

面向卫星通导遥算融合的关键技术分析

李杰¹, 肖千里¹, 冯建元^{1,2}, 张程³

(1. 亚太卫星宽带通信(深圳)有限公司, 广东深圳 518101;

2. 鹏城实验室, 广东深圳 518052;

3. 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部, 北京 100094)

摘要: 空天技术深入发展后, 用户对空天系统的要求将是融合通信、遥感、导航卫星的天基信息服务系统, 以向用户提供高速数据传输、直达用户的实时遥感服务、精确到厘米以内的高精度定位导航、分布式协同计算资源等服务能力, 从而应用于丰富的服务场景。现有的通信、导航、遥感卫星存在软件协议和物理设施上的屏障, 不能融合应用, 远远不能满足天基信息服务系统的建设要求, 因此, 有必要研究通信、导航、遥感、计算在卫星上的融合。融合关键点是硬件和软件资源的可调度、可共享, 以及高效能、高稳定性的载荷器件。基于此, 深入分析面向卫星通导遥算融合的关键技术, 并分析通导遥算融合的典型应用服务方式, 最后通过仿真实验可验证融合后的效能提升。

关键词: 通导遥算融合; 灵活载荷; 天基信息服务系统; 卫星网络; 天基网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024023

Analysis of Key Technologies for Satellites Oriented to the Fusion of Communication, Navigation, Remote Sensing and Computing

LI Jie¹, XIAO Qianli¹, FENG Jianyuan^{1,2}, ZHANG Cheng³

1. APT Mobile SatCom Limited, Shenzhen 518101, China

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518052, China

3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract: After the in-depth development of space technology, the user's requirement for space system will be an integrated space-based information service system that integrates communication, remote sensing and navigation satellites in order to provide the user with service capabilities such as high-speed data transmission, real-time remote sensing services directly to the user, high-precision positioning and navigation accurate within centimetres, and distributed collaborative computational resources, so as to be applied to a rich variety of service scenarios. However, existing communication, navigation and remote sensing satellites have barriers in terms of software protocols and physical facilities, which prevent them from integrating applications and are far from meeting the requirements for the construction of space-based information service systems. Therefore, it is necessary to study the fusion of communication, navigation, remote sensing and computation on satellites. The key points of fusion are schedulable and shareable hardware and software resources, and high-efficiency high-stability payload devices. Based on this, the paper introduced and analyzed the key technology oriented to the fusion, and analyzed the typical application service mode of communication, navigation, remote sensing and computation fusion. Simu-

收稿日期: 2024-06-01; 修回日期: 2024-08-01

通信作者: 冯建元, jyfeng@apsat.com

基金项目: 深圳市科技计划资助 (No. JSGG20220831100602005); 广东省重点研发计划 (No. 2024B0101020002); 深圳市院士工作站资助项目

Foundation Items: The Shenzhen Science and Technology Program (No. JSGG20220831100602005), Guangdong Key R&D Projects Funds (No. 2024B0101020002), Shenzhen Academician Workstation Funds

lation experiments verified the performance enhancement after fusion.

Keywords: fusion of communication, navigation, remote sensing and computation, flexible payloads, space-based information service systems, satellite networks, space-based networks

0 引言

随着天地一体化技术发展的不断深入,天基信息服务系统的概念被提出来。所谓天基信息服务系统,即由通信、遥感、导航卫星、空间站、飞船等组成的以空天设施平台为基础的信息服务体系,可以为用户提供高速数据传输、直达用户的实时遥感服务、精确到厘米以内的高精度定位导航、分布式协同计算资源等服务能力,广泛应用于通信、智能交通、智慧城市、能源采运、自然资源、气象、国防等领域。天基信息服务系统对于国防具有重要意义,不仅能实现海、陆、空、天一体化的实时侦察和监视能力,基于天基信息数据和计算能力提供战场指挥调度能力,在装载特殊载荷的情况下,还可以实现空天打击能力。

现存的通信、导航、遥感卫星,多数还是分立的体系,存在软件协议和物理设施上的屏障,不能融合应用,而单纯的通信、导航、遥感服务,远远不能满足天基信息服务系统的建设要求。举例来说,通信提供的是信息通道,可以提供基础的公共服务,但自身没有观测、导航这类专业用途的服务能力;单纯的遥感卫星缺乏实时有效的数据传输链路,无法解决遥感数据的实时回传和直达终端用户的能力;单纯的导航卫星受限于钟差、轨道误差、传播时延等客观的系统性误差,无法将定位误差进一步缩小。此外,当前应用用途的卫星,普遍缺乏计算能力,除了自身专业业务,无法提供额外的计算能力,无法形成可协同、可调度的天基服务系统。

因此,有必要研究通信、导航、遥感、计算在卫星上的融合,以打破当前多种系统软件协议和物理设施上的屏障。要进行通导遥融合,首先需要硬件和软件资源的可调度、可共享,这对卫星载荷的要求是必须具备灵活性;其次,多种融合的多业务载荷也会需要更多的能耗,这对于卫星寿命、研制成本和热稳定性都会带来挑战,因此必须研究高效能、高稳定性的载荷器件。这些要求将是未来卫星研制生产的方向。

