

算存融合的天基承载网架构

丁春旭, 丁熙浩, 丁文慧, 徐志平, 虞志刚, 陆 洲

(中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 面向“网络无所不达、计算无处不在”的新一代泛在通信和服务一体化网络, 多样化的业务应用存在对计算、存储与网络资源等多种维度资源的需求。与此同时, 在卫星网络高动态、弱连接场景下, 如何高效调度统筹天、地多元异构的算存资源, 协同优化组网、传输、存储机制, 建立天基计算、存储、网络联合的资源优化模型, 提供高质量的天基承载网服务是一个亟须解决的重要问题。针对该问题, 在研究天基算存融合技术的发展现状的基础上, 研究和分析其对天基承载网架构的影响, 并在此基础上提出一种算存融合的天基承载网架构, 从组网优化、传输优化、存储优化、服务优化等4个方面系统分析算存融合的天基承载网架构相较于传统天基承载网架构的优势, 总结相关关键技术, 以期为后续卫星网络的研究、建设和标准化提供有价值的建议和参考。

关键词: 算存融合; 天基承载网; 网络架构; 天基计算

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024027

Integrated Computing and Storage for Space Transport Network Architecture

DING Chunxu, DING Xihao, DING Wenhui, XU Zhiping, YU Zhigang, LU Zhou

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: Facing the new generation of ubiquitous communication and integrated service network characterized by "networks everywhere and computing omnipresent", diverse business applications have multi-dimensional resource requirements for computation, storage, and networking. At the same time, in the high-dynamic, weakly-connected scenarios of satellite networks, how to efficiently schedule and coordinate the multi-heterogeneous storage and computing resources of both space and ground, collaboratively optimize the networking, transmission, and storage mechanisms, establish a space-based computing, storage, and network joint resource optimization model, and provide high-quality space-based carrying network services is an important issue that urgently needs to be resolved. In response to this issue, based on the research and analysis of the development status of space-based computing and storage integration technology and its impact on the space-based carrying network architecture, a space-based carrying network architecture with computing and storage integration was proposed. From the perspectives of networking optimization, transmission optimization, storage optimization, and service optimization, the advantages of the computing and storage integrated space-based carrying network architecture compared to the traditional space-based carrying network architecture were systematically analyzed. The key technologies were summarized and refined, with the aim of providing valuable suggestions and references for subsequent research, construction, and standardization of satellite networks.

Keywords: integrated computing and storage, space transport network, network architecture, space computing

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-08-01

通信作者: 虞志刚, yzg11@tsinghua.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB2902700); 国家自然科学基金资助项目 (No. 62201534, No. 61931017)

Foundation Items: National Key Research&Development Program of China(No. 2022YFB2902700), The National Natural Science Foundation of China (No. 62201534, No. 61931017)

0 引言

随着人类活动疆域从陆地向深海、深空不断扩展，为保障远洋航行、应急救援等领域的网络通信需求，世界各国纷纷布局以低轨星座为代表的卫星互联网，构建全球无缝覆盖、服务无处不在的服务能力^[1]。卫星通信网络具有广域覆盖、灵活组网、不受地面环境限制等优势，已经成为下一代移动通信网络（6G）的重要组成部分^[2]。

纵观国内外典型卫星互联网星座，具体见表 1，可发现卫星通信网络有如下发展趋势。

（1）天基组网。卫星之间通过激光/微波星间链路组网构成一张天基网络，已经成为国内外星座建设的发展方向，如我国的天地一体化信息网络^[1,3]、鸿雁星座以及智慧天网^[4]；美国的 Iridium NEXT^[5]、Starlink^[6]、DARPA Blackjack^[7]以及太空发展局（SDA）T1TL 星座^[8]。

（2）星上计算。为了提高卫星网络的韧性，支持自主智能运行^[9-10]，星上具有较强的计算处理能力已经成为卫星网络发展的新趋势，如美国的 Blackjack 以及 T1TL 星座，以及我国的天算星座^[11]、中国移动 01 星^[12]均支持星上计算优化网络服务流程，以提供更高质量的通信服务。

随着天基组网成为卫星通信网络发展的主流，作为卫星通信网络的重要组成的天基承载网应运而生。天基承载网是天基接入网和核心网等功能网元互联互通的“基座”^[3]，主要由天基路由器、地基路由器、网络控制器等通过星间、星地链路互联而成，负责传递信息和指令，如图 1 所示。相较于地面承载网，天基承载网具有拓扑动态时变、链路频繁切换等特征，无法直接继承地面成熟的网络技术。现有天基承载网研究主要侧重于解决拓扑时变场景下如何稳定组网路由、可用性问题^[3]。

与此同时，随着航天电子技术的迅猛发展，特别是

表 1 国内外典型卫星互联网星座

名称	时间	国家	轨道类型	组网模式	备注
Iridium NEXT	2007 年	美国	低轨	天基组网	
天地一体化信息网络	2013 年	中国	高低轨	天基组网	
Starlink	2015 年	美国	低轨	天基组网	
鸿雁星座	2018 年	中国	低轨	天基组网	
智慧天网	2019 年	中国	中轨	天基组网	
DARPA Blackjack	2019 年	美国	低轨	天基组网	星上计算
SDA T1TL	2020 年	美国	低轨	天基组网	星上计算
天算星座	2021 年	中国	低轨	天基组网	星上计算
中国移动 01 星	2024 年	中国	低轨	不详	星上计算

商用货架器件的广泛应用，星上计算能力获得跃升，卫星逐渐从“网络转发”向“计算服务”能力拓展，天基云计算、数据实时在轨处理等新型服务对天基承载网的高效可信等服务质量提出了新要求。

