

卫星云网：一种云网融合的卫星网络体系架构

虞志刚，丁文慧，陆洲，冯旭，高吉星
(中国电子科技集团公司电子科学研究院，北京 100041)

摘 要：随着地面移动通信网络从信息随心至的 5G 时代，迈向万物互联的 6G 时代，卫星网络逐渐成为世界各国发展热点。与此同时，随着星上计算能力提升，星上计算技术与卫星网络技术融合，云网融合成为新的发展趋势。在简要介绍卫星网络、星上计算发展现状的基础上，系统梳理卫星网络发展架构的路线图，提出一种云网融合的卫星网络体系架构，简称卫星云网，并从通信接入、网络传输、服务、控制、管理等 5 个方面分析卫星云网体系架构相较于传统卫星网络体系架构的优势。

关键词：卫星网络；星上计算；网络架构；云网融合

中图分类号：TN92

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023027

Satellite Cloud Network: A Satellite Network Architecture Based on Cloud-Network Integration

YU Zhigang, DING Wenhui, LU Zhou, FENG Xu, GAO Jixing
China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: With the public land mobile communication network transitioning from the 5G era where information flows freely to the 6G era where everything is interconnected, satellite networks have become a hot development topic all around the world. At the same time, with the improvement of satellite on-board computing capabilities and the integration of computing and satellite networks, cloud network integration has become a new development trend. On the basis of a brief introduction to the current development status of satellite networks and satellite computing, the development roadmap of satellite network development architecture was summarized. Then, a satellite network architecture based on cloud-network integration (i.e. satellite cloud network) was proposed, and the advantages of satellite cloud network architecture from five aspects: computing driven communication enhancement, computing driven network enhancement were analyzed, computing driven service enhancement, computing driven control enhancement, and computing driven management enhancement.

Keywords: satellite network, satellite computing, network architecture, cloud-network integration

0 引言

随着航天技术的迅猛发展，以及商业航天的日益成熟，航天制造、发射成本大幅降低，世界各国纷纷提出卫星网络计划，布局以低轨卫星网络为代表的卫星网络建设，谋求在未来网络技术领域的先发优势和主动权^[1]。与此同时，随着地面移动通信网络从信息随心至的 5G 时代，

迈向万物互联的 6G 时代，构建“网络无所不达、服务无处不在”的卫星互联网，已逐渐成为行业发展共识，更是全球科技创新的焦点^[2-6]。2023 年 6 月，国际电信联盟完成了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》，将“泛在连接”纳入 6G 网络六大场景之一。

随着航天电子技术的迅猛发展以及商用货架器件在航天领域的广泛使用，星上计算能力快速跃升，已经逐渐

收稿日期：2023-06-10；修回日期：2023-08-31

基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 62201534, No. 61931017）；国家重点研发计划资助项目（No. 2020YFB1806000）；复杂电子系统仿真重点实验室基金项目（No. 614201004032101）

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No. 62201534, No. 61931017), National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806000), Key Experimental Foundation of Complex Electronic System Simulation (No. 614201004032101)

告别“单片机”时代^[7-8]。

星上计算是地面计算技术应用于卫星等航天器产生的新技术,按照星上计算与地面之间的关系可划分为星上边缘计算和星上云计算两个阶段:星上边缘计算是相对于地面云计算中心而言,强调星上计算对地面计算存在依赖关系,是地面计算的一种补充。当前星上计算能力相对受限,正处于星上边缘计算阶段,国内外开展了大量研究^[9-16];星上云计算是在星上边缘计算的基础上,借鉴分布式、云计算理念形成的新概念,强调随着航天电子技术进步,特别是高性能宇航级处理芯片的出现以及商用货架芯片的使用,未来星上计算将有望摆脱对地面的依赖,成为一个独立的功能域——星上云计算,不再是地面的边缘,而是可独立运行的卫星云,也就是说,星上云计算是星上边缘计算发展的高级形态。

伴随着星上计算能力的大幅提升,卫星将具备较强的处理能力,通信卫星已经告别星上“透传”阶段,正在迈入星上“处理与组网”阶段,并逐渐向未来星上“云网”阶段演进。纵观国内外卫星网络架构,根据星上处理能力所处阶段可划分为以下 3 类。

一是星上“透传”架构,主要应用于星上计算能力较弱的场景,星上采用透明转发模式^[17-18],即星载“转发器”仅对物理信号按照提前预设的规则进行变频,再重新转发至地面站,不对接收到的电磁信号进行调制/解调等处理。传统卫星通信系统多属于此类,卫星不组网、地面组网,用户之间通过卫星或地面站(网)进行互联互通,故亦称“天星地网”架构。