本文将介绍和分析上述面向通导遥融合卫星灵活载荷关键技术,并分析通导遥融合的典型应用服务方式。同时,通过仿真分析,阐述融合后的效能提升。

1 国内外研究和发展现状

1.1 国外研究现状

近年来,国际上对通信、导航和遥感卫星系统集成的研究逐渐深入。欧空局(ESA)早在2000年提出基于导航卫星的对地观测应用计划,对于其未来将要部署的Galileo导航系统的遥感应应用做出设计,实现地球观测和导航功能的部分融合^[1]。2018年发布的一项研究提出了一种集成传感和通信的低轨卫星系统,展示了这类融合系统在提高数据获取效率和准确性方面的潜力^[2]。铱星(Iridium)公司同样进行了相应的研究,尝试在单一卫星上集成多种功能,其Iridium-NEXT星座计划进一步搭载通信载荷、导航载荷与地球观测传感载荷^[3-4]。该公司利用其Iridium-NEXT星座的全球覆盖特性,基于托管载荷的方式实现通导遥融合,在其主要的L频段和Ka频段通信载荷之外,通过其合资企业Aireon LLC在所有Iridium-NEXT星座卫星上部署ADS-B接收器,接收向商用飞机发送的广播式自动相关监视信号,为飞机提供空中导航服务和全球实时飞机监视能力,该卫星载荷如图1所示。Iridium-NEXT星座上还通过约翰霍普金斯大学研发的GEO Scan传感器套件,实现大规模密集的地球科学观测。

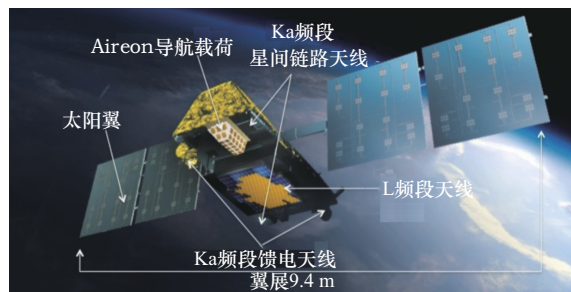


图1 Iridium-NEXT卫星通导遥融合载荷

其他大型低轨通信卫星星座项目,例如Starlink和OneWeb等,同样实现了全球互联网覆盖,也提供了卫星导航和遥感的集成应用的潜在可能性^[5]。特别是Starlink的“星盾”计划,在满足与“星链”通信兼容的同时,搭载遥感载荷实时对地观测,为美军提供实时的战场情报支援,实时快速传输遥感数据,此外也托管各种军用载荷,实现太空打击能力。这些项目都通过卫星载荷灵

活的模块化设计，逐步探索通信、导航、遥感、计算多类载荷的融合。

1.2 国内研究现状

随着近年来卫星技术发展和天基服务需求的增加，我国在通信、导航和遥感系统的集成研究上加强了关注和投入。国内的研究主要集中在开发多功能和跨领域融合星座的建设上，这些系统旨在通过优化设计和增加功能种类，提升星座的服务性能和资源利用率^[6]。我国在北斗导航卫星系统的基础上进一步集成了短报文通信技术，融合了导航与通信功能，在应急救援、水利监测等领域发挥了重要作用，例如水利监测通信应用系统（如图2所示）；武汉大学研制的“珞珈三号01星”融合了通信和遥感功能，为遥感数据的实时回传提供了保障手段。

理论研究方面，国内研究人员针对通导遥融合提出了多种星座模拟和设计方法，例如基于反向设计的跨域融合星座设计与优化方法。通过实验验证，相较于独立和组合星座，该方法可减少30.60%的卫星数量，提高星座覆盖率和服务性能，并降低18.31%的成本^[6]。我国还致力于验证这些集成系统的有效性和可靠性，为未来大规模部署奠定基础。

目前全球范围内并未有任何一个国家实现真正的通导遥算一体化上星融合，各载荷的交互度、复用率较低，各国均处于探索验证阶段。

2 融合关键技术

通导遥算功能融合的基础在于星上载荷具备融合性、灵活性、高可靠性和高效能，实现的关键技术包括计算

资源、通导、通遥的融合技术，可靠高效半导体技术和灵活载荷技术。

2.1 计算资源融合技术

高效整合通信、导航、遥感和计算载荷的功能，关键在于实现在轨卫星/星座硬件资源的共用，包括可软件定义的现场可编程门阵列（FPGA）和中央处理器（CPU）计算资源共用，以及高速大容量存储资源的共用。这种资源共用不仅可以大幅度提高资源利用率，还能显著提升系统的灵活性和可扩展性。例如，通过可软件定义的FPGA，卫星可以在轨对其硬件配置进行重构，以适应不同任务的需求。FPGA的高并行处理能力和低功耗特性使其在复杂信号处理和实时数据处理方面表现出各种场景和任务下的优异的处理效率。此外，利用通用的CPU计算资源，卫星可以运行多种应用程序和算法满足不同载荷对计算能力的需求，同时通过星间任务分配和分时资源调度，实现星座资源的更优利用和负载均衡^[7]。高速大容量存储资源的共用，则可以挖掘星上设备资源潜力，确保大量数据的存储和快速访问，以更低的卫星制造成本支持实时数据处理和传输。

在卫星任务执行过程中，通信、导航、遥感和计算等功能需要协同工作，这要求各个载荷能够高效地交互和共享资源。通过在轨硬件资源的共用，卫星系统可以灵活地分配计算资源和存储资源，从而在执行多任务的情况下保持高效运行。例如，在一个集成卫星系统中，导航系统可以利用遥感数据进行地形匹配，提高定位精度，而这些遥感数据可以通过共享的高速存储资源快速访问和处理。类似地，通信系统可以根据需要动态调整