1 天基承载网发展现状

1.1 天基承载网基本概念

与地面移动通信系统相对应，天基接入网、天基核心网以及天基承载网是卫星通信网络三大组成部分。

（1）天基接入网。可以比喻为人的“四肢”，负责广域分布的无线覆盖、无线接入，主要由部署在卫星侧的星载基站等设备组成，重点负责卫星终端用户提供空中接口，与核心网通过天地承载网相连，共同完成无线资源分配、调度、管理接入策略等功能。相较于传统地面接入网，天基接入网需要考虑星载重量、功耗、体积受限和散热等因素以及空间复杂电磁环境的影响^[2]。

（2）天基核心网。可以比喻为人的“大脑”，是整个网络的管理中枢，主要负责用户鉴权、移动性管理、业务传输、位置服务以及策略计费等功能，是通信系统的控制大脑，通过天基承载网与天基接入网进行互联，共

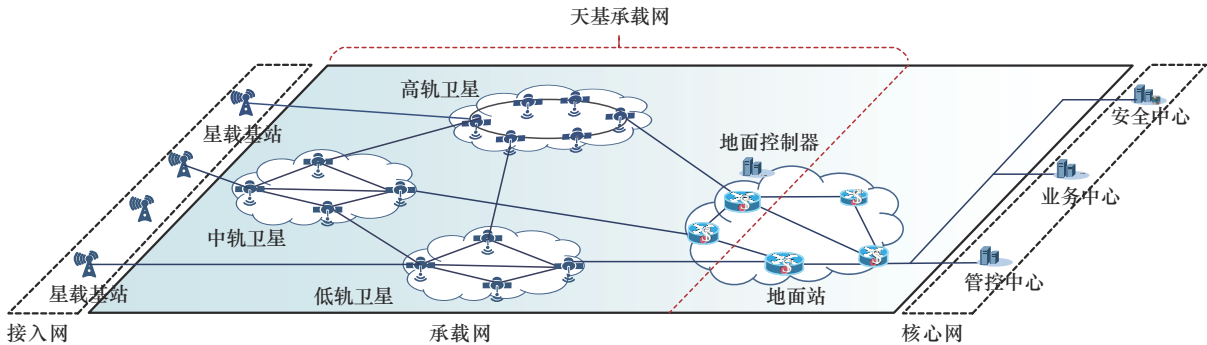


图 1 天基承载网架构示意

同完成对用户相关的管理功能。天基核心网可以部署在地面段,通过轻量化裁剪之后也可以部署在卫星节点之上。天基核心网部署在卫星节点,重点需要考虑天基有限的重量、功耗、体积等物理限制条件,进行按需裁剪,并考虑天地分布式部署^[2]。

(3) 天基承载网。可以比喻为人四通八达的“脉络”,负责连接“四肢”和“大脑”,主要由天基路由器、地基路由器、网络控制器等通过星间、星地链路互联而成^[3],是天基接入网和核心网等功能网元互联互通的“基座”(有时需要与地面承载网联合,构建“天基接入网—天基承载网—地面承载网—核心网”的完整通路),主要负责传递信息和指令,是本文讨论的重点。相较于地面承载网,天基承载网具有拓扑动态时变、链路频繁切换等特征,无法直接继承地面成熟的网络技术;现有天基承载网研究主要侧重于解决拓扑时变场景下如何稳定组网路由、可用性等问题,主要可以分为两类:拓扑结构以及路由算法研究。

1.2 拓扑结构研究现状

拓扑结构作为卫星互联网的关键特征之一,直接决定了卫星互联网网络容量的理论上限,学术界进行了大量的探索研究。为实现全球覆盖、泛在通联,仅需3颗静止轨道卫星即可实现纬度 75° 以下区域全覆盖,通过十几颗中轨卫星也能实现全球覆盖,而低轨卫星则需要几十颗乃至成百上千颗实现,因此卫星网络的拓扑设计成了研究的热点问题。天基承载网架构如图2所示。

(1) 单层星座拓扑研究

铱星系统是单层卫星星座的典型,其通过部署66颗780 km高度的近极轨星座实现全球无缝覆盖。除此之外,

Globalstar (1999年, 1 400 km, 48颗星)、OneWeb (2012年, 720 km, 600颗星)等星座均采用了单层星座的设计。参考文献[13]围绕星座拓扑,从网络覆盖率、系统吞吐量、业务往返时延等方面对比分析了不同卫星星座部署、信关站部署方案。参考文献[14-16]将低轨卫星星座网络拓扑抽象成为一个时变的Mesh网络。

(2) 多层星座拓扑研究

星链系统(Starlink)是美国太空探索公司提出的多层低轨卫星拓扑的典型示例,根据最新报道,星链二代系统由轨道高度位于340~614 km的共9个子星座(共计288个轨道面)组成,构成一个复杂的拓扑。针对Starlink星座,参考文献[17-18]从理论上分析了任意两颗卫星之间的最短星间通信链路距离与最小通信时延。除此之外,参考文献[19-20]提出了高、中、低轨等多层卫星混合组网的网络拓扑,不仅同轨道卫星之间彼此建立星间链路,不同轨道之间也仍然建立星间链路,构成一个三维立体的卫星网络拓扑。

