[20]和微软 Azure^[21]。由于用户的信息都高度集中地处理, 因此这种模式下的用户信息安全性得不到保证, 很容易受到攻击。现在将用户的信息卸载到携带边缘服务器的低轨卫星上, 由于用户的信息不再集中处理, 而是在边缘服务器上处理, 因此用户信息的安全性可以得到保障。

对 6G 网络架构的研究, 全覆盖、大规模、快速的通信服务是一项重要要求, 尤其是在偏远或极端环境下, 为用户提供接入服务更为重要。星地协同网络作为一种新型的网络架构^[22], 可以覆盖天、空、陆、海等自然空间。它可以为用户提供全覆盖、大规模、快速的通信服务, 可以为偏远地区的用户提供计算服务。未来的研究方向是边缘计算在星地协同网络中的应用, 星地协同网络可以实现大规模、快速的通信服务。考虑将移动边缘计算的思想应用到星地协同网络中, 可以为地球上任何偏远或极端环境的用户提供快速、安全的计算服务。

4 卫星边缘计算面临的挑战

虽然卫星边缘计算具有很多优势, 但仍面临以下挑战:

(1) 对于低轨卫星边缘计算场景, 辐射是卫星边缘计算场景的一大威胁, 因为芯片容易受到太阳耀斑和宇宙辐射的影响^[23]。辐射会导致 RAM 中的“位翻转”并重新启动应用程序执行。因此, 芯片的设计是一个很大的挑战。

(2) 低轨卫星的能源供应是一个很大的挑战^[24]。卫星必须从太空收集能量以进行通信和数据处理。然而, 由于低轨卫星体积小, 太阳能电池板表面积有限, 卫星上的边缘服务器获得的能源是有限的。对于一些需要较高能耗的计算任务, 例如人工智能领域的一些学习类算法, 直接使用卫星上的边缘服务器进行计算可能是比较困难的, 所以低轨卫星的能源供应面临挑战。

(3)在太空中,卫星的状态是一直高速动态变化的。很多时候,对于一些较复杂的计算任务,卫星可能无法在一次对地面用户服务时间范围内完成这个计算任务,所以任务的迁徙^[25]与计算任务的卸载比例问题^[26]是一个需要考虑的问题。而且在不同的时刻,卫星边缘服务器的资源状态也是不同的,对于不同用户生成的不同的计算任务,如何动态地进行资源分配也是需要解决的问题。

(4)长传播延迟是卫星边缘计算的一个挑战。在星地链路中,往往会有比较大的单向延迟,这种延迟通常会降低实时应用程序的性能。在太空中,星群的行为和架构是通过地面站统一调配控制的,这些复杂的控制过程是通过信令交互实现的^[27],而在星地之间远距离的多重信令交互过程中,可能会影响系统的服务响应速度。另一方面,在一些时候,卫星和地面站之间的下行链路不可靠。卫星相对于地面站的高移动性^[28]使卫星边缘计算复杂化,并限制了链路可用性。因此,间歇性可用的下行链路会在卫星边缘计算中产生高延迟^[29],这种高延迟有时可能无法满足 6G 所需的服务时延需求,会影响用户的体验质量^[30]。

5 结论

由于边缘服务器相比于用户终端有更强大的计算能力和快速的响应速度,低轨卫星有广泛的覆盖范围,可以在全球范围内实现全覆盖,因此,考虑在低轨卫星上部署边缘服务器,为偏远地区的用户或者遇到自然灾害导致地面基础设施受损时需要应急通信的用户提供计算服务。本文首先对 MEC 技术和低轨卫星进行了基本介绍;接着阐述了卫星边缘计算的国内外研究现状;然后描述了一种卫星边缘计算网络的系统架构,针对该架构,详细地讨论了结构中各个模块的功能并给出了该架构不同的应用场景;最后本文总结了卫星边缘计算的机遇、优势、未来的展望和面临的挑战。