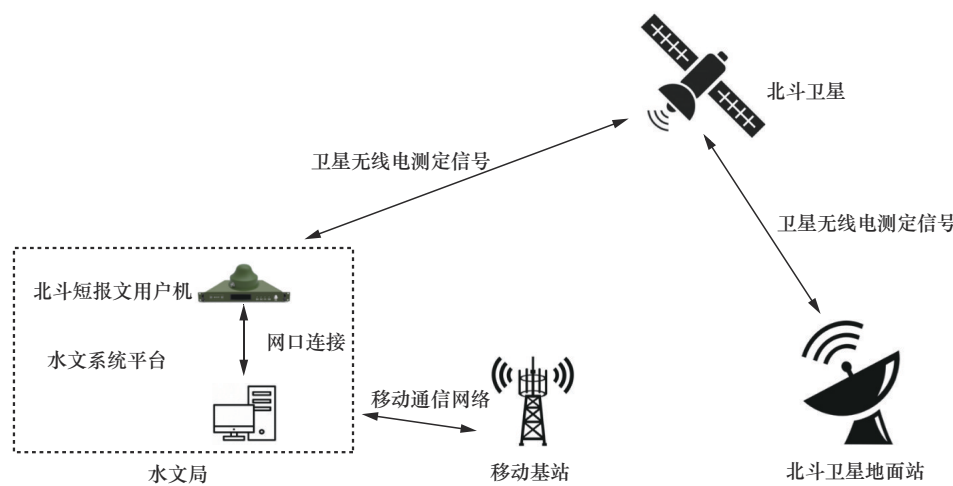


图2 北斗导航卫星的水利监测通信应用

波束覆盖、带宽和功率配置,以支持不同载荷的数据传输需求。

相对于高速大容量存储资源的共用,星上FPGA和CPU的协同架构设计问题是实现计算资源融合的关键问题和技术难点。考虑到CPU擅长顺序逻辑和多任务操作,而FPGA在并行计算和特定任务处理方面具有优势的区别特性,可行的技术路线可以从以下几方面实现。

一是任务划分与分流,对于计算密集型和通信密集型任务,将这些任务分流到FPGA上执行。如矩阵运算、图像处理、机器学习等计算密集型业务,利用其大量的并行处理单元,以更快的速度完成。对于数据通信和加密业务,发挥其低时延、高吞吐量的优势,直接处理网络数据包或加密数据,减少CPU在数据搬移和调度上的开销。

二是软硬件协同设计。可以采用前端CPU负责流程控制、数据接收和部分处理,后端FPGA负责关键层的并行加速处理的方式。前端灵活的流程控制配合后端高效的并行结构,可以大幅提高计算的能效比,这在神经网络计算和建设天基算力网方面有重要意义。同时,可考虑使用高速的PCIe接口优化CPU与FPGA之间的交互^[8-9],降低数据传输的时延和带宽限制,提高整体系统的性能。

三是动态资源分配。根据系统当前的负载情况,动态调整CPU和FPGA之间的任务分配,分流业务压力到相对空闲的模块,使用基于优先级的调度算法,确保高优先级任务得到及时处理。进一步可利用机器学习和预测模型,预估任务的到达时间和计算需求,提前进行资源调度和预分配,以减少调度时延和资源冲突。

2.2 全耗尽绝缘体上硅芯片技术

资源调度融合和星上算力需要更多的功耗,这对于降低卫星制造成本形成挑战,同时,过高的功耗也会造成散热需求增大、星上器件不稳定的问题,因此,找到

低功耗、高稳定的星上器件是支撑星上融合和算力的关键要素之一。全耗尽绝缘体上硅(Fully Depleted Silicon on Insulator, FD-SOI)技术是近年来在半导体领域迅速发展的先进技术,因其在功耗、性能和抗辐射方面的优越特性,成为卫星应用中的一项重要技术选择。FD-SOI技术在埋层氧化物的超薄绝缘体上构建晶体管,通过该绝缘结构实现了基底与晶体管之间更好的电气隔离,这使其天然具有较好的抗辐射能力,特别是在抗单粒子翻转(Single-Event Upsets, SEU)方面表现优越,为高性能芯片带来额外的可靠性,并节省面积。与传统的体硅互补金属氧化物半导体(Bulk CMOS)技术相比,FD-SOI具有出色的SEU弹性^[10]。在相近芯片制程下,FD-SOI晶体管对漏极区域重离子撞击的弹性比Bulk提升了7.7倍^[11]。因此这一特性确保芯片在恶劣的太空环境中稳定可靠地运行。Bulk CMOS与FD-SOI的结构对比如图3所示。

在传统的Bulk CMOS技术中,漏电流会严重消耗功率,尤其是在器件处于待机模式时。FD-SOI技术通过绝缘体薄膜实现电荷载流子的完全耗尽,对通道提供更好的静电控制来缓解这种情况,从而降低了亚阈值漏电流,实现了更低的功耗^[12]。这对于能源效率至关重要的空间应用尤其有益。例如,在一项关于28 nm FD-SOI环形振荡器低温特性的研究中,结果表明,即使在降低电源电压的情况下,FD-SOI器件也可以实现非常低的静态功耗,每级低至7 nA^[13]。