整体而言,卫星通信网络星座拓扑的设计是根据覆盖、带宽、时延等应用需求以及建设成本、建设周期等实际约束条件综合评估之后的折衷结果。

1.3 路由算法研究现状

路由是解决天基承载网互联互通的关键,也是当前学术界和工业界研究的热点内容。按照路由控制方式通常可以分为集中式路由、分布式路由、集中式与分布式相结合的路由。

(1) 集中式路由研究

集中式路由基于软件定义网络(Software Defined Network, SDN)理念,具体是指天基承载网中的天基路

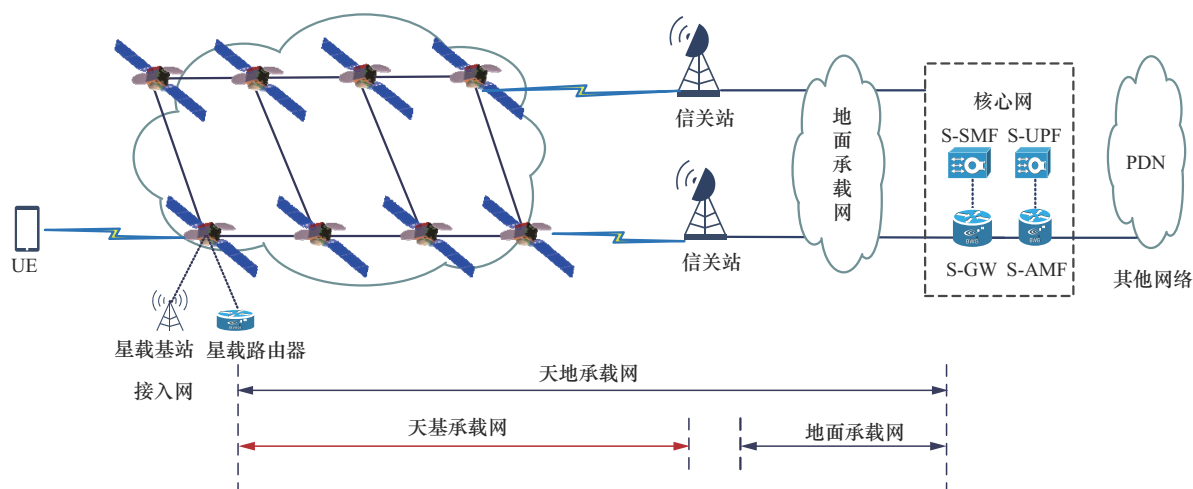


图2 天基承载网架构

由器统一接收地面网络控制器上注的流表/转发表,并据此进行转发,此种情况下,相关的路由计算均在地面控制器完成,天基路由器不需具备路由计算功能。优点是简化了星上处理;缺点是所有的路由计算均依赖于地面中心,如果出现异常故障情况,反应不够及时。

参考文献[14]介绍了一种基于拓扑快照的静态路由方法,网络控制器根据星座拓扑变化规律,将一个周期内的星座拓扑划分为一系列快照序列,在任何一个快照内,可以认为拓扑保持不变,从而计算相应的转发表;当星座要从一个快照切换到下一个快照时,需要快速切换成为下一代快照对应的转发表。除此之外,为了进一步提升路由算法的负载均衡、运行效率、故障容错以及差异化服务保障能力,参考文献[21-26]等引入网络状态感知机制以及深度强化学习等人工智能方法,进一步优化路由策略。

(2) 分布式路由研究

与集中式路由相反,在分布式路由方案中,天基承载网中每一个天基路由器都必须动态地自主维护网络全局拓扑结构,天基路由器会通过探测机制检测和维护与邻居节点之间的关系,然后在此基础上更新和计算路由,从而保证每一个天基路由器可及时掌握网络拓扑结构。优点是每一个天基路由器都会通过探测机制维护与邻居节点的互联信息,可以快速感知故障和异常情况;缺点是分布式路由要求网络节点维护全网拓扑连接关系,并在此基础上进行路由计算和更新,对天基路由器的计算能力提出了要求。另外,在网络拓扑规模较大或者拓扑变化较为频繁的场景下,路由收敛将会成为一个大问题。

参考文献[27-28]基于传统域内路由协议 OSPF 设计了一种面向卫星网络的域内路由协议 OSPF+, 该协议利用卫星运动轨迹可以预先计算的规律,实现低开销、高稳定性的自适应动态路由。

(3) 集中式与分布式相结合的路由研究

集中式与分布式相结合的路由方案是结合了集中式和分布式优点的路由方案:一方面,地面网络控制器根据卫星的运行规律提前计算星间、星地链路的切换关系,形成一张路由表,上注到天基路由器,在正常星间、星地链路切换场景下根据此路由表进行路由转发;另一方面,天基承载网卫星节点运行一套分布式探测机制,对网络拓扑进行实时感知和探测,在星间、星地链路出现异常故障时,立即根据感知到的链路状态信息,对上述路由表进行修正,从而实现在异常故障场景下的快速

响应。

参考文献[29-30]提出了一套动静相结合的路由方案,通过充分集合集中式与分布式路由的各自优势,设计了一套折衷的解决方案。

1.4 小结

天基承载网是地面承载网向三维空间的拓展,天基路由器部署于卫星节点,卫星之间通过星间链路构成卫星网络,通过星地链路实现与地面信关站的互联,最终与地面互联网基础设施一起构建天地一体的承载网。综上分析,围绕天基承载网,国内外学术界与工业界开展了大量的学术研究与技术攻关,但更加关注“互联”方面的问题,即如何在卫星高速移动导致卫星网络拓扑动态时变以及星载处理、功耗等资源受限的条件下,研究和设计卫星拓扑和路由问题,重点解决网络可用性问题。