二是星上“处理与组网”架构,主要应用于星上计算能力较强的场景,卫星之间通过星间链路进行组网,即在透明转发模式基础上,星上引入信号解调、译码、编码和调制等系列处理单元,形成星载“基站”“路由器”,并且辅助以星间链路技术,卫星节点之间构建网络。铱星二代等低轨星座均属于这类架构^[10]。卫星组网、地面组网,用户之间通过卫星(网)或地面站(网)实现互联互通,核心特征是“连接”在星,故亦称为“天网地网”架构。

三是星上“云网”架构,主要应用于星上计算能力进一步增强的场景,在卫星之间通过星间链路组网的基础上,通过将部分计算、存储以及信息服务功能“前置”到星上,在极大提升服务响应速度的同时,也促使由提供“连接”的卫星网络,向提供“连接+计算”服务的卫星云网转变,核心特征是“连接+计算”服务在星,本文将此架构称为“卫星云网”架构。

卫星云网是卫星网络与星上计算的深度融合,本文从

融合的角度出发,梳理了现有卫星网络的体系架构的发展历程与典型特征,并在此基础上,提出了云网融合的卫星网络的体系架构和设想。

1 卫星网络架构发展趋势与设想

卫星网络体系架构根据星上计算处理能力的不同,可分为 3 阶段,如图 1 所示。

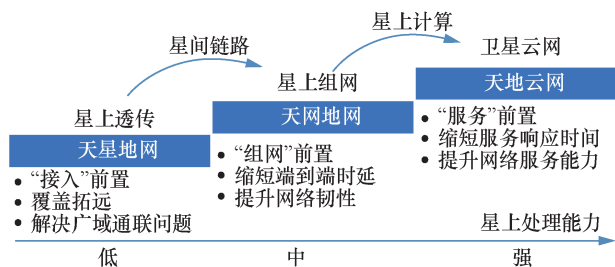


图 1 卫星网络体系架构发展阶段

通过这 3 个阶段,卫星网络逐渐从提供“连接”服务的卫星通信,到提供“组网”服务的卫星网络,再到提供“组网服务+云服务”的卫星云网。

1.1 星上透传(天星地网)架构

卫星网络体系架构发展历程如图 2 所示。传统卫星通信系统以高轨卫星通信系统为主,凭借其高、广、远的优势,理论上仅需 3 颗卫星即可实现全球覆盖(除两极)。此时卫星以透明转发为主,星上仅对信号进行放大和转发,不进行处理,此时并不存在所谓的“卫星网络”,每颗卫星和地面站之间配合,单独为特定用户提供通信服务。此架构下也存在广义的卫星网络概念,但严格上讲,是卫星用户之间的网络——用户网络。以图 2(b)为例,多个用户之间通过卫星、地面站构建成一个任务网络,卫星之间并不组网,地面站之间可以组网,此种情况也常被形容为“天星地网”,卫星类似于信号放大器,实现信号覆盖范围扩大。

1.2 天上组网(天网地网)架构

卫星网络狭义上理解就是“卫星之网络”,指的是天地组网架构,通过图 2(c)可以看出,卫星之间通过星间链路构建网状网络,相比于传统卫星通信,卫星网络将组网前置、连通性前置。此种情况下,用户之间互联互通的路径更短,传输时延也更低,同时卫星也可以更多地摆脱对地面站的依赖,形成一个可以独立运行的网络实体,提升网络的鲁棒性。传统卫星通信是在地面站组网,不同卫星之间的用户需要通过地面站网才能实现互联互通,即两跳通信;卫星网络场景下,终端之间可以通过卫星直接互联,可大幅缩减端到端通信时延。

1.3 卫星云网（天地云网）架构

卫星云网是卫星网络发展的高级形态，是卫星网络技术与星上计算技术融合的产物^[11-12]，也是情报信息在轨处理等各类时敏应用对卫星网络的新要求，通过星上处理，可以极大地提升服务时效性。此时，卫星节点在通信、网络功能之外提供计算服务，并在此基础上，通信、网络、计算资源高度共享、融合，实现卫星网络从传统的管道向服务跃升，提供多样化服务。

图2(d)给出了卫星云网架构，卫星云网是在卫星网络体系架构的基础上，形成的服务型卫星网络，相较于传统卫星通信、卫星网络，卫星云网将服务前置到了卫星，将分布式部署在各颗卫星上的计算资源通过星间链路构成一个云计算资源池，根据应用需求按需调度，从而使卫星功能实现了极大丰富，可以进一步缩短服务响应时间。如图3所示，通过将广域分布式的星上计算资源、地面计算资源协同融合起来，构建卫星云网，可为各种航天应用提供“计算基座”。