参考文献

- [1] AL-ANSI A, AL-ANSI A M, MUTHANNA A, et al. Survey on intelligence edge computing in 6G: Characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers[J]. Future Internet, 2021, 13(5): 118.
- [2] JIANG X, YU F R, SONG T, et al. A survey on multi-access edge computing applied to video streaming: Some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 871-903.
- [3] HU Y C, PATEL M, SABELLA D, et al. Mobile edge computing—a key technology towards 5G[J]. ETSI White Paper, 2015, 11(11): 1-16.
- [4] RAZAQUE A, ALOQAILY M, ALMIANI M, et al. Efficient and reliable forensics using intelligent edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 118: 230-239.
- [5] DEC G, STADNICKA D, PASKO L, et al. Role of academics in transferring knowledge and skills on artificial intelligence, Internet of Things and edge computing[J]. Sensors, 2022, 22(7): 2496.
- [6] NDIAYE M, SALEY A M, NIANE K, et al. Future 6G communication networks: Typical IoT network topology and terahertz frequency challenges and research issues[C]//2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology(IRASET). IEEE, 2022: 1-5.
- [7] ZHAO M, CHEN C, LIU L, et al. Orbital collaborative learning in 6G space-air-ground integrated networks[J]. Neurocomputing, 2022.
- [8] RANAWEERA P, JURCUT A D, LIYANAGE M. Survey on multi-access edge computing security and privacy[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 1078-1124.
- [9] RESCA D, SCAPPAVIVA F, BIONDI A, et al. A Ku band MMIC single chip frequency converter for telecom satellite applications[C]//2020 15th European Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC). IEEE, 2021: 57-60.
- [10] DING C, WANG J B, ZHANG H, et al. Joint optimization of transmission and computation resources for satellite and high altitude platform assisted edge computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(2): 1362-1377.
- [11] CHEN D, YANG C, GONG P, et al. Resource cube: Multi-virtual resource management for integrated satellite-terrestrial industrial IoT networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(10): 11963-11974.
- [12] SONG Z, HAO Y, LIU Y, et al. Energy-Efficient multiaccess edge computing for terrestrial-satellite internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14202-14218.
- [13] TANG Q, FEI Z, LI B, et al. Computation offloading in leo satellite networks with hybrid cloud and edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(11): 9164-9176.
- [14] CUI G, LI X, XU L, et al. Latency and energy optimization for MEC enhanced SAT-IoT networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 55915-55926.
- [15] ZHU D, LIU H, LI T, et al. Deep reinforcement learning-based task offloading in satellite-terrestrial edge computing networks[C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). IEEE, 2021: 1-7.
- [16] WANG B, LI X, HUANG D, et al. A profit maximization strategy of MEC resource provider in the satellite-terrestrial double edge computing system[C]//2021 IEEE 21st International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE, 2021: 906-912.
- [17] CHENG N, LYU F, QUAN W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(5): 1117-1129.

- [18] YU S, GONG X, SHI Q, et al. EC-SAGINs: Edge computing-enhanced space-air-ground integrated networks for internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5742-5754.
- [19] XIE R, TANG Q, WANG Q, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: Architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [20] PELLE I, CZENTYE J, DOKA J, et al. Towards latency sensitive cloud native applications: A performance study on aws[C]//2019 IEEE 12th International Conference on Cloud Computing(CLOUD). IEEE, 2019: 272-280.
- [21] UCUZ D. Comparison of the IoT platform vendors, microsoft azure, amazon web services, and Google Cloud, from users' perspectives[C]//2020 8th International Symposium on Digital Forensics and Security(ISDFS). IEEE, 2020: 1-4.
- [22] ZHU X, JIANG C, YIN L, et al. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981-992.
- [23] HASSAN H, SHAFEEY N Y A. 3D study of convection-

(上接第4页)

切换并保证一致的用户体验。

参考文献

- [1] 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): 8.
- [2] SORET B, LEYVA-MAYORGA I, CIONI S, et al. 5G satellite networks for Internet of Things: Offloading and backhauling[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 431-444.
- [3] DI B, ZHANG H, SONG L, et al. Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 47-62.
- [4] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [5] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [6] CHEN S, SUN S, KANG S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [7] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
- [8] 汪春霞, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.

radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106585.

- [24] HUANG H, GUO S, LIANG W, et al. Coflow-like online data acquisition from low-earth-orbit datacenters[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(12): 2743-2760.
- [25] TONG M, WANG X, LI S, et al. Joint offloading decision and resource allocation in mobile edge computing-enabled satellite-terrestrial network[J]. Symmetry, 2022, 14(3): 564.
- [26] WANG H, WANG H, AN J. Dynamic game-based computation offloading and resource allocation in LEO-multiaccess edge computing[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021: 1-13.
- [27] YANG J, WANG A, YE N, et al. Simplified random access design for satellite internet of Things with NOMA[C]//2021 International Wireless Communications and Mobile Computing(IWCMC). IEEE, 2021: 128-132.
- [28] CAO H, ZHU W, FENG W, et al. Robust beamforming based

(下转第13页)

- [9] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面 5G 融合发展路线探讨[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 115-124.
- [10] ITU-R M.2460-0, key elements for integration of satellite systems into next generation access technologies[R]. ITU, 2019.
- [11] 3GPP TS 22.261, service requirements for the 5G system; stage 1[S]. 3GPP, 2017.
- [12] 3GPP TR 38.821, solutions for NR to support non-terrestrial networks(NTN)[R]. 3GPP, 2019.
- [13] 3GPP TR 23.737, study on architecture aspects for using satellite access in 5G[R]. 3GPP, 2020.
- [14] 3GPP TS 23.501, system architecture for the 5G system (5GS); stage 2[S]. 3GPP, 2021.
- [15] 3GPP RAN WG.RP-213690. New WI: NR NTN(non-terrestrial networks) enhancements[R]. 3GPP, 2021.
- [16] 3GPP SA WG.SP-211651. New SID: 5GC enhancement for satellite access Phase 2[R]. 3GPP, 2021.
- [17] 3GPP SA WG.SP-211639. New SID on study on support of satellite backhauling in 5GS[R]. 3GPP, 2021.