2 天基计算发展现状

2.1 基本概念

近年来,美国国防部高级研究计划局(DARPA)、国防部太空发展局(SDA)先后启动“Blackjack”和“NDSA”等计划,部署 Pit Boss 和 BMC3 等星载智能计算载荷研制任务,计划将部分地面完成的战斗管理、指挥控制和通信功能迁移到太空,以支持战役规模的时延敏感杀伤链闭合,进而大幅提升美国对新兴威胁的响应能力,打造天基信息时延敏感自主服务的算力“基座”。天基计算是地面计算技术应用于卫星等航天器以满足特定应用需求而产生的新技术^[31-38]。

2.2 系统建设现状

当前国内外均开展了天基计算系统的研制和建设,国外比较典型的有 Pit Boss、BMC3、空间超级计算机(Spacebourne Super Computer)等载荷,国内比较典型的有天算、地卫弦智能计算载荷等。

(1) 国外现状

Pit Boss 载荷。在 2018 年 DARPA 发起“Blackjack”项目,意在开发一个具有扩展性、伸缩性和适应性的体系网络架构,卫星节点能够在任务规划、数据共享和多域数据融合方面,与其他节点自主合作,在观测组内能够连续、无缝地与其他逻辑节点共享数据信息(主要由 Pit Boss 控制单元承载)^[7],实现持续行动。Pit Boss 载荷示意如图 3 所示。

BMC3 载荷。将提供硬件和软件框架,基于人工智能增强的指挥控制和通信网络^[8],提供自我任务优先级、

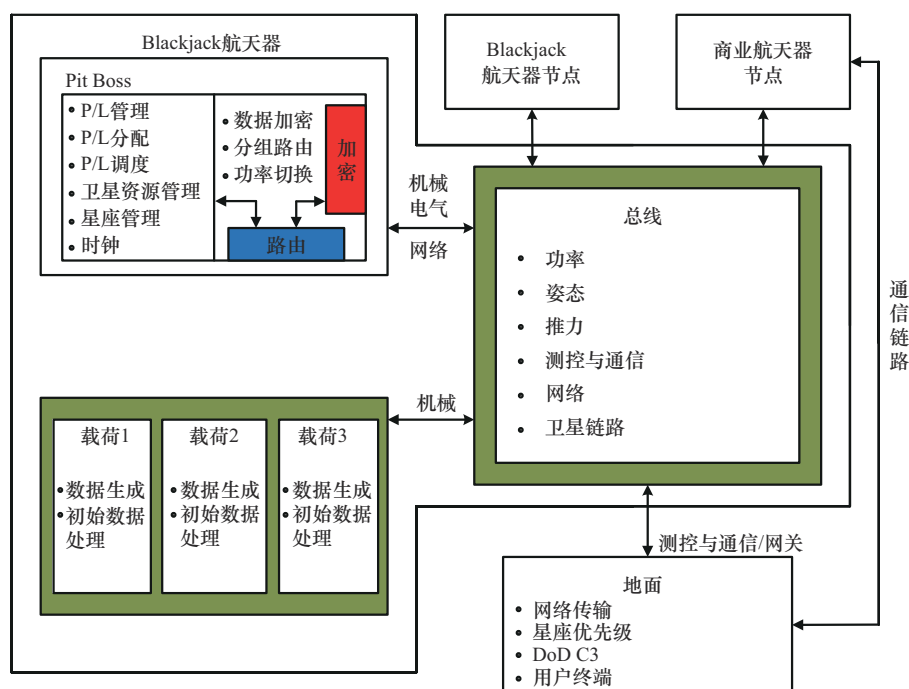


图3 Pit Boss载荷示意

机载处理和传输, 处理后的数据将及时分发给作战人员和其他系统。BMC3 载荷示意如图4所示。

HP 空间超级计算机。2017年8月, 惠普公司自主设计研发的空间超级计算机搭载 SpaceX 公司的猎鹰9号火箭被送往国际空间站。Spacebourne 运行常规的 Linux 系统, 采用软件加固消除空间恶劣环境的影响而非传统的

硬件加固^[39-40]。经过两年的在轨运行之后, 该计算机已经被带回地球开展严格的检查以分析其在太空轨道上的受损情况, 无疑将有助于打造未来的空间超级计算机, 为深空探测任务提供技术支撑。Spacebourne 空间超级计算机如图5所示。