实现全耗尽绝缘体上硅芯片技术的关键问题是高精度制程和热管理。FD-SOI技术相比传统的Bulk CMOS工艺更复杂,因此要求在制造过程中具备更高的精度和控制能力,芯片的制程要求达到65 nm、28 nm,甚至14 nm。目前我国航天级芯片制程只达到28 nm且良品率不高。此外,FD-SOI的设计还需要考虑到体效应、亚阈值摆幅等复杂的物理效应。



图3 Bulk CMOS与FD-SOI的结构对比

空间中卫星散热条件有限，要求对热的精细管理，以防止芯片过热对系统性能和可靠性的影响。一个可行的思路是采用机械泵送液体回路（Mechanically Pumped Fluid Loops, MPFL）为芯片进行主动液冷。机械泵通过连接到热交换器和散热器的管道循环推动液体，机械芯片热源安装在热交换器上，机械泵送的流体将热量从热源输送到散热器，通过热辐射耗散能量，然后冷却后的流体返回热源以继续提供冷却。这是一种先进的主动热控技术，能够对FD-SOI芯片这类高能量密度组件进行高功率热排出和区域温度控制^[14]。机械泵送液体回路与可展开热辐射器如图4所示。

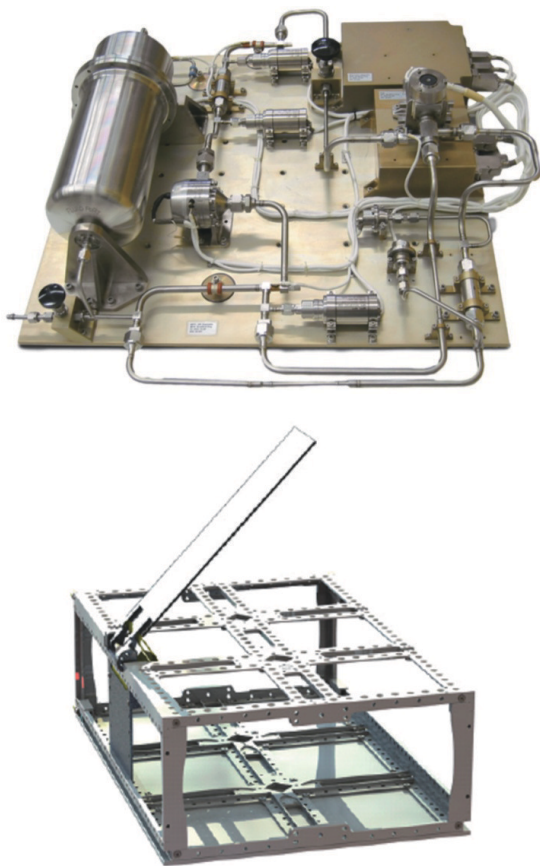


图4 机械泵送液体回路与可展开热辐射器

2.3 通信遥感一体化技术

卫星利用电磁波进行通信的同时，电磁波也具有雷达遥感功能，从而在通信的同时也完成了遥感工作。通信和遥感技术的集成包括双功能雷达通信（Dual-Functional Radar-Communication, DFRC）天线技术和遥感数据实时回传技术。双功能雷达通信天线技术允许通信和遥感在频谱和硬件上的共享，从而更有效地利

用频谱资源并提高通信和遥感能力^[15]，通过使用相同的电磁频谱和波形提高了频谱利用率。通过联合信号处理技术，系统从目标反射回波提取目标的距离、速度和其他特性用于雷达目的，接收机从发射信号中解调通信载波用于通信目的。此外，利用自适应波束成形技术，信号能量可被引导至特定方向，从而增强雷达的检测能力以及通信链路的可靠性和范围。卫星双功能雷达通信结构如图5所示，雷达波束和通信波束也可同为同一波束。

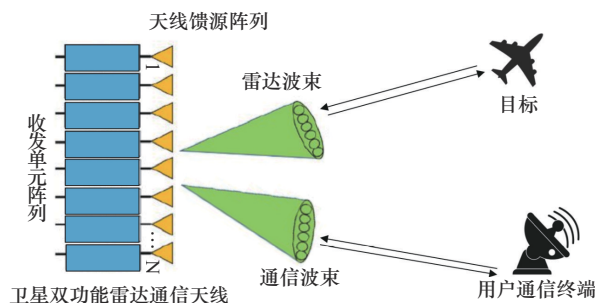


图5 卫星双功能雷达通信结构

遥感数据实时回传技术允许遥感载荷提取的数据通过卫星对地通信链路、卫星间通信链路回传至数据中心，保障遥感数据的实时性。同时利用星座传输和空间传输的鲁棒性和抗监听特性，保障数据安全。

卫星双功能雷达通信天线技术的关键在于信号波形设计。通信和探测融合要求雷达与通信的高效合作，这要求两个系统必须交换信道状态、调制格式等信息^[16]且两个系统互不干扰。目前的方案是通过单一波形解决共存系统的干扰问题，实现雷达和通信两种功能。因此需要设计一种波形，在保证雷达性能的同时提供高质量的通信信号。该问题的解决方向在于：在雷达服务和通信服务的约束条件下，如何提出可以同时进行探测和数据传输的波形。例如，有学者提出使用Cramér-Rao界限（Cramér-Rao Bound, CRB）作为探测的约束条件，使用通信容量、用户QoS作为通信的约束条件，以实现最小的探测CRB和最大的通信容量、最好的用户QoS，具有潜力的波形有OFDM和RSMA等，更适配的波形有待产业进一步研究设计^[17-18]。

