

分布式卫星码域协作传输技术



Code-Domain Cooperative Transmission Technology for Cohesive Clustered Satellites

徐亮/XU Liang, 焦健/JIAO Jian, 张钦宇/ZHANG Qinyu

(哈尔滨工业大学(深圳), 中国 深圳 518055)
(Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202405005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241024.1001.002.html>

网络出版日期: 2024-10-24

收稿日期: 2024-08-08

摘要: 分布式卫星协作传输技术通过有效利用邻域跨轨的卫星集群资源, 以实现高效的数据传输和信息共享。针对功率域多星协作传输技术面临的多星干扰信号处理复杂性高、传输可靠性差等问题, 介绍了多星码域协作传输方案, 包括满足多个卫星在时、频、功率、码域上并行传输的码本设计, 以及基于大规模MIMO的并行信号联合译码算法。仿真实验验证了相比功率域传输方案, 码域传输方案能够在低信噪比条件下, 支撑更大规模的卫星集群进行更可靠的多星并行传输。最后, 讨论并总结了分布式卫星码域智能协作传输技术的若干开放问题与未来研究方向。

关键词: 分布式卫星网络; 多星协作; 码域传输; 智能协作

Abstract: Cohesive clustered satellites' cooperative transmission technology leverages the resources of satellite clusters across different orbits to achieve efficient data transmission and information sharing. Addressing the issues of high complexity in multi-satellite interference signal processing and poor transmission reliability in power-domain multi-satellite cooperative transmission, this paper introduces a code-domain multi-satellite cooperative transmission scheme. This includes a codebook design that supports parallel transmission across multiple satellites in the time, frequency, power, and code domains, as well as a parallel signal joint decoding algorithm based on large-scale MIMO. Simulations demonstrate that compared to the power-domain transmission scheme, the code-domain cooperative scheme can support larger-scale satellite clusters in achieving reliable multi-satellite parallel transmission under low signal-to-noise ratio conditions. Finally, this paper discusses and summarizes several open issues and future research directions for distributed satellite code-domain intelligent cooperative transmission technology.

Keywords: cohesive clustered satellites; multi-satellite cooperation; code-domain transmission; intelligent cooperation

引用格式: 徐亮, 焦健, 张钦宇. 分布式卫星码域协作传输技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 24-29. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405005

Citation: XU L, JIAO J, ZHANG Q Y. Code-domain cooperative transmission technology for cohesive clustered satellites [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 24-29. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405005

1 分布式卫星网络背景

分布式卫星网络作为一种新兴的空间信息传输与处理架构, 在通信、遥感、导航和科学探测等领域展现出其独特的优势^[1], 逐渐成为航天技术与信息通信领域的研究热点^[2]。传统的卫星网络通常由单一或少数几颗大型卫星构成, 这些卫星在特定的轨道上运行并执行通信、遥感、导航等空间科学探测任务。然而, 随着空天通信技术的发展和任务需求的提升, 单颗卫星系统存在抗毁性差、处理能力和覆

盖范围有限的难题, 难以应对卫星互联网日益增长的数据传输需求和复杂应用场景^[3]。此外, 多方共建共享、全球统一开放的天基信息服务网络愿景要求卫星互联网具备分布式底层架构, 卫星集群基于节点对等原则协作组网以提升卫星网络抗毁能力, 综合实现星上海量数据的灵活高效处理与高时效传输。

分布式卫星网络的发展可以追溯到20世纪末。随着小卫星技术的发展, 学术界和工业界探索利用多颗卫星协同工作以完成更复杂的任务。例如, 美国航空航天局(NASA)的Earth Observing-1(EO-1)卫星作为早期分布式卫星系统的代表, 通过与Terra卫星协作, 实现了多卫星的观测任务。进入21世纪, 随着微纳卫星技术日益成熟与卫星互联网基础基础设施建设迅猛发展, 分布式卫星网络的应用范围开始

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071141、62027802); 深圳市科创委项目(JSGG20220831110801003、GXWD20231127123203001); 哈工大原创前沿探索基金项目(HIT.OCEF.2024046)