(2) 国内现状

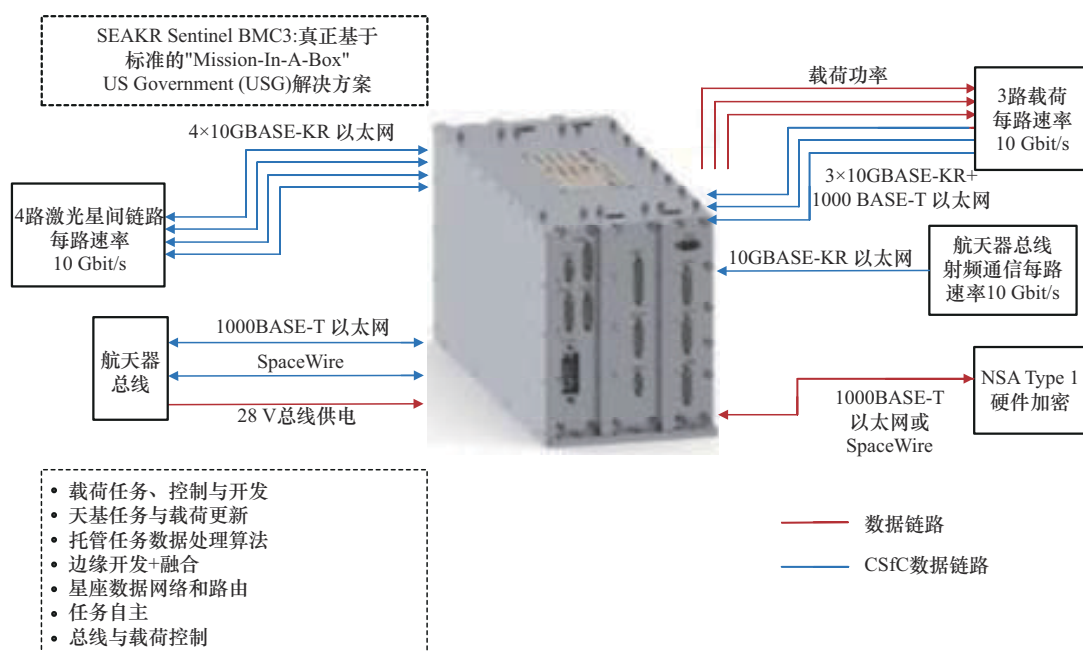


图4 BMC3载荷示意



图5 空间超级计算机

天算星座。“天算星座”是由北京邮电大学深圳研究院和长沙天仪空间科技研究院有限公司共同建设的一个项目^[11]。这个项目旨在通过构建一个产学研用一体化的空天计算在轨试验开放开源平台，推动新型网络计算、融合服务计算、分布式智能计算等技术的发展。

地卫智能计算载荷。2023年8月10日12时3分，谷神星一号遥七运载火箭在酒泉卫星发射中心成功发射升空^[41]，将搭载的地卫智能应急一号等7颗卫星顺利送入预定轨道。地卫智能应急一号是一颗以人工智能载荷为核心，具备智能操作系统的卫星。

2.3 小结

随着航天电子技术的迅猛发展，特别是商用货架器件的广泛应用，天基计算能力获得跃升，卫星逐渐从“网络转发”向“计算服务”能力拓展，天基云计算、数据实时在轨处理等新型服务对天基承载网的高效可信等服务质量提出了新要求，迫切需要以此为契机，进行架构优化与创新。

3 算存融合的天基承载网架构

3.1 需求分析

算存融合的天基承载网架构面向“网络无所不达、计算无处不在”的新一代泛在通信和服务一体化网络进行设计，紧紧围绕各类应用的需求，并在此基础上进行优化设计。

(1) 差异化服务需求。天基承载网在承载宽带、移动、物联等多样化传统业务应用的同时，还要承载在轨遥感图像处理、天基分布式存储等天基云计算新型应用，部分应用对传输带宽有要求，部分应用对时延有要求，因此未来的天基承载网需要能够提供差异化服务保障。

(2) 高可靠存储需求。天基承载网处于电磁开放空

间，容易引起存储失效等，与此同时，未来面向卫星网络的关键数据（如路由转发表、重要用户的认证信息、关键网络参数）等需要在轨存储，需要设计可靠的存储机制。

(3) 在轨实时处理需求。为满足遥感图像处理、数据实时在轨处理等天基时延敏感应用需求，天基承载网需要向算存融合的天基承载网转变，在提供低时延网络传输的同时，还要求能够在轨实时处理，以满足快速服务响应的需求。

(4) 高可靠传输需求。星地、星间链路的误码率高，链路传输时延大、抖动高，传统的地面传输协议难以直接应用，面向各类应用的高可靠传输需求，需要发挥卫星网络的多路径广播特性。

当然，进行天基承载网架构设计还必须结合实际，即要充分考虑到卫星网络的约束条件和固有特征进行针对性优化。

3.2 物理架构

从物理空间的逻辑视角出发，天基承载网架构按照“节点+连接”的思路，可以划分为节点、连接两个部分，如图6所示。

节点主要由布设在高、中、低轨的卫星节点上的天基路由器，以及布设在地面的路由器、网络控制器等组成。

连接是各类节点之间互联的链路，星间、星地链路主要包括激光或微波等链路；与之对应的，地面节点之间可以采用光纤或电缆进行互联。

与传统的天基承载网不同，算存融合的天基承载网架构还包括部署在卫星节点上的星载高性能处理平台以及部署在地面节点的地面高性能处理平台，高性能处理平台作为天基计算载荷，将为天基承载网的优化提供重要的契机。

3.3 功能架构

功能架构方面，算存融合的天基承载网在现有天基承载网功能架构解决“可用”问题的基础上，重点开展组网、传输、存储、服务等4个方面的优化设计，如图7所示。

(1) 组网优化

针对卫星网络计算、存储、网络资源等的互不感知、网云边端无法互相协同的问题，同时考虑星地、星间的频繁相对运动特征，迫切需要开展计算、存储、网络融合的天基承载网切片技术研究，实现多维动态资源的一体化调度，保证在网络动态、资源动态、需求动态下切片连续迁移，满足各类业务差异化的服务保障需求。