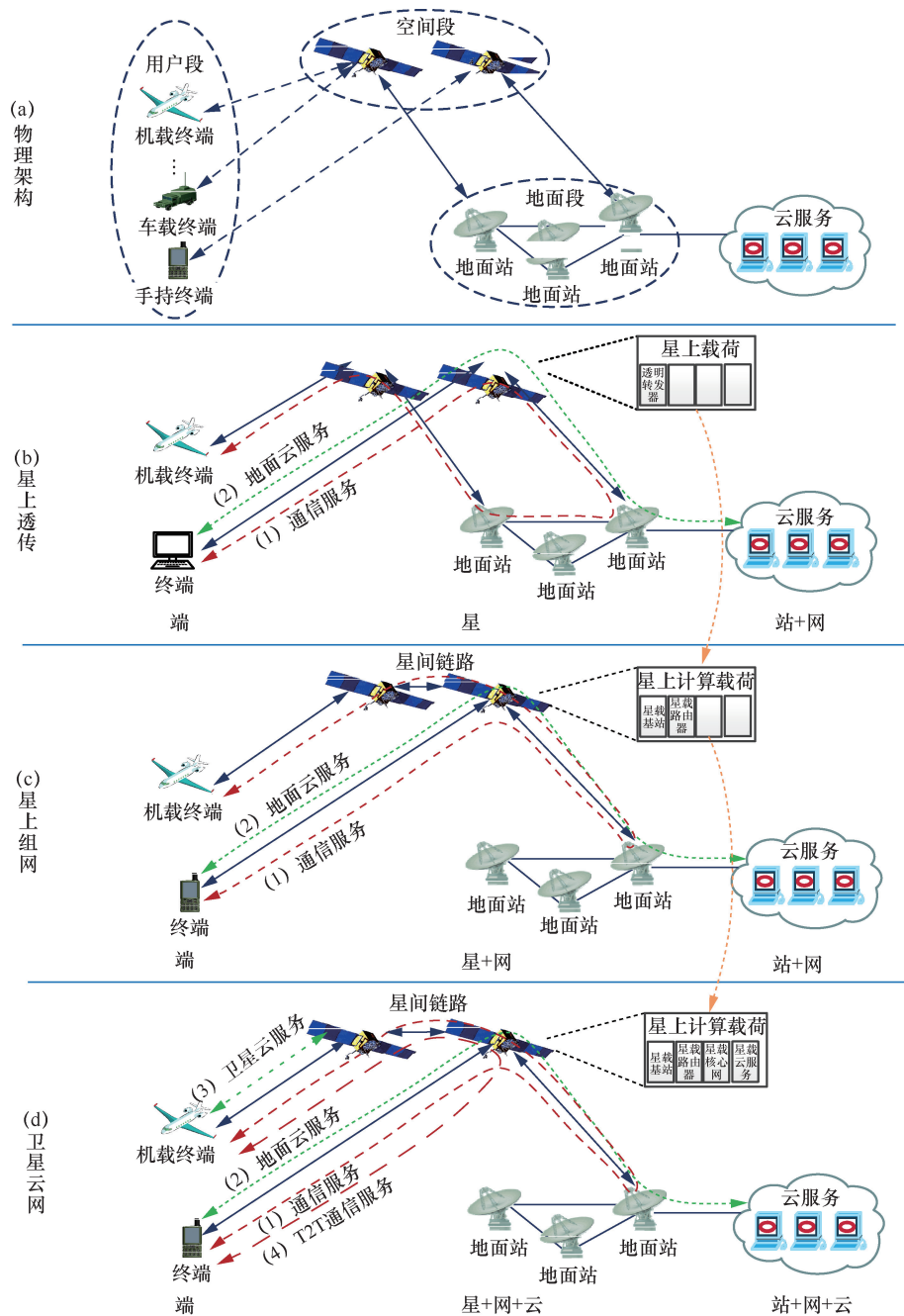


图2 卫星网络体系架构发展历程

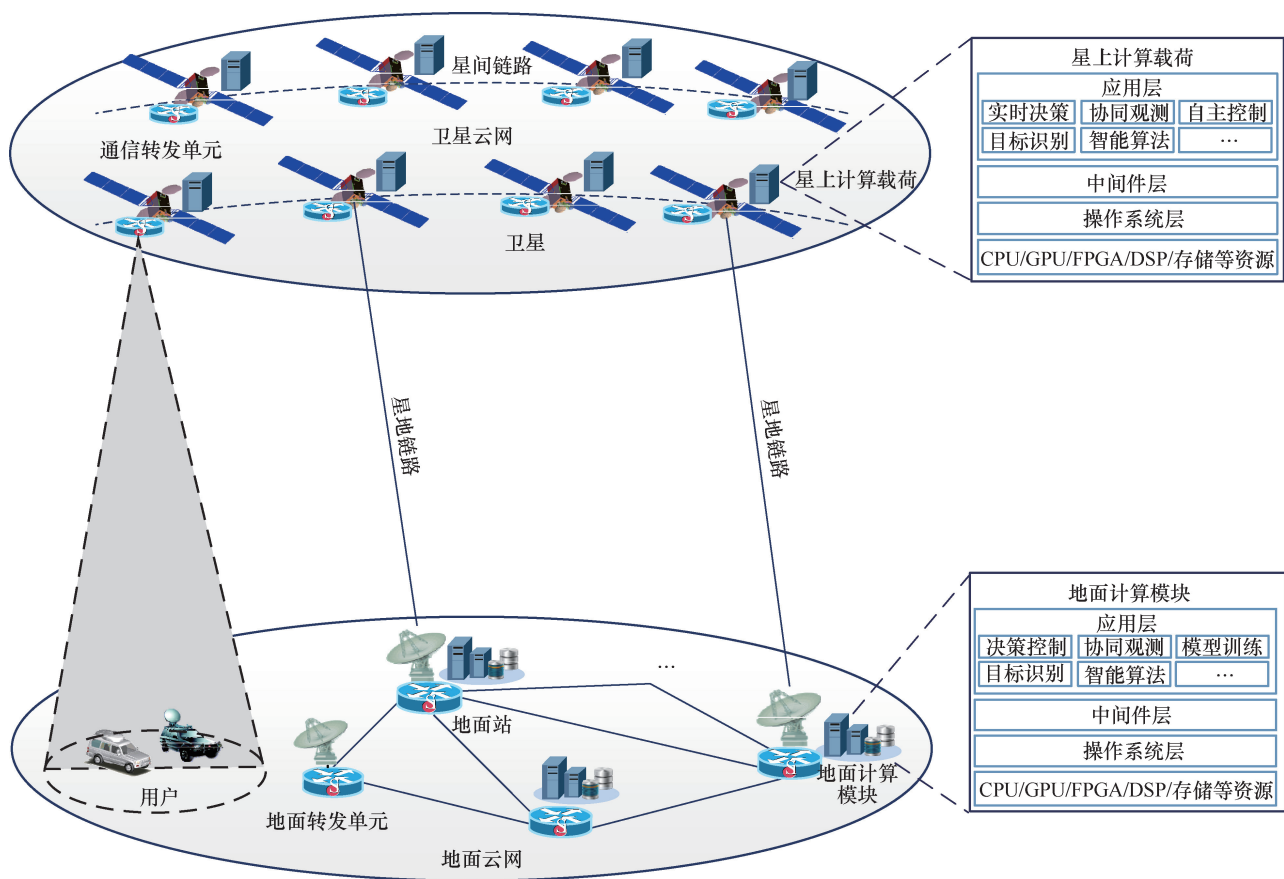


图 3 卫星云网（天地云网）架构示意

2 卫星云网特征分析

有别于传统的卫星网络，卫星云网将计算技术与网络技术深度融合，通过对卫星网络、计算资源的统一管理、联合调度，最终使卫星网络各方面能力进一步增强或改善，下面从通信接入、网络传输、服务、控制以及管理等 5 个方面详细分析。

2.1 计算驱动的通信接入增强

随着星上计算能力的提升，学术界广泛提出将部分通信功能迁移到卫星上，从而实现通信服务能力的增强和优化^[17-26]。

(1) 数据面

一方面，通过将基站相关功能部署在卫星上，如图 4 所示，实现星上直接进行射频和基带处理，改变传统透明转发器只在星上进行上下变频处理等模式，通过卫星节点具备基站的完整能力，为用户提供无线接入功能，避免因为长距离传输造成的噪声积累。与此同时，卫星之间通过星间链路构建一张卫星承载网络，实现星载基站与地面核心网之间的互联互通。

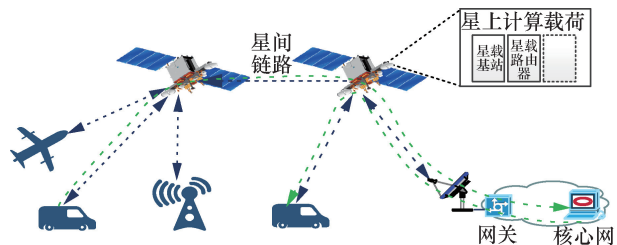


图 4 星载基站场景(支持星上基带处理,为用户提供无线接入功能)