逐步扩大。近年来,随着“星链”(Starlink)等大型卫星星座项目的推进,分布式卫星网络的潜力得到了更广泛的认可。多个国家和地区纷纷启动星座建设项目,探索通过分布式卫星网络实现全球覆盖的高速通信网络^[4]:欧盟“地平线2020”计划资助独立观测节点的运行网络(ONION)项目,用于研究分布式卫星架构如何应用于地球观测,并补充哥白尼空间基础设施在2020年至2030年对于极地区域的监测;美国国防部高级研究计划局(DARPA)计划2021年将黑杰克项目的小卫星发射到低地球轨道,验证卫星星座自治和空间网状网络技术,为空间机构建立在轨网状网络和分布式卫星系统之间的联网奠定基础。面向未来天地一体泛在智能的卫星互联网演进趋势与高速信息传输服务需求,分布式卫星网络需具备以下3个关键能力。

1) 分布式自主组网

传统的卫星系统通常是以单颗或少量卫星为基础,任务固定、规模有限,且一旦设计完成后,很难进行扩展或调整。然而,随着空间任务复杂性的增加和需求的多样化,单一卫星系统在功能、任务适应性和覆盖范围等方面的局限性日益显现。分布式卫星系统通过多颗卫星的协同工作,实现了更高的任务灵活性、更大的覆盖范围和更好的系统可靠性。具体来说,分布式卫星网络通过使用自组织网络技术以去中心化的方式实现卫星自主组网与动态管理。卫星节点可根据邻近卫星信息共享、任务目标特点、卫星轨道规划、资源异构程度,自动切换与调整通信链路和网络拓扑,构建包含数颗卫星的编队或集群、数百颗卫星节点的星群,乃至数千颗卫星节点的巨型星座。基于环形、星形、网格以及混合拓扑等多样化空间几何构型设计方法,可以实现灵活性高、扩展性强的分布式卫星网络编队,支撑全球泛在连接通信需求的同时,为空中、地面、海洋等特定区域复杂任务,提供机动性强的通信、计算与感知一体化的泛在智能信息服务。

2) 任务驱动通感算

随着分布式卫星网络规模的扩大和任务复杂度的提升,传统的通信、感知和计算分离的架构已经难以满足未来全球通信遥感导航、环境监测、科学探测、深空任务与战场态势感知等关键性任务的智能信息服务需求。例如,卫星常态化执行各类遥感任务过程中获取的数据量往往极其庞大,而星载有限算力资源约束下的数据处理能力有限,导致卫星海量数据高效处理与高时效传输能力不平衡发展的矛盾日益凸显。此外,面对不断变化的环境和任务需求,如何高效融合通信、计算和感知技术架构优化复杂任务的执行效率,成为分布式卫星网络亟待解决的关键科学问题。任务驱动的通感算一体化技术将通信、感知和计算有机结合,打破了传统的

功能模块划分,使得卫星能够更加灵活地应对复杂任务。其主要优势包括:

- 资源优化:通过通感算一体化,各卫星可以根据任务需求动态分配通信、感知和计算资源,提高系统整体效率。
- 降低延迟:业务数据的本地处理和边缘计算有效减少了数据回传地面的需求,并降低任务执行的延迟。
- 任务灵活性:任务驱动的机制使得卫星能够根据当前任务需求和环境变化,自主调整其操作模式,增强了系统的适应性。
- 数据处理效率:通过计算任务的前移和感知数据的实时处理,减少了传输和存储的数据量,提高了数据处理的时效性。

3) 近实时自主决策

近实时自主决策能力已成为分布式卫星系统中的一个关键要素。在分布式卫星系统中,多颗卫星需要在协同执行任务的过程中应对各种不可预测的环境变化和任务调整^[5]。例如,空间中的目标探测、轨道调整、通信链路的建立和维护、异构资源优化与管理等都可能需要近实时的决策能力。然而,地面控制中心指挥和调度卫星的传统模式存在时滞性强、自主能力弱的问题,难以应对这些挑战。分布式近实时协同决策的实现依赖于分布式共识算法、任务分配与协调、AI赋能的学习与决策、边缘智能计算与处理等关键技术支撑。

2 分布式卫星协作传输技术研究现状

随着星间激光通信技术的快速发展,星座中卫星间激光通信传输速率最高可达100 Gbit/s,而传统单星对地通信最高传输速率不足10 Gbit/s,导致星上捕获的海量业务数据无法实时回传,影响用户体验。单星服务架构已经无法满足复杂多样的空间任务数据高时效传输需求,需要开发利用多颗卫星的集群资源以实现高效的数据传输和信息共享。多星协作传输技术应运而生。