(2) 传输优化

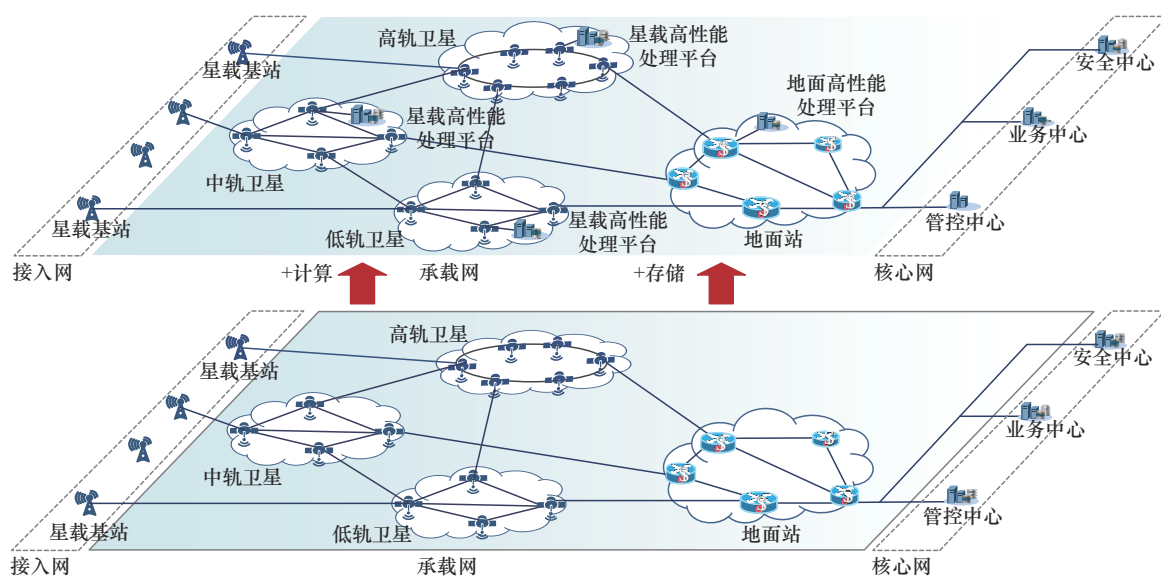


图6 物理架构(新增星载高性能处理平台)

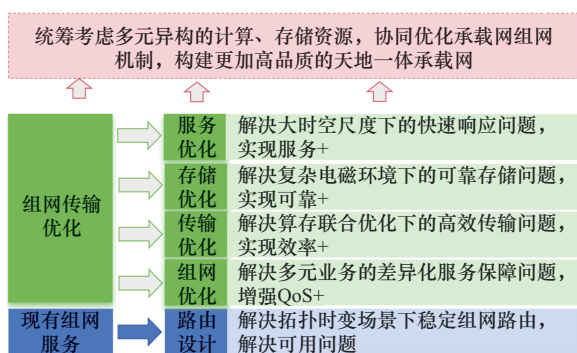


图7 算存融合的天基承载网络架构示意

针对天基信道高动态和高时变特性,研究基于网络编码的可靠传输,卫星节点对接收到的信息进行编码传输,有效提升网络传输容量,实现“算存换传输容量”;针对星基拓扑复杂的问题,采用多路径传输机制,源节点通过多条路径向目的节点传输同一份信息,目的节点对信息进行去重,有效提升传输可靠性,实现“算存换传输可靠提升”。

(3) 存储优化

针对天基复杂电磁环境(如单粒子效应等)易引起存储数据失效问题,天基数据需在不同的卫星进行冗余存储,迫切需要开展高可靠网络化容错存储机制研究,解决单个存储单元乃至单星存储数据失效的问题。采用分布式存储机制,通过将存储在卫星上的高价值数据进行星内存储单元间、多星之间相结合的分布式编码存储,避免存储单元乃至单星存储数据失效的问题,有效提升天基存储效率,实现“算存换存储可靠提升”。

(4) 服务优化

采用星上计算机制,在星上对原始数据进行边缘计算和处理,有效降低数据回传带来的星间、星地传输链路的带宽需求,节约星间、星地传输带宽,有效提升服务时效性,实现“计算换传输带宽”。

算存融合的天基承载网架构与传统天基承载网架构对比示意如图8所示,上述4种优化机制可以联合运用,或单独使用。在传统的天基承载网传输架构解决基本互联互通的基础上,构建了一个更加高效、可靠的天基承载网组网传输架构,可为天基云计算、天基数据中心、数据在轨处理等新型应用提供一个更高质量的“互联基座”。

4 关键技术

(1) 动态时变天基网络切片技术

低轨卫星通信网络以其庞大的星座规模和微小的传输时延著称,但同时也面临着高度动态和时变的特性。在这样的网络拓扑变化场景中,如何确保“网络虽时变,服务却稳定”的业务承载能力,是未来天基承载网必须面对的关键问题^[42-43]。动态时变天基网络切片技术致力于解决在高速变化的网络环境中,如何有效整合计算、存储和网络等多维资源的问题,以构建稳定而可靠的网络切片。

(2) 天基高效高可靠传输技术

空间传输环境具有高误码率、大时延和大抖动等复杂特性,这使得数据传输的可靠性和效率容易受到影

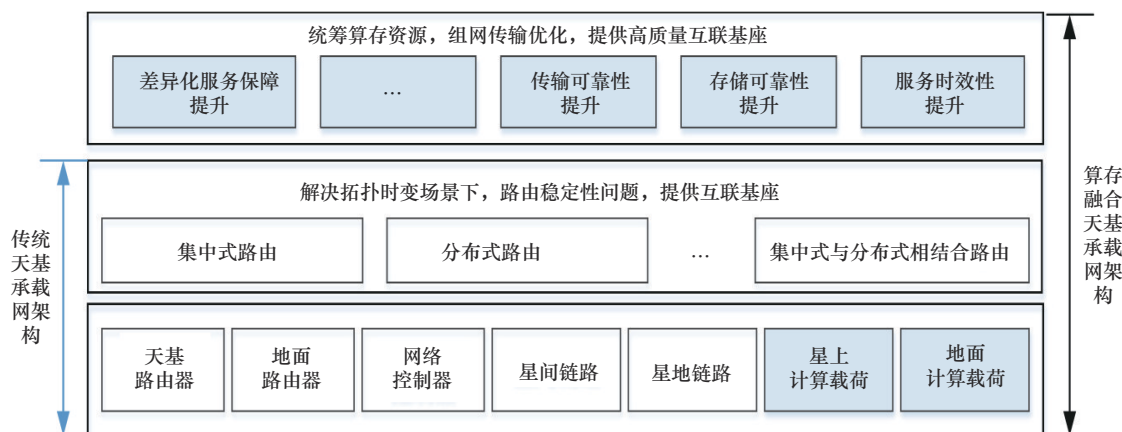


图8 算存融合的天基承载网架构与传统天基承载网架构对比示意

响。鉴于天基网络资源有限且带宽稀缺，开发一种高效且高可靠的传输机制尤为迫切^[44]。一方面，基于网络编码理论，构建高效的传输机制；另一方面，利用天基网络的多路径优势，构建协同传输的机制和模型，对关键信源数据业务进行重点保护，减少由信道差错和链路中断导致的分组丢失，从而提升数据传输的效率和质量。