2.4 通信导航融合增强技术

导航增强技术主要在于差分技术，差分技术的实质是通过两个或多个观测站同时接收处理导航卫星信号，将各个站点的观测量集中到一起进行处理，从而消除各站点观测到的公共的、慢变化的误差项，提高全球导航

卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的精度。典型的误差主要有卫星轨道误差、钟差、电离层时延等空间传输误差。

对于地球静止轨道卫星, 卫星导航增强方式为通过大量分布广泛并且坐标位置已知的差分观测站对导航卫星进行监测, 获取原始定位数据 (包括伪距、相位等) 并发送给主控站进行处理; 主控站计算出各颗卫星的定位修正信息, 并把这些定位修正信息发送给地球静止轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星; GEO 卫星再将这些修正完成的信息发送给用户接收机; 接收机通过差分解算消除区域导航误差, 从而达到提高定位精度的目的。更多的差分引入, 能够提供更高精度的定位服务并增强信号强度和质量。例如北美地区于 2003 年启用的 GPS 广域增强系统 (Wide Area Augmentation System, WAAS) 包含 25 个地面监视站、2 个地面主控站、3 颗 GEO 卫星和连接地面站的光纤通信网络。WAAS 监视站全天候监视 GPS 星座、GPS 信号以及 GPS 信号传输环境 (如电离层和对流层) 的变化。WAAS 主控站接收处理各监视站的信息, 实时生成 GPS 位置增强数据和完好性增强数据, 通过太平洋上空、大西洋上空和美国内陆中部的 3 颗 GEO 卫星, 向北美地区的所有用户广播 GPS 广域增强数据。该系统实现了北美地区的 GPS 精度从 10 m (95%) 到水平 3 m (95%)、垂直 3.5 m (95%) 的大幅度提升。

低轨卫星催生了一种新的可选技术路径, 即在低轨卫星上搭载 GNSS 的信号增强载荷, 由多颗低轨卫星接收 GNSS 信号, 通过低轨星间通信链路完成星座内通信、星座完成差分计算和误差消除后再向地面用户广播强度更强、精度更高的导航增强信号^[19]。例如美国 Xona Space System 公司的 PULSAR 项目, 其设计和试验下一代小型低轨卫星的精确导航增强服务, 将提供比标准 GNSS 高 10 倍的精度和高 100 倍的抗干扰能力^[20]。通过这种技术, 卫星可以与现有的 GNSS 系统结合, 提供更精确的导航服务, 尤其是具备了更强的抗干扰能力。

通信导航融合增强技术的难点在于构建高质量、稳定的星间通信链路。低轨卫星导航增强系统通常需要通过星间通信链路进行数据传输和差分计算。这些链路的时延和带宽限制对差分计算的实时性和准确性产生重要影响^[21]。低轨卫星系统的卫星轨道变化较快, 空间环境复杂, 使用激光载荷构建星间链路时因其激光束较窄, 光学星间链路的捕获、跟踪和指向成为难题。为保证星间通信链路的质量, 一方面可采用高指向精度, 大带宽

的星间激光通信载荷, 同时设计姿态和轨道保持精度更高的卫星, 确保链路的持续稳定可用; 另一方面可采用微波通信载荷 (例如 Ka 频段窄波束天线) 构建星间链路, 以降低成本和难度。

2.5 灵活载荷技术

为保证卫星服务能力能尽可能匹配动态变化的用户需求, 需要部署具备灵活性的星上载荷以充分调度资源, 具体技术体现在数字透明处理器 (Digital Transparent Processor, DTP)、高速数/模转换 (Digital/Analog Conversion, DAC)、高速模/数转换 (Analog/Digital Conversion, ADC)、数字变频、数字波束成形和小型化功率放大器功率池技术。

数字透明处理器通过对信号的信道化, 实现以子信道为单位的数字自由交换, 完成信号的广播、组播、路由、变频、功率调节和阻塞功能, 以子信道为资源灵活调度的最小颗粒度。随着 DTP 技术的发展, 处理能力不断提升, DTP 兼容 C、Ku、Ka、Q/V 多频段信号, 可达 960 Gbit/s 以上的吞吐能力, 传统电缆传输速度已无法满足 DTP 数据交换要求。因此 DTP 单机内嵌入高速串行链路的光设备, 使用光通信承担 DTP 内部的数据传输, 实现 20 Gbit/s 级别的传输速率^[22]。

为支撑 DTP 高速大容量数字处理能力, 需要在 DTP 的输入输出侧分别配置高速 ADC 和 DAC 芯片, 以满足 Gsps (吉符号/每秒) 级别的采样率和 GHz 级别的输入输出带宽。同时需在 ADC 和 DAC 芯片中分别设计数字下变频和数字上变频功能, 兼容 L/Ka 或 C/Ka 频段的变频能力。例如美国 Teledyne 公司的芯片即开发了该设计^[23], 以满足未来卫星灵活载荷需求。这相比传统星载变频器大幅度缩减了重量和功耗规模。