多星协作传输技术利用地面终端能够同时观测并预测多颗低轨卫星运行轨迹的特性^[6],结合多星多波束空分复用潜在优势,充分利用多个卫星节点的资源,如通信链路、天线系统和计算能力,在不增加发射功率和带宽的前提下构建能够产生可观分集复用增益的虚拟“巨型天线阵列”,进而提升分布式卫星网络在有限过顶时间内通信的传输效率、可靠性和抗干扰能力。波束成形技术在多星协作传输中发挥着关键作用。一方面,通过精确控制卫星大规模天线阵列的特定辐射方向图并生成定向传输波束,可以提高信号在特定方向与位置上的增益;另一方面为了更好地利用稀缺频谱资源,

卫星集群可以在不同卫星的波束间和同一卫星的多个波束间使用全频率复用来满足大容量数据传输速率需求。以上设计需要解决的核心问题是严重的多星波束间干扰。针对网络拓扑时变、链路质量迥异、数据传输的可靠性和稳定性难以控制的问题,文献[6]采用协作多点联合传输技术,提出基于瞬时信道信息的多星联合预编码算法,以抑制星地链路间波束信号干扰。文献[7]通过多层卫星协作通信以提升卫星服务的可靠性、时效性和覆盖范围。然而在基于功率控制的多星多波束协作中,多个卫星的数据流在不同发射功率、信号损耗、收发天线增益条件下,功率域叠加传输给接收端的多星信号译码算法带来了巨大挑战。为此,相关研究工作聚焦于探索卫星端波束线性预编码算法如零迫(ZF)、最小均方误差(MMSE)和奇异值分解(SVD)等,与非线性预编码算法如污纸编码(DPC)、汤姆林森-原岛(TH)与矢量扰动(VP)等研究,并关注以上预编码算法在卫星信道环境下的性能分析与优化。为提高频谱效率,文献[8]提出了基于深度学习的半定松弛和加权最小均方误差(WMMSE)的高效迭代线性预编码算法。尽管非线性预编码算法DPC在编码过程中利用干扰信息进行预处理可以达到近似理想的信道容量,但是DPC在多用户和多天线系统中的实现复杂度较高,且需要在发送端对干扰进行精确预编码处理,对信道状态信息(CSI)和干扰信息的精确获取要求过高。与之相反,随着天线数量与用户数增加,线性预编码算法相比非线性预编码算法可以以更低的计算复杂度实现接近最优的性能,因此被广泛应用于多波束卫星通信系统。

然而,一方面大部分现有研究采用类似于信号干扰消除的信号处理思想处理多用户信号干扰,往往存在噪声掩盖卫星数据信号从而导致译码失败概率过高的问题。特别地,地面接收站配置的大规模天线阵列往往存在不同程度的信道相关特性,且现有功率域接收算法无法实现闭环功率控制,进而导致译码性能出现严重恶化。另一方面,高维度矩阵求逆与高迭代次数问题限制了MMSE与ZF预编码与接收算法在分布式卫星超大阵列规模系统的近实时计算与传输应用,复杂计算带来的高能耗与资源受限的小型化卫星载荷设计产生矛盾。针对该问题,文献[9]提出截断多项式展开(TPE)方法,对随机变量或参数的不确定性进行多项式展开,来捕捉系统输出的不确定性特征,可以实现接近正则化ZF算法的译码性能。然而该方法过度依赖于信道响应二阶矩的统计知识,在实际分布式卫星大规模天线阵列通信条件下无法实现。针对大规模多输入多输出(MIMO)通信下的预编码与信号估计问题,文献[10]提出了一种Kaczmarz线性迭代算法,在不需要获取协方差矩阵知识条件下,通过迭代求解适

定或超定线性方程来获得准确的信号估计。在此基础上,文献[11]提出了随机Kaczmarz估计算法,相比传统Kaczmarz算法可以实现更优的指数收敛率,并有效应对天线数与用户数线性增长带来的高维度计算问题,应用于信号接收机设计。