(3) 天基分布式存储技术

随着卫星处理器的计算性能提升和存储架构的改进，卫星节点逐渐具备了处理、存储和传输信息的能力。这为将网络控制、认证等关键核心参数直接存储在卫星上提供了可能，并进一步提升服务响应速度和系统的鲁棒性，使得构建空间大数据中心成为未来的发展趋势^[45]。此外，面对复杂的空间电磁环境，必须考虑天基分布式存储技术，以提升数据的安全性和可靠性，构建一个高效的空分分布式存储系统。

(4) 天基智能云计算技术

在应急救援、海洋监测和地区安全等关键领域，迫切需要高效整合多卫星资源，实现对海量图像和文本信息的实时在轨处理，以快速响应服务需求。天基云计算技术通过构建先进的天基计算环境，整合并优化星上计算资源，显著提升数据的智能化处理能力。这不仅增强了天基应用服务的性能，还实现了低功耗、全流程的智能化服务，从而显著提升服务的整体质量和效率。

5 结束语

在航天电子技术迅猛发展的背景下，商用货架器件的广泛应用极大地提升了星上计算和存储能力。通信卫星正逐步从单一的“通信转发节点”向具备“计算服务节点”能力的多面手转变，网络、计算和存储的融合发

展已成为网络发展的主导趋势。针对未来天基云计算和在轨实时数据处理等多样化新型卫星网络应用对天基承载网提出的更高需求，本文提出了一种创新的算存融合天基承载网架构，并从组网、传输、存储、服务4个关键维度，系统分析了该架构相较于传统架构的显著优势，并进行了深入的优化设计。同时，提炼了当前亟待解决的关键技术问题，旨在为未来的卫星网络研究、建设以及标准化工作提供有价值的建议和参考。

参考文献：

- [1] 汪春霆, 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] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2024, 54 (5): 1177-1214.
CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication (in Chinese) [J]. Scientia Sinica(Informationis), 2024, 54 (5): 1177-1214.
- [3] 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[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 11-29.
- [4] 我国首颗中轨宽带通信卫星智慧天网一号01星成功发射[EB]. 2024.
China's first medium-orbit broadband communication satellite, Smart Skynet-1 01, was successfully launched[EB]. 2024.
- [5] Iridium NEXT[EB]. 2024.

- [6] Starlink[EB]. 2024.
- [7] Scientific systems receives DARPA blackjack pit boss prime Contract[EB]. 2024.
- [8] Space development agency rolling out solicitations[EB]. 2024.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 天算星座[EB]. 2024.
Celestial constellation[EB]. 2024.
- [12] 发射成功!“中国移动01星”“‘星核’验证星”顺利入轨! [EB]. 2024.
Launch successful! "China Mobile 01 Satellite" and "Star Nucleus" Verification Star successfully entered the orbit![EB]. 2024.
- [13] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 87-93.
LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 87-93.
- [14] 卢勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1085-1100.
LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Routing techniques on satellite networks[J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1085-1100.
- [15] 李红艳, 张焱, 张靖乾, 等. 基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 116-129.
LI H Y, ZHANG T, ZHANG J Q, et al. Time deterministic routing algorithm and protocol based on time-varying graph over the space-ground integrated network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 116-129.
- [16] 孟贤, 秦大力, 汪宇, 等. 卫星星座网络容量密度评估[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 67-78.
MENG X, QIN D L, WANG Y, et al. Capacity density assessment of satellite constellation network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 67-78.
- [17] 李元龙, 李志强. Starlink 星座通信建模仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(4): 118-126.
LI Y L, LI Z Q. Modeling and simulation analysis of Starlink constellation communication[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(4): 118-126.
- [18] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 星座覆盖与时延分析[J]. 卫星与网络, 2020(7): 50-52.
LIU S J, XU F J, LIU L X, et al. Starlink constellation coverage and delay analysis[J]. Satellite & Network, 2020(7): 50-52.
- [19] 高瓔园, 王妮炜, 陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.
GAO Y Y, WANG N W, LU Z. The development research and construction suggestion of satellite Internet constellations[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(8): 875-881.
- [20] 徐晓帆, 李毅, 肖飞, 等. 基于高中低轨混合星座构型的星间网络拓扑结构[P]. 2022.
XU X F, L Y, X F, et al. Inter-satellite network topology structure based on a mixed constellation configuration of high, medium, and low orbits[P]. 2022.
- [21] 黄韬, 刘江. 基于软件定义的空天地一体化网络技术导读[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(3): 385-386.
HUANG T, LIU J. Introduction to space-space integration network technology based on software definition[J]. Radio Communication Technology, 2022, 48(3): 385-386.
- [22] 赵晶蕊, 刘江, 张然, 等. 基于蚁群算法的 LEO 卫星网络 QoS 优化路由[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 590-595.
ZHAO J R, LIU J, ZHANG R, et al. Optimization of QoS routing on LEO satellite network based on ant colony algorithm[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 590-595.
- [23] 朱立东, 张勇, 贾高一. 卫星互联网路由技术现状及展望[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 33-42.
ZHU L D, ZHANG Y, JIA G Y. Current status and future prospects of routing technologies for satellite Internet[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 33-42.
- [24] 罗树欣, 张超, 肖勇, 等. 面向巨型星座的智能负载均衡算法[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4 (4): 49-60.
LUO S X, ZHANG C, XIAO Y, et al. Intelligent load balancing algorithm of mega constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4 (4): 49-60.
- [25] 汪昊, 冉泳屹, 赵雷, 等. 基于深度图强化学习的低轨卫星网络动态路由算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35 (4): 596-605.
WANG H, RAN Y Y, ZHAO L, et al. Dynamic routing algorithm for LEO satellite networks based on deep graph reinforcement learning[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2023, 35(4): 596-605.
- [26] 王昀哲. 面向卫星互联网的自主路由算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
WANG Y Z. Research on autonomous routing algorithm for satellite Internet[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.