另一方面，将部分核心网功能部署在卫星上，如图 5 所示，通过在卫星上部署 UPF 等功能，支持卫星用户终端之间端到端直接通信，无须绕道地面核心网，可以实现数据面在星上的端到端通信，从而缩短端到端的传输时延，大幅提升通信效率，降低对星地传输带宽的依赖，提升用户服务体验。

(2) 控制面

通过将部分核心网功能部署在卫星上，实现控制面的抵近，优化通信服务流程，如图 6 所示，比如通过将接入与移动性管理功能（Access and Mobility Management Function, AMF）等功能部署在卫星上，可以直接在星上

开展接入控制与移动性管理，缩短控制面的时延。

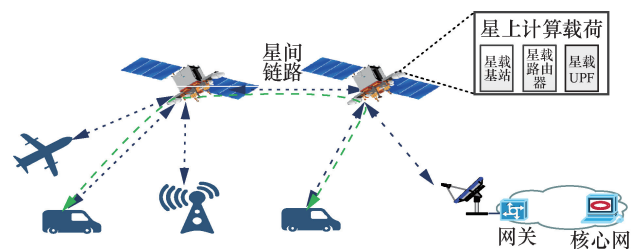


图5 星载UPF场景(支持端到端直接通信,不必经过地面核心网中转)

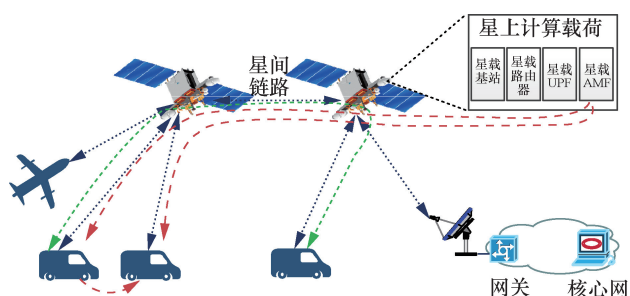


图6 星载AMF场景

(支持星上用户接入认证与移动性管理,缩短用户接入时间)

综上,在通信方向,随着星上计算处理能力的提升,通过将相关通信功能网元部署到卫星上,可以有效实现“以计算换带宽”“以计算换时延”“以计算换灵活架构”等目标,实现一个更加优化的卫星通信网络。

2.2 计算驱动的网络传输增强

在星上部署路由控制软件,可使卫星实现自主控制管理,从而实现更加高效的传输。

(1) 数据面

通过在星上部署分组转发,可以实现更加灵活的交换处理,将传统的波束级交换、子带级交换(信道化交换)进一步细化至分组包级,如图7所示,可以实现更细粒度的交换,适合当前卫星互联网应用场景。

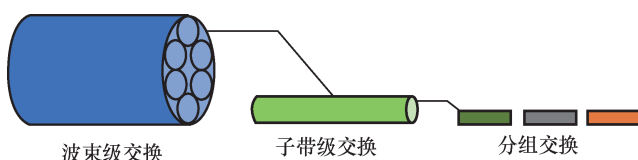


图7 星上分组交换粒度对比

(2) 控制面

通过在星上部署分布式路由协议,如图8所示,可以实现更加快速的路由收敛。尤其是在出现突发异常的场景下,星上可以直接感知,触发相应的路由收敛过程,从而实现快收敛,此时卫星网络可以摆脱对地面控制器的依赖,独立运行。相对而言,传统场景下为了降低对星上计算处理能力的需求,星上通常仅保留转发面,路由发现与

路由计算由地面站计算之后上注到卫星,此时卫星严重依赖地面。当出现一些异常的链路或者节点故障时,卫星不能自主决策,需要等待地面站发现之后再作相应处置。

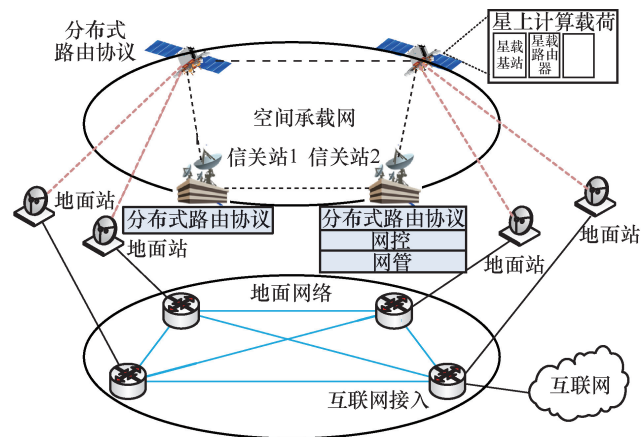


图8 星上路由场景(支持星上路由计算,快速发现异常,加速收敛)