3 码域多星协作传输方案

尽管功率域多星协作传输技术有效提高了星地通信系统的传输速率,并一定程度上缓解了多星信号干扰,但是星地通信高动态、大损耗、强干扰通信条件导致信干噪比低,地面站超大规模天线阵列物理布局使得系统有效自由度受限等多种因素,增加了多星多波束信号处理的复杂性,并较大程度地抑制了多星协作传输的可靠性与吞吐量性能。与功率域卫星协作传输技术研究中多用户信号检测思路不同,基于码域的多星协作传输方案通过在多个卫星端使用相同码本,将需要传输的语义信息编码成低码率码字,然后在同一时、频、功率域上叠加传输^[12],实现单位资源上的多星过载传输。码域协作传输方案不再将同一资源块上单星信号以外的其他卫星信号单纯作为干扰信号看待,而是将其视为有效信号的一部分,凭借码本对多路卫星不同数据流进行译码恢复。基于大规模MIMO分布式卫星码域协作传输方案的信号处理流程如图1所示。下面我们分别从卫星码本设计以及信号译码算法进行介绍。

3.1 卫星公有码本设计

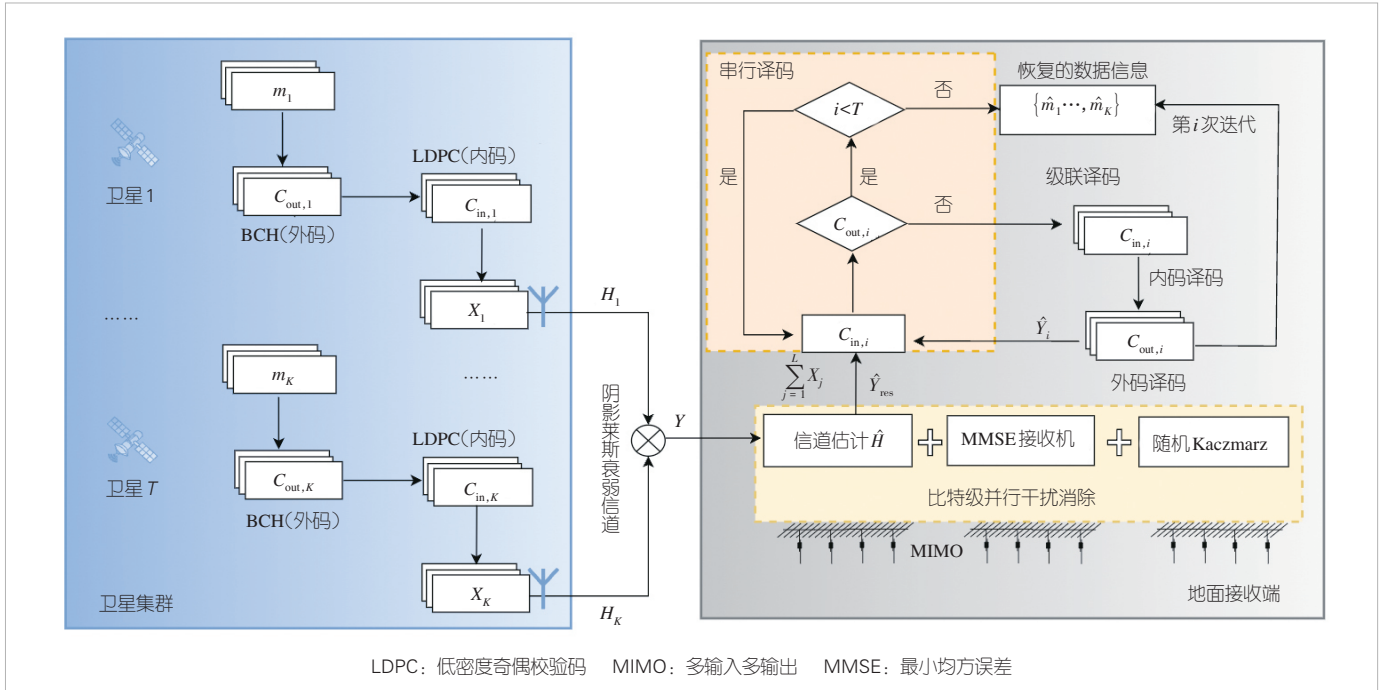
基于级联编码思想选择适当的外码与内码,设计能够区分 T 个卫星消息的高阶卫星公用码本,保证不超过 T 个卫星从公共码本中选择不同码字对各自在轨处理后的信息 m_i 进行映射,以码率 R 进行外码与内码级联编码得到需要传输的码字 X_i 。假设地面接收端配置 M 根接收天线,其接收来自 K 个卫星的叠加信号可以表示为:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^K \sqrt{P_i \text{PL}_i^{-1} G_i} \mathbf{h}_i X_i + \mathbf{z}, \quad (1)$$