- [27]徐明伟, 夏安青, 杨芄, 等. 天地一体化网络域内路由协议 OSPF+[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(1): 12-17.
XU M W, XIA A Q, YANG W, et al. Intra-domain routing protocol OSPF+ for integrated terrestrial and space networks[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2017, 57(1): 12-17.
- [28]俞成康. 面向 LEO 网络的 OSPF 路由协议增强技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
YU C K. Research on enhancement technology of OSPF routing protocol for LEO network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024.
- [29]虞志刚, 丁熙浩, 戴天, 等. 基于集中式分布式相结合的天基组网路由方法及设备[P]. 2023.
YU Z G, DING X H, DAI T, et al. Satellite-based networking routing method and device combining centralized and distributed approaches[P]. 2023.
- [30]邢川, 陈二虎, 韩笑冬. 基于动静结合方法的卫星网络路由方法研究[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(3): 55-59.
XING C, CHEN E H, HAN X D. Static-dynamic routing algorithm in satellite constellation network[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(3): 55-59.
- [31]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.
- [32]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 satellite computing networks[J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 41-46.
- [33]虞志刚, 丁文慧, 陆洲, 等. 卫星云网: 一种云网融合的卫星网络体系架构[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 23-30.
YU Z G, DING W H, LU Z, et al. Satellite cloud network: a satellite network architecture based on cloud-network integration[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 23-30.
- [34]彭木根, 袁硕. 面向星地融合的 6G 云雾化自组网[J]. 电信科学, 2024, 40(3): 1-14.
PENG M G, YUAN S. Toward satellite-terrestrial integration: 6G cloud-fog collaborative self-organizing network[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(3): 1-14.
- [35]于登云, 李宗凌, 宋桂萍, 等. 我国巨型星座操作系统发展研究[J]. 中国科学:信息科学, 2024, 54(3): 449-460.
YU D Y, LI Z L, SONG G P, et al. Development research of operating system for mega-constellation in China (in Chinese). Scientia Sinica(Informationis), 2024, 54(3): 449-460.
- [36]李宗凌, 宋桂萍, 汪路元, 等. 巨型星座高效管理及智能应用关键技术研究[J]. 航天器工程, 2023, 32(1): 1-7.
LI Z L, SONG G P, WANG L Y, et al. Research on key technologies of high efficiency management and intelligent application for mega-constellation[J]. SPACECRAFT ENGINEERING, 2023, 32(1): 1-7.
- [37]RAHIM S, PENG L. Intelligent space-air-ground collaborative computing networks[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2023, 6(2): 76-80.
- [38]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.
- [39]Accelerating space exploration with the HPE Spaceborne Computer [EB]. 2024.
- [40]李炎, 胡岳鸣, 曾晓洋. 面向商业航天卫星成本效益的三模冗余纠错防护技术: 近似计算的实践[J]. 电子与信息学报, 2024: 1-9.
LI Y, HU Y M, ZENG X Y. Cost-effective TMR soft error tolerance technique for commercial aerospace: utilization of approximate computing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024: 1-9.
- [41]以 AI 载荷为核心, 地卫智能应急一号卫星发射成功[EB]. 2024.
With the AI payload as the core, the intelligent emergency satellite No.1 of the Earth-satellite was successfully launched[EB].2024.
- [42]魏雯婷, 伏丽莹, 王琨, 等. 卫星互联网路由技术综述[J]. 西安电子科技大学学报, 2024: 1-15.
WEI W T, FU L Y, WANG K, et al. Survey of routing technologies for the satellite Internet[J]. JOURNAL OF XIDIAN UNIVERSITY, 2024: 1-15.
- [43]张佳鑫, 常朝阳, 张易隆, 等. 巨型星座路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 2-13.
ZHANG J X, CHANG C Y, ZHANG Y L, et al. Survey on routing technology of mega constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 2-13.
- [44]A I P-N, MIGUEL A V, SHANKAR M R, et al. Signal processing for high-throughput satellites: Challenges in new interference-limited scenarios[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(4): 112-131.
- [45]张平, 赵晶, 虞志刚, 等. 空间信息网络分布式存储方案研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(3): 256-264.
ZHANG P, ZHAO J, YU Z G, et al. Research on distributed storage scheme for space information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019, 14(3): 256-264.

[作者简介]



丁春旭 (1998-), 男, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院硕士生, 主要研究方向为卫星通信网络。



丁熙浩 (1993-), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。



丁文慧 (1987-), 女, 博士, 中国电子科技集团有限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。

徐志平 (1978-), 男, 硕士, 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信网络。

虞志刚 (1989-), 男, 博士, 中国电子科技集团有限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, 中国电子科技集团有限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。