综上,在网络方向,随着星上计算处理能力的提升,通过将相关网络功能网元(分组转发、路由控制)部署到卫星上,可以有效实现“以计算换带宽”“以计算换实时控制”“以计算换高效传输”等目标,实现一个更加优化的卫星网络。

2.3 计算驱动的服务增强

(1) 数据处理

针对遥感信息服务,通过在星上部署在轨数据处理应用,避免遥感卫星大量数据回传落地,如图9所示。通过星上计算极大地减少了星地信息传输量,节省了星地之间的传输带宽,从而实现“以计算换带宽”。与此同时,遥感图像在轨处理后直接分发给用户,可大幅减少业务响应时延,提升服务时效性。

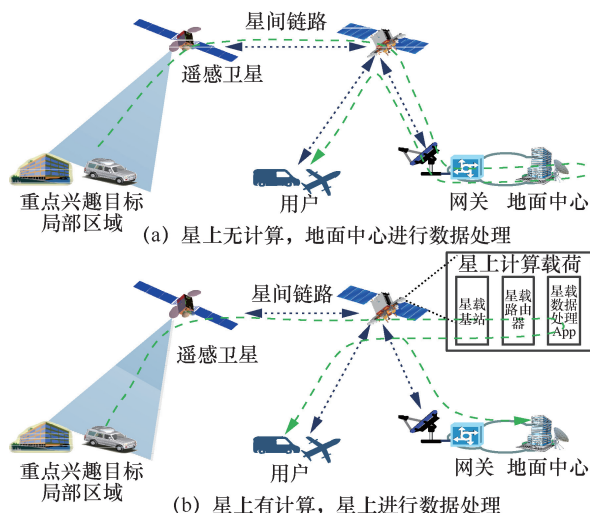
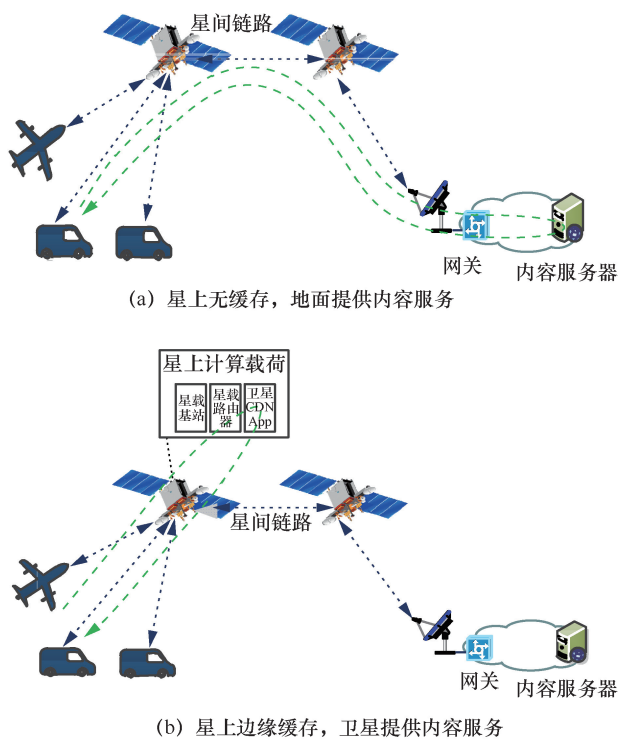


图9 星上数据处理场景

(2) 数据存储

针对在轨数据分发存储类应用,充分发挥卫星广播特性,在特定地点进行数据存储,为用户提供就近可靠的数据存储服务,避免了重复从地面获取数据,节省了星地带宽,实现“以存储换带宽”。在轨数据分发存储类应用主要包括两类:一类是内容分发类应用;另一类是高价值数据可靠存储类应用。如图 10 所示,对于内容分发类应用,根据内容热度在星上进行热点内容的边缘缓存,用户可直接通过星上 CDN 缓存获取服务;对于高价值数据可靠存储类应用,根据用户需求在星上进行分布式编码存储,当用户发起数据请求时,通过星上数据汇聚解码,直接向用户提供服务。利用星上的计算存储资源,在避免从地面重复获取数据的同时,也降低了业务响应时延,提升了用户的业务服务体验。



综上,在服务方面,随着星上计算处理能力的提升,通过将相关服务功能网元(数据处理、数据存储)部署到卫星上,可以有效实现“以计算换时延”“以计算换带宽”“以存储换时延”等目标,实现一个更加优化的卫星服务网络。