现存的卫星馈源指向调整技术或天线指向调整技术已无法满足未来卫星波束灵活调整的需求。为实现卫星波束指向大规模的高度灵活性, 可行性的办法是采用数字波束成形技术, 即通过有源相控阵扫描实现每个波束的独立自由指向, 通过“馈源阵结合反射面”的体制来降低阵元规模, 通过数字波束成形器独立计算每个波束/子波束的权值, 形成全阵元参与全波束形成的全灵活体制。

未来星上载荷高效能和功率灵活性对功放小型化技术提出要求。卫星信号放大主要依赖星载功率放大器。为在卫星有限的空间包络下实现紧密的阵元排布同时降低高频段功率放大器至馈源的衰减, 功率放大器与馈源应尽可能使用短波导连接且紧密排布, 因此要求功率放大器在保持原有效率水准的前提下尽可能缩减体积, 构

建小型化的功率放大器。功率放大器小型化技术又有利于实现“相应功率放大器为对应馈源提供功率”,因为全部馈源共同形成波束,所以结果是全部馈源贡献于全波束成形,所有功率放大器汇聚成“功率池”,可以方便地根据波束成形的权值灵活调配功率。

同时融合载荷的空间集约控制对星上供电方式也提出了改变的要求。以往功率放大器需要电源控制器(Electronic Power Controller, EPC)从卫星母线获取供电并完成供电控制工作,为适应空间集约要求,新的供电方式是单一放大器使用单个EPC转变为多个放大器共用EPC供电,例如单个EPC为4~8个放大器供电。这大大提升卫星空间利用效率和卫星性价比。

3 灵活载荷基础上通导遥算融合的应用模式

通信与导航、遥感、计算的融合提供了设施基础,通导遥算的融合则带来应用和服务效率、数据业务便捷度的大幅提升,对以往单纯的通信、遥感、导航服务水平都是革命性的提升。

通导融合方面,利用低轨卫星轨道较低的特性,其信号的空间损耗将大幅降低,地面获得的信号强度一般较强。以Iridium为例,其地面接收机接收的信号强度比GPS强约30 dB;同时,低轨卫星运动速度更快,在一定的窗口内几何位置变化较大,在载波相位定位时更有利于对整周模糊度进行解算;低轨卫星相对于地面接收机的速度同样更快,具有更好的多普勒观测性^[24-25]。因此,将LEO卫星用于导航增强可以拓宽服务范围与场景,使其在弱信号和强干扰环境提供服务成为可能,并提供更高的定位精度。进一步的,基于融合卫星通信灵活载荷的架构,通过星载计算平台分析导航增强需求、控制通信载荷的有源相控阵天线进行波束扫描凝视,可明显提高重点目标服务区的导航增强服务时间和质量。

通遥融合方面,可以使用通信载荷高达Gbit/s量级的高速通信链路实现高速遥感数据回传,替代传统的百Mbit/s级别数据传输链路,大幅提高遥感回传速率、为大数据量的遥感短时回传提供可行性。例如超高帧率遥感相机载荷产生的数据量通常为Gbit量级,通过星载计算平台搭载压缩算法完成数据压缩,再经由通信载荷的Gbit/s量级高速通信链路回传,可以将回传时间缩短到 $\frac{1}{10}$ 以下。叠加利用星间通信链路及对地通信链路完成实时回传,从而改变以往遥感卫星只能过顶数据传输站才

能回传的非实时传输问题;此外星地链路和星间链路也大幅提升遥感回传链路的冗余度和可靠性。在功能方面,基于通信融合遥感,还可利用通信灵活载荷的数字交换和波束灵活调度功能,构建从遥感载荷直达用户端的服务链路,更加高效地调度遥感数据至终端用户;此外,利用通信灵活载荷的有源相控阵天线,在双功能雷达通信的波形设计下(例如OFDM)共用频谱资源,可同一段频谱同时实现卫星通信和雷达扫描遥感功能,成倍提高频谱利用效率。

在通导遥与计算融合方面,星载计算和存储平台为各载荷提供在轨可重构的软件定义计算资源和大容量通用存储空间,通信载荷为在轨重构的软件上注提供高速通道。卫星操作者可提前规划任务安排,通过地面站上注计算与控制指令和程序,调配计算资源以满足各种计算任务。

通导遥算融合的灵活载荷框架设计如图6所示。

4 仿真实验分析

下面针对上述融合技术实现的载荷灵活性所带来的卫星资源利用效率提升进行仿真验证。

对于传统的透明转发多波束卫星,在航空航海等业务需求随时空分布变化等场景下,波束资源利用存在忙闲不均问题,导致系统实际可用带宽远小于系统可用带宽,实践中系统资源利用率通常在70%左右。

为了避免上述问题,可以将星上总功率和总带宽作为整体,然后根据各波束中每个载波发出的需求指令进行分配,功率和带宽使用完毕后再进行回收。每个载波所分配的功率和带宽资源受每个多端口放大器的功率、带宽以及星上总资源的约束。这一策略用高的复杂度换来分配的灵活性以及对需求变化的适应性。

仿真的方法是,首先多路信号输入DTP,在DTP内部完成子带交换以实现灵活的带宽分配和频率规划,然后从DTP的输出进入微波光子变频器完成上变频,再过多端口放大器进入馈源形成覆盖波束。对于每个波束,通过多个载波服务该波束覆盖范围内的不同终端。