(收稿日期: 2022-05-24)

作者简介:

王胡成(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 移动通信网络架构、组网以及协议。

徐晖(1969-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 移动通信核心网技术、天地融合网络技术。

孙韶辉(1972-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 移动通信系统设计与多天线技术、卫星通信、定位等关键技术。



扫码下载电子文档

构,其无铰链式空间可展薄壁结构是近年来国际上新研制的可自展开机构,在收拢状态下自然卷绕成圆环状,储存应变能。在轨状态时,利用存储的应变能驱动太阳阵在轨展开,展开后结构变为开口较小的“C”形,具备较大刚度,如图8所示,具有质量轻、收拢体积小、无需铰链等优势。C形杆通常采用碳纤维复合材料制作而成,相比于刚性太阳阵及展开机构,具备许多优点,但与整个柔性太阳电池毯连接后,展开过程中存在易松脱,且展开态下刚度相对弱、基频低等问题,制约着该类结构的广泛应用。



图8 C形薄壁式伸展杆卷绕及展开状态图^[9]

作为 ROSA 展开机构中最重要构件和最关键组成部分,在 C 形杆及其附属机构研制及设计过程中,需解决双臂同步、有序展开过程。采用的 C 形杆应具备可精确控制的特性。在柔性太阳电池电路的基础上,统筹考虑伸展杆展开过程不同位置所需展开驱动力差异,以及杆的根部及端部结构强度差异,从而对薄壁伸展杆做系统设计。满足伸展杆不同位置结构强度要求,做到多层卷绕结构自外而内,双臂有序缓慢展开。

2.5 关键技术总结

国外开展 ROSA 卷绕式太阳电池阵研究已逾 10 年,在多颗卫星和航天器上实现了在轨应用。针对 ROSA 的研发,我国急需突破多项关键技术。例如,柔性功率传输需突破在轨高可靠扁平化电缆制备与卷绕式布线设计技术;模块化组件需突破高热交变寿命的柔性太阳电池组件设计技术;柔性基板需突破轻量化、大尺寸、高可靠、高收纳比、可卷曲、高热稳定性的柔性基板制备技术;柔性展开机构技术需突破双臂同步、有序展开的高稳定 C 形碳纤维伸展杆设计及制备技术。

(上接第 9 页)

on graph attention networks for IRS-assisted Satellite IoT Communications[J].Entropy, 2022, 24(3): 326.

[29] DENBY B, LUCIA B. Orbital edge computing: Nanosatellite constellations as a new class of computer system[C]//Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, 2020: 939-954.

[30] CUI H, ZHANG J, GENG Y, et al. Space-air-ground integrated network(SAGIN) for 6G: Requirements, architecture and

3 结论

卷绕式柔性太阳电池阵具有质量比功率高、收纳比高、易扩展、可批量生产等特点,成为 6G 卫星星座较理想的太阳电池阵方案。本文介绍了卷绕式太阳电池阵的发展历史,分析了研制过程中的一些关键技术,包括柔性功率传输技术、模块化组件技术、柔性基板技术、柔性展开机构技术等。对卷绕式太阳电池阵的研制及未来 6G 卫星星座太阳电池阵选型具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 张少伟.面向物联网业务的空天地一体网络多层架构研究[J].电子技术应用, 2021, 47(6): 6-9.
- [2] 张军民.面向 6G 太赫兹传播模型研究[J].电子技术应用, 2021, 47(12): 15-17, 21.
- [3] 白卫岗, 盛敏, 杜盼盼. 6G 卫星物联网移动性管理: 挑战与关键技术[J].物联网学报, 2020, 4(1): 104-110.
- [4] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J].电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
- [5] 吴胜宝, 胡冬生. 国外“一箭多星”发射现状及关键技术分析[J].国际太空, 2015(10): 18-22.
- [6] 于辉, 张伟, 崔新宇, 等. 空间太阳电池阵技术现状及发展趋势[J].电源技术, 2020, 44(10): 1552-1557.
- [7] CHAMBERLAIN M K, KIEFER S H, LAPOINTE M, et al. On-orbit flight testing of the roll-out solar array[J].Acta Astronautica, 2021, 179: 407-414.
- [8] SPENCE B R, WHITE S, LAPOINTE M, et al. International space station(ISS) roll-out solar array(ROSA) spaceflight experiment mission and results[C]//2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC).IEEE, 2018.
- [9] DAVIS B, FRANCIS W, GOFF J, et al. Big deployables in small satellites[C]//The 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.

(收稿日期: 2022-03-24)

作者简介:

张伟(1987-),男,博士,工程师,主要研究方向:太阳电池阵设计。



扫码下载电子文档

challenges[J].China Communications, 2022, 19(2): 90-108.

(收稿日期: 2022-05-18)

作者简介:

吴健(1999-),男,博士研究生,主要研究方向:卫星边缘计算。

贾敏(1982-),通信作者,女,博士,教授,主要研究方向:天地一体化认知通信、组网与接入技术, E-mail: jiamin@hit.edu.cn.



扫码下载电子文档

张良(1994-),男,博士研究生,主要研究方向:星地边缘计算。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所