其中, P_i 为卫星发射功率, PL_i^{-1} 为卫星 i 与地面接收端之间的路径损耗, G_i 为卫星 i 信号的天线增益, $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 为卫星 i 与地面接收端之间的阴影莱斯衰弱信道增益向量, $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{M \times 1} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_K)$ 为复高斯噪声信号。

3.2 信号联合译码算法

地面接收站首先通过现有信道估计方法获取高维信道状态信息矩阵 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$,然后联合线性迭代译码算法MMSE与非线性串行干扰消除算法,恢复部分卫星的符号信



▲图1 基于大规模MIMO的码域多星协作传输方案的信号处理流程

息。在第 \$L\$ 次串行干扰消除过程中，接收端信号的信干噪比可以表示为：

$$\gamma_k = \frac{P_i |([V]_L)^H \mathbf{h}_L|^2}{\sum_{z=L+1}^{|K|} P_z |([V]_z)^H \mathbf{h}_z|^2 + \sigma^2 |([V]_L)^H \mathbf{1}|^2}, \quad (2)$$

其中， $\mathbf{V} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma_n^2 / P_i \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H$ 为 MMSE 检测器，可以通过随机 Kaczmarz 算法将待检测的卫星符号视为求解线性方程组 $\mathbf{A}\mathbf{w} = \mathbf{b}$ 的最优解 \mathbf{w}^* ，并在有限迭代次数 τ 内每次选择信号最强的卫星信号进行译码并消除其干扰，实现对 MMSE 理论性能的逼近。非线性串行干扰消除算法执行过程中，当接收信号的信干噪比低于译码门限时往往无法成功译码。假设地面接收站执行第 $L + 1$ 次串行干扰消除失败，在基于随机 Kaczmarz 的串行干扰消除算法恢复出部分卫星的码字信息 $\sum_{j=1}^L X_j$ 后，得到目标残余信号 \hat{Y}_{res} 为：

$$\hat{Y}_{res} = \mathbf{y} - \sum_{\ell=1}^L \sqrt{P_\ell P L_\ell^{-1} G_\ell} \mathbf{h}_\ell X_\ell. \quad (3)$$

进一步对残余信号 \hat{Y}_{res} 进行联合译码，参考文献[12]对残余信号进行内码译码得到模二和形式的叠加码字信号如下：

$$y_r = [f_{out,\oplus} + \mathbf{I}] \bmod 2, \quad (4)$$

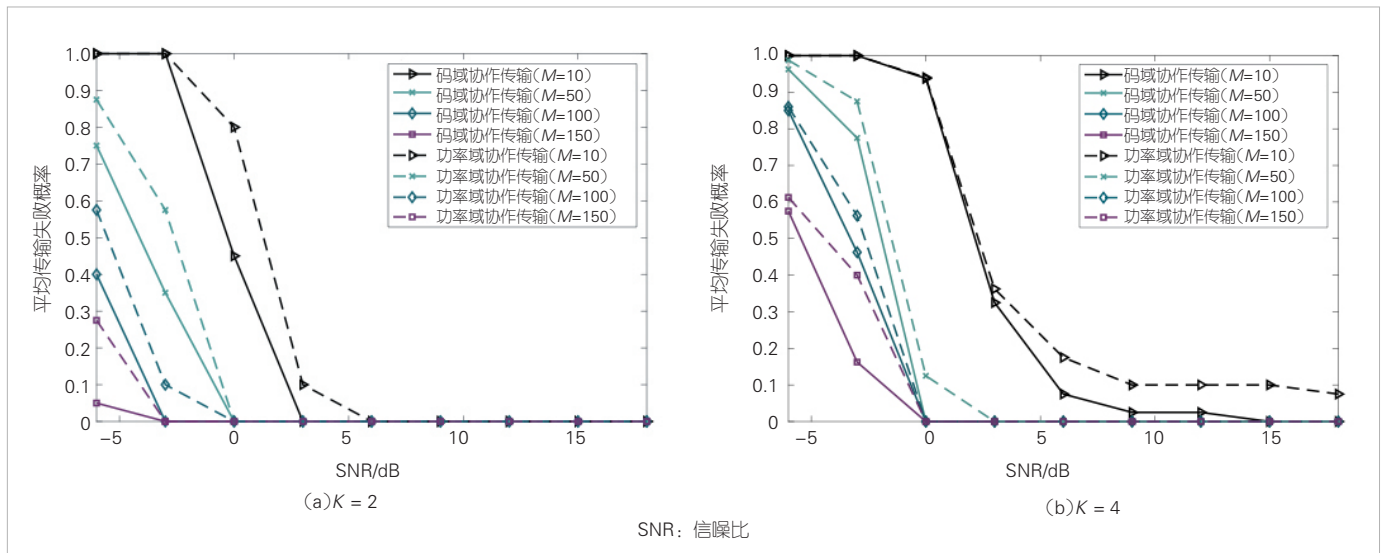
其中， $f_{out,\oplus} = \left[\sum_{\ell=1}^{K-L+1} f_{out,\ell} \right]$ 为多个卫星消息外码编码后的叠加码字信号， \mathbf{I} 为干扰信号和噪声。以 BCH 码作为外码进行级联传输为例，每一个消息 m_i 都被映射为 $GF(2^k) \setminus 0$ 中元素 α_i 的多项式系数，接收端依据 Berlekamp-Massey 等算法计算对应的误差定位多项式的多个根，并通过根的逆运算估计得到元素 α_i 对应的消息，以恢复出剩余 $K - L \leq T$ 个卫星的信息。