以星上通过同一个多端口放大器(Multi-Port Amplifier, MPA)的波束为一个波束组,根据组内波束的信道条件和载波的容量需求,在满足MPA总功率和带宽约束的前提下对分配给每个载波的功率和带宽进行调整。假设前向上行接收载干噪比相同(通过调整信关站发射功率或者带宽进行保证),前向下行联合优化卫星功率和带宽资源分配的问题可以建模为:在

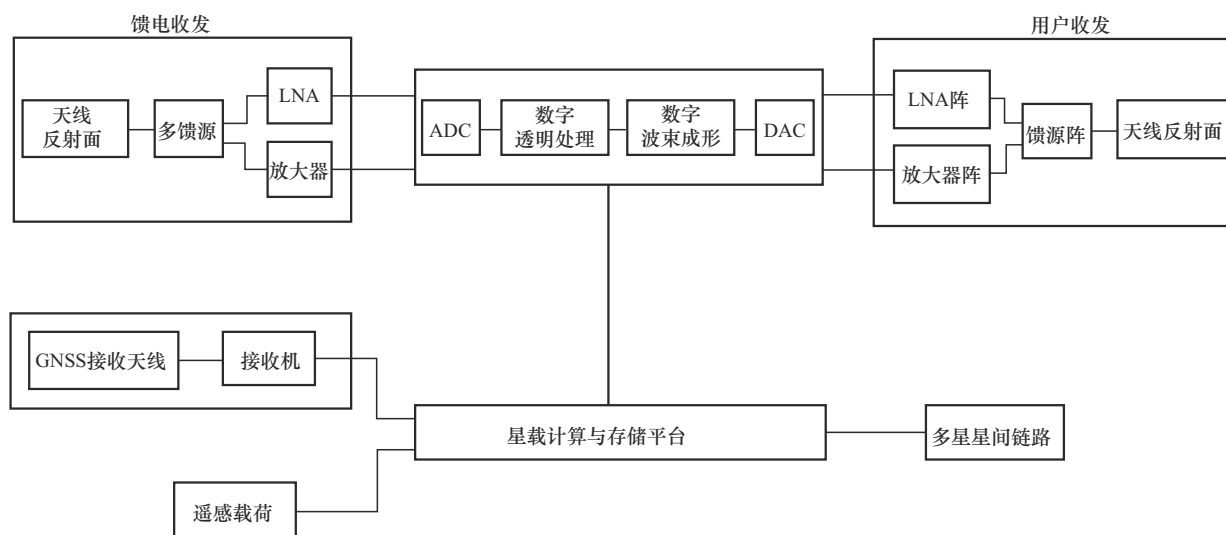


图6 通导遥算融合的灵活载荷框架设计

保证每个MPA输出总功率和输出总带宽的约束下，优化分配给各波束内每个载波的发射功率和带宽，以最小化各载波内所有终端的容量需求与实际所达到容量的均方误差。

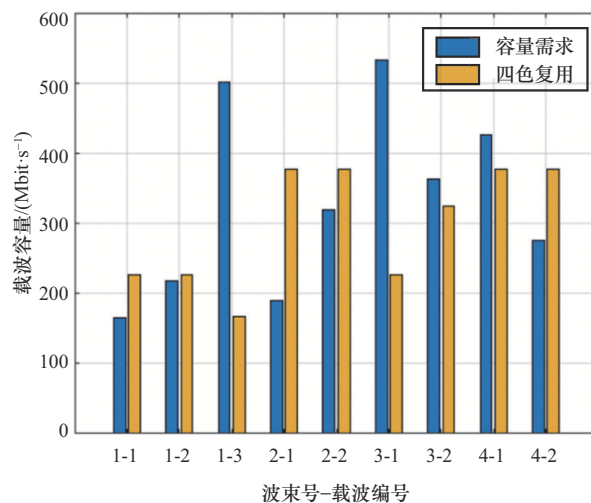
仿真结果表明，载荷的灵活性提升了系统实际带宽，卫星资源利用率在90%以上。仿真结果如图7所示，传统卫星载荷实现的容量匹配度为71%，灵活卫星载荷实现的容量匹配度达到了96%。

5 结束语

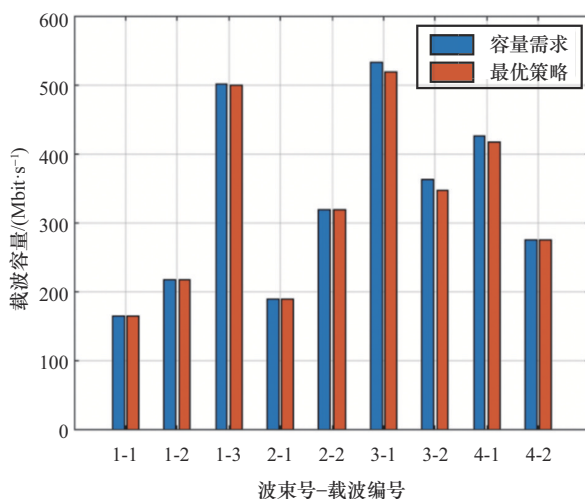
更高的通信速率、更精确的定位、实时的遥感数据以及更匹配业务需求的智能分析与服务供给是未来天基服务网的建设要求和发展方向，依靠现有单纯的通信、导航、遥感服务不足以实现这些目标，可行的路径是通过通信、导航、遥感、计算融合来实现。通导遥算的融合，在卫星基础设施方面的核心关键技术是计算资源、通导、通遥的融合技术，可靠高效的半导体技术和灵活的载荷技术。基于这些技术，通导、通遥、通导遥和计算的融合可以在服务和应用上带来效率的极大提升，相应的实验结果印证了这个结论。

参考文献：

- [1] SILVESTRI P. Earth-observation applications of navigation satellites[Z]. 2000.
- [2] YIN L F, LIU Z A, BHAVANI SHANKAR M R, et al. Integrated sensing and communications enabled low earth orbit satellite systems[J]. IEEE Network, 2024, (99): 1.