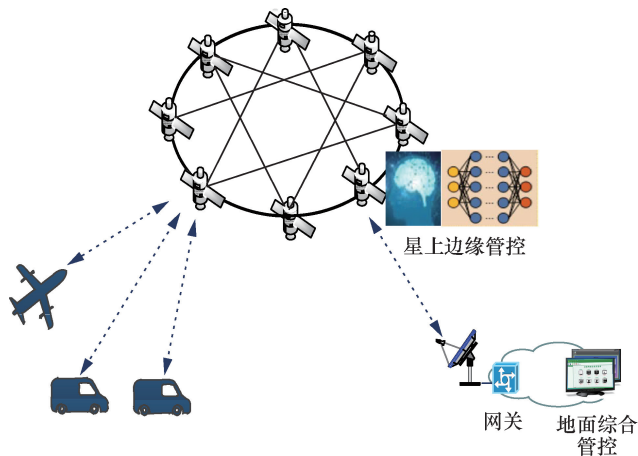
2.4 计算驱动的控制增强

在网络控制增强方面,如图 11 所示,通过部署“地

面综合管控,卫星边缘管控”,将一部分管控功能从地面迁移到天上,星上为用户提供“就近快速管控”,通过星上快控制和地面慢控制的协同,提高管控服务质量。地面综合管控具有最高级别权限,对全网资源及业务服务实施管理和配置;卫星边缘管控对低轨卫星进行管理和配置,并通过协作与周边卫星组成协同星群。通过星地协同管控,实现快慢结合,提升控制实效性。

在业务控制方面,通过在星上部署部分服务编排功能,对于低时延需求的应用,直接在星上完成资源编排,将用户需求映射为星载资源的协同策略,调度相应资源为用户提供快速响应服务,实现卫星的自主运行控制与任务规划。

综上,在控制方面,随着星上计算处理能力的提升,通过将控制面功能部署到卫星上,实现控制面功能的星地分布式部署。对实时性要求高的控制功能在星上执行,实现快控制;对实时性要求没有那么高的控制功能在地面执行,实现慢控制。最终通过星地协同实现系统最优的配置。



2.5 计算驱动的管理增强

在管理方面,基于星上算力资源,可以支持更加智能化的卫星网络管理、资源优化、网络运营等,比如根据卫星所处的地面区域(海洋、沙漠、城市等)、卫星所处时区(晚上、白天)、卫星能耗情况等,卫星能够自动地调整功率分配、资源分配,实现更加高效的资源使用。比如,当卫星处于黑夜区域时,用户较少,卫星可进入低功率运行模式,仅有少数载荷加电运行。如图 12 所示,随着卫星从陆地区域运动到海洋区域,卫星的波束资源由以宽带为主向以物联为主进行自主智能调配。

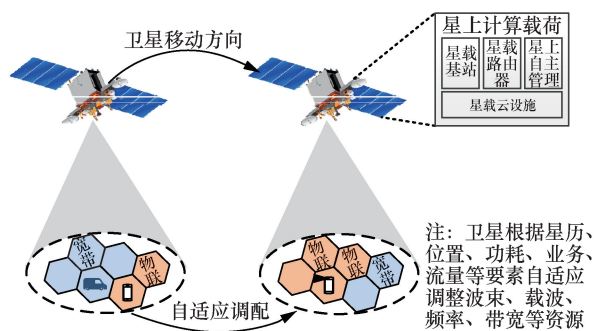


图12 星上智能管理场景（基于位置数据、历史数据等信息进行状态智能优化）

综上，在管理方面，基于星上提供的强大算力支持，通过将相关智能化管理功能部署到卫星上，可以有效实现更加高效的自主运行和管理，提升卫星网络管理的时效性与高效性，同时简化大规模卫星网络的管理，可有效实现“以计算换智能”，实现一个更加智能的卫星网络。

3 结束语

随着航天电子技术的进步，特别是高性能宇航级处理芯片的出现，未来卫星网络将有望摆脱对地面的依赖，成为一个独立的功能域——卫星云；与此同时，卫星网络技术与计算技术彼此渗透，云网融合成为卫星网络发展的新趋势。

参考文献

- [1] 汪春霖, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 491-504.
WANG C T, ZHAI L J, XU X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 491-504.
- [2] RAHIM S, PENG L M. Intelligent space-air-ground collaborative computing networks[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2023, 6(2): 76-80.
- [3] GERACI G, LÓPEZ-PÉREZ D, BENZAGHTA M, et al. Integrating terrestrial and non-terrestrial networks: 3D opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(4): 42-48.
- [4] ITU. Framework and overall goal proposal for 2030 and future development[Z]. 2023.
- [5] 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.