本文给出采用 BCH-LDPC 级联编码以及基于随机 Kaczmarz 算法的联合译码算法，共同实现码域多星协作传输方案的仿真结果，如图 2 所示。参数设置为：码本阶数 $T=2$ ，卫星消息长度为 10 bit，码率 $R=0.1$ ，卫星数量 $K=[2,4]$ ，地面接收端天线数 $M=[10,50,100]$ ，随机 Kaczmarz 迭代次数 $\tau = 50$ 。仿真结果表明，码域协作传输方案相比纯功率域传输方案在信噪比 (SNR) 小于一定阈值条件下可以实现更高的传输可靠性，且 SNR 阈值随着接收天线数量 M 减小和卫星数量 K 增大而增大，即码域多星协作传输方案相比功率域协作传输方案能够在低信噪比条件下，支持更多的卫星数量并行可靠传输。特别地，当传输可靠性增益率大于内码码率倒数时，码域协作传输方案具备提升系统传输容量的潜力。

4 未来研究展望

4.1 基于 OTFS 的多星波形协同和调制技术

面对低轨卫星高动态频偏、大尺度损耗等信道特性，基



▲图2 码域多星协作传输性能仿真结果

于正交频分复用 (OFDM) 技术的多星协同传输方案, 对于不同轨道和时间间隔上存在的差异化多普勒效应表现出较高的敏感性, 使得通信系统性能显著下降。正交时频空 (OTFS) 技术作为星地通信的新型多载波调制关键技术, 在多星协作传输中展现出巨大的发展潜力。随着分布式卫星网络规模的扩大和协作要求的提高, OTFS通过平均化卫星高速运动引起的快速信道动态变化, 提供更高的抗干扰能力和更强的传输稳定性。此外, 基于分布式卫星协同调度与多星时延-多普勒域波形联合设计, 可以有效提升高速移动场景下双选信道的分集增益, 推动多星传输波形的协同优化, 从而为分布式卫星系统的协同传输提供高效的波形聚合能力, 助力实现全球覆盖、低延时、高带宽的无线通信服务。

4.2 多星分布式智能协作传输技术

现有多星协作传输技术研究, 大都采用集中式的功率控制、波束预编码和信号接收机等方法实现系统整体容量的提升与优化。然而, 分布式卫星网络在复杂空间环境与动态轨道切换条件下, 面临如何维持具有确定性连续协作传输能力的重要挑战。机器学习技术在复杂通信系统优化与管理中展现了巨大潜力。基于深度强化学习和联邦学习网络优化的多星自主协作传输机制, 可帮助卫星智能感知和利用有限频谱与计算资源, 在状态部分可观测条件下隐式表征环境与资源的作用机理, 预测复杂信道状态和最优传输策略, 从而提高频谱利用率和确保卫星间通信的保密性、完整性和可用性。