(a) 传统卫星载荷容量匹配度



(b) 灵活卫星载荷容量匹配度

图7 卫星载荷资源匹配度仿真结果

- [3] SHENG M, GUO C T, HUANG L. Integrated communication, navigation, and remote sensing in LEO networks with vehicular applications[EB]. 2024.
- [4] WANG Y, LUO H J, CHEN Y, et al. Integrated communication and navigation for ultra-dense LEO satellite networks: vision, challenges and solutions[J]. 2021.
- [5] YANG H T, WANG H Y, LV B, et al. Starlink simulation and potential analysis for remote sensing applications[C]//Proceedings of the Eighth Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and Third International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2023). SPIE, 2023.
- [6] QIN J X, LI X, MA X T, et al. Cross-domain fusion constellation design of communication, navigation and remote sensing[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 3113.
- [7] LI Y, GUO X Y, MENG Z J, et al. A hierarchical resource scheduling method for satellite control system based on deep reinforcement learning[J]. Electronics, 2023, 12(19): 3991.
- [8] VAISHNAV A, PHAM K D, KOCH D. Heterogeneous resource-elastic scheduling for CPU+FPGA architectures[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies. New York: ACM, 2019: 1-6.
- [9] SUN Z P, ZHOU K J, CUI K, et al. PCIe-based high-performance FPGA-GPU-CPU heterogeneous communication method[C]//Proceedings of the 2020 International Workshop on Electronic Communication and Artificial Intelligence (IWECAT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 66-73.
- [10] ELASH C J, LI Z R, JIN C, et al. Efficacy of transistor interleaving in DICE flip-flops at a 22 nm FD-SOI technology node[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4229.
- [11] BARTRA W C, VLADIMIRESCU A, REIS R. Bulk and FDSOI Sub-micron CMOS transistors resilience to single-event transients [C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS). Piscataway: IEEE Press, 2015: 133-136.
- [12] KHEIRALLAH R, GALLIERE J M, TODRI-SANIAL A, et al. Statistical energy study for 28nm FD-SOI devices[C]//Proceedings of the 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [13] BOHUSLAVSKYI H, BARRAUD S, BARRAL V, et al. Cryogenic characterization of 28nm FD-SOI ring oscillators with energy efficiency optimization[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(9): 3682-3688.
- [14] National Aeronautics and Space Administration (NASA). State-of-the-art of small spacecraft technology, Chapter 7: thermal control [Z]. 2021.
- [15] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [16] LIU F, ZHOU L F, MASOUIROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: optimal waveform design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(16): 4264-4279.
- [17] LIU Y J, LIAO G S, YANG Z W, et al. Multiobjective optimal waveform design for OFDM integrated radar and communication systems[J]. Signal Processing, 2017, 141: 331-342.
- [18] YIN L F, CLERCKX B. Rate-splitting multiple access for dual-functional radar-communication satellite systems[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [19] PINELL C, PROL F S, BHUIYAN M Z H, et al. Receiver architectures for positioning with low earth orbit satellite signals: a survey [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2023 (1): 60.
- [20] YANG Y X, MAO Y, REN X, et al. Demand and key technology for a LEO constellation as augmentation of satellite navigation systems[J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1): 11.
- [21] XU B B, HAN K, REN Q Y, et al. An optimized strategy for inter-satellite links assignments in GNSS[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(1): 720-730.
- [22] CYRILLE L, VENET N, VO VAN C, et al. Optical interconnect evaluation process for Thales Alenia Space latest generation of Digital Transparent Processor, DTP6G, and a projection into future needs[C]//Proceedings of the International Conference on Space Optics — ICSO 2022. SPIE, 2023.
- [23] Teledyne e2v Semiconductors. EV12DD700 - This new DAC provides a significant leap forward for RF Softwarization[Z]. 2020.
- [24] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
- ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [25] Stellantis Systems. Space Quad nanoMPM K-/Ku-band[Z]. 2024.

[作者简介]



李杰（1972—），男，本科，工程师，亚太卫星宽带通信（深圳）有限公司总裁，深圳市高层次人才，主要研究方向为卫星通信。



冯建元（1989—），男，博士，高级工程师，亚太卫星宽带通信（深圳）有限公司卫星应用研发部总经理，中国通信学会公共安全通信委员会委员，广东省天基信息系统工程技术研究中心主任，主要研究方向为卫星通信、无线组网。



肖千里（1997—），男，本科，亚太卫星宽带通信（深圳）有限公司卫星应用研发部工程师，主要研究方向为卫星通信、天线射频。



张程（1990—），女，博士，中国空间技术研究院高级工程师，入选第八届中国科协青年人才托举工程，主要研究方向为卫星通信系统设计。