- [6] 虞志刚, 冯旭, 黄照祥, 等. 通信、网络、计算融合的天地一体化信息网络体系架构研究[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 11-29.
YU Z G, FENG X, HUANG Z X, et al. Research on the architecture of space-ground integrated information network: integration of communication, networking and computing[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 11-29.
- [7] 虞志刚, 冯旭, 陆洲, 等. 宇航级处理器发展现状与趋势[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(1): 50-58.
YU Z G, FENG X, LU Z, et al. Development status and trends of space processor[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(1): 50-58.
- [8] 虞志刚, 冯旭, 戴天, 等. 空间边缘计算: 需求、架构及关键技术[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(12): 4416-4425.
YU Z G, FENG X, DAI T, et al. Space edge computing: requirement, architecture and key technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(12): 4416-4425.
- [9] KIM T, KWAK J, CHOI J P. Satellite edge computing architecture and network slice scheduling for IoT support[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(16): 14938-14951.
- [10] WEI J Y, HAN J R, CAO S Z. Satellite IoT edge intelligent computing: a research on architecture[J]. Electronics, 2019, 8(11): 1247.
- [11] LI C C, ZHANG Y S, XIE R C, et al. Integrating edge computing into low earth orbit satellite networks: architecture and prototype[J]. IEEE Access, 2021, 9: 39126-39137.
- [12] XIE R C, TANG Q Q, WANG Q N, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [13] WANG S G, LI Q. Satellite computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023 (99): 1.
- [14] ZHANG Z J, ZHANG W Y, TSENG F H. Satellite mobile edge computing: improving QoS of high-speed satellite-terrestrial networks using edge computing techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(1): 70-76.
- [15] LU H, DUAN X F, CHEN Y Z. Integration of low earth orbit satellites with terrestrial cloud-edge systems[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 167-168.
- [16] JIA M, ZHANG L, WU J, et al. Joint computing and communication resource allocation for edge computing towards huge LEO networks[J]. China Communications, 2022, 19(8): 73-84.
- [17] 虞志刚, 冯旭, 陆洲, 等. 空间路由交换体制现状与发展设想[J].

- 移动通信, 2021, 45(5): 62-74.
- YU Z G, FENG X, LU Z, et al. Research on the status and development trends of space routing/switching technology[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 62-74.
- [18] 中国电信. 中国电信云网融合 2030 技术白皮书[R]. 2020.
- China Telecom. China Telecom cloud-network convergence 2030 technologies white paper[R]. 2020.
- [19] IMT 2030(6G)工作推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
- IMT 2030(6G) Working Group. 6G network architecture vision& key technologies vision white paper[R]. 2021.
- [20] 丁文慧, 高吉星, 虞志刚, 等. 空间算力网络初探[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 41-46.
- DING W H, GAO J X, YU Z G, et al. Preliminary exploration on space computing networks[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 41-46.
- [21] FURANO G, DI MASCIO S, MENICUCCI A, et al. A European roadmap to leverage RISC-V in space applications[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-7.
- [22] 牛娇红, 方琰崑, 章璐. 5G 空天地融合核心网方案及关键技术[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 12-19.
- NIU J H, FANG Y W, ZHANG L. 5G space-air-ground converged core network solution and key technologies[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 12-19.
- [23] 张丹, 李晶晶, 刘田, 等. 巨型星座云网融合发展探析[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(2): 71-81.
- ZHANG D, LI J J, LIU T, et al. Survey on giant constellation cloud network integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(2): 71-81.
- [24] 吴成, 秦大国, 李阳, 等. 遥感卫星边缘计算架构设计与关键技术分析[J]. 信息工程大学学报, 2023, 24(3): 336-342.
- WU X, QIN D G, LI Y, et al. Remote sensing satellite edge computing architecture design and key technologies analysis[J]. Journal of Information Engineering University, 2023, 24(3): 336-342.
- [25] 方海, 赵扬, 王显煜, 等. 6G 时代卫星算力网络发展思考[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2): 8-14.
- FANG H, ZHAO Y, WANG X Y, et al. Thoughts on the development of satellite computing power network in 6G era[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2): 8-14.
- [26] 王密, 仵倩玉, 肖晶, 等. 低轨巨型星座遥感信息“云-边-端”智能服务关键技术研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1256-1263.
- WANG M, WU Q Y, XIAO J, et al. Key technologies on "cloud-edge-end" collaborative intelligent service of low-orbit giant constellation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1256-1263.

[作者简介]



虞志刚 (1989-), 男, 博士, 中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



丁文慧 (1987-), 女, 博士, 中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



陆洲 (1970-), 男, 硕士, 中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员, 主要研究方向为卫星通信网络。

冯旭 (1987-), 博士, 中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

高吉星 (1988-), 博士, 中国电子科技集团公司电子科学研究院高级工程师, 主要研究方向为空间智能计算。