4.3 任务驱动的多星协作传输技术

与传统的多星协作传输技术不同, 任务驱动的多星协作

传输技术强调任务需求的中心性, 根据不同任务的优先级、时效性、可靠性、能耗度等多维特性参数, 综合动态异构资源管理, 智能协同感知、决策与反馈机制确定最优的协作传输策略, 从而实现对分布式卫星网络的高度定制化服务。显然, 这一技术路径具有更强的灵活性和针对性, 更加契合未来复杂多变的空间科学探测任务需求。

5 结束语

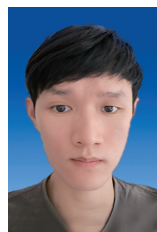
分布式卫星网络将有力支撑遥感遥测、导航定位、手机直连卫星、低空智联等卫星全覆盖新型产业应用, 助力新质生产力发展。本文围绕分布式卫星网络的多星协作传输关键技术进行了相关研究现状分析, 提出了能够支持多星并发传输并提升传输可靠性的分布式卫星码域协作传输方案, 对探索任务驱动的分布式卫星智能协作传输研究奠定了重要研究基础。

参考文献

- [1] DENG R Q, DI B Y, SONG L Y. Ultra-dense LEO satellite based formation flying [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(5): 3091-3105. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3058370
- [2] MARRERO L M, MERLANO-DUNCAN J C, QUEROL J, et al. Architectures and synchronization techniques for distributed satellite systems: a survey [J]. IEEE access, 2022, 10: 45375-45409. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3169499
- [3] JUNG D H, IM G, RYU J G, et al. Satellite clustering for non-terrestrial networks: concept, architectures, and applications [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2023, 18(3): 29-37. DOI: 10.1109/MVT.2023.3262360

- [4] 董勇, 张治彬, 李新洪, 等. 分布式空间系统研究进展与应用分析 [J]. 无人系统技术, 2020, 3(5): 9-16
- [5] XU L, JIAO J, JIANG S Y, et al. Semantic-aware coordinated transmission in cohesive clustered satellites: utility of information perspective [J]. Science China information sciences, 2024, 67(9): 199301. DOI: 10.1007/s11432-024-4106-5
- [6] 张浙, 郑重, 王英杰, 等. 面向巨型星座网络的多星多波束协作传输方法 [J]. 移动通信, 2023, 47(7): 42-48. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230609-0002
- [7] MA T, QIAN B, QIN X H, et al. Satellite-terrestrial integrated 6G: an ultra-dense LEO networking management architecture [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(1): 62-69. DOI: 10.1109/MWC.011.2200198
- [8] SHI J C, LU A N, ZHONG W, et al. Robust WMMSE precoder with deep learning design for massive MIMO [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(7): 3963-3976. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3269849
- [9] KAMMOUN A, MÜLLER A, BJÖRNSSON E, et al. Linear precoding based on polynomial expansion: large-scale multi-cell MIMO systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2014, 8(5): 861-875. DOI: 10.1109/JSTSP.2014.2322582
- [10] BOROUJERDI M N, HAGHIGHATSHOAR S, CAIRE G. Low-complexity statistically robust precoder/detector computation for massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(10): 6516-6530. DOI: 10.1109/TWC.2018.2860951
- [11] STROHMER T, VERSHYNIN R. A randomized solver for linear systems with exponential convergence [M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 499-507. DOI: 10.1007/11830924_45
- [12] RAO Z G, JIAO J, WANG Y, et al. Code-domain collision resolution grant-free random access for massive access in IoT [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(7): 4611-4624. DOI: 10.1109/TWC.2022.3227569

作者简介



徐亮, 哈尔滨工业大学(深圳)信息科学与技术学院在读博士研究生; 主要研究领域为多星协作传输、大规模接入等; 发表论文4篇。



焦健, 哈尔滨工业大学(深圳)信息科学与技术学院副院长、教授; 主要研究领域为空天通信、无线通信; 先后主持基金项目20余项; 发表论文100余篇。



张钦宇, 哈尔滨工业大学(深圳)副校长、教授, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士, 科技部6G技术研发总体专家组专家, 广东省空天通信与网络技术重点实验室主任; 长期从事智能无线通信、空间信息学和智能信号处理的教学与科研工作; 主持承担国家自然科学基金重点项目、重大研究计划、国家科技重大专项、中国工程院重大咨询项目等30余项, 部分研究成果在国家重大工程中得到应用; 获得国家杰出青年科学基金、国家级人才计划等资助, 并获得深圳市鹏城杰出人才奖、广东省南粤优秀教师等荣誉。