

6G 卫星网络的语义通信架构和编解码研究

吴 琼, 王泽林, 朱 斌, 刘善彬
(中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048)

摘要: 随着 6G 技术向超高速率、极低时延及全域覆盖方向演进, 语义通信作为新一代智能通信范式, 通过深度融合人工智能技术, 可以有效解决传统通信中冗余数据传输、跨系统兼容等问题。语义通信推动网络架构向集中与分布相结合的语义认知架构升级, 通过语义知识库管理实现跨场景的语义互通, 并依托模型、资源及策略管理优化端到端语义传输效率。针对 6G 卫星通信天基资源受限的问题, 研发端到端流式语音编解码器, 构建多模态语义通信测试系统; 并在中星 6D 卫星实验中, 展现出语义通信在卫星及应急场景下的典型应用前景, 为 6G 智能通信网络的构建提供关键技术支撑。

关键词: 语义通信; 6G; 卫星通信

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.tdyt2025066

Research on semantic communication architecture and codec in 6G satellite networks

Wu Qiong, Wang Zelin, Zhu Bin, Liu Shanbin
China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China

Abstract: As 6G technology evolves toward ultra-high speed, extremely low latency and global coverage, semantic communication, as a new generation of intelligent communication paradigm, can effectively address issues such as redundant data transmission and cross-system compatibility in traditional communication through deep integration with artificial intelligence technologies. Semantic communication promotes the evolution of network architecture toward a combined semantic cognitive architecture of centralization and distribution, achieving cross-scenario semantic interoperability through semantic knowledge base management, and optimizing end-to-end semantic transmission efficiency by relying on model, resource, and strategy management. In response to the problem of limited space-based resources in 6G satellite communication, end-to-end streaming speech codec is developed, and a multimodal semantic communication test system is constructed. In experiments of Zhongxing-6D satellite, the breakthrough application prospects of semantic communication in satellite and emergency scenarios were demonstrated, providing key technical support for the construction of 6G intelligent communication networks.

Key words: semantic communication, 6G, satellite communication

0 引言

6G网络预计将实现超高速率、超低时延和海量连接, 面对6G复杂多样的应用需求, 6G网络需要在有限的带宽下准确、清晰地传输语音、视频等各种多媒体业务^[1]。现有通信体制与人工智能的设计范式难以适配, 也不能

灵活应对复杂场景的动态变化需求。尤其在卫星互联网快速发展的背景下, 对网络的智能化水平和资源使用效率提出了更高要求。

1 语义通信应用场景

张平等^[2]提出, 语义通信作为新一代信息处理与通

收稿日期: 2025-12-03; 修回日期: 2026-04-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2022YFB2902503)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2902503)

信范式,以达意传输和交互理解为主要目标,有望显著提升通信效率、增强抗干扰能力、改善用户体验,并解决传统数据传输通信协议中存在的跨系统、跨协议、跨网络、人机不兼容和难以互通等问题,推动通信系统从“高速传输”向“智能传递”转变,其核心应用场景如下。

(1) 物联网 (Internet of things, IoT) 与工业物联网 (industrial Internet of things, IIoT)

在物联网 (尤其是工业物联网) 场景中,大量物联网设备 (如传感器、控制器等) 需要实时传输数据信息,但多数数据存在冗余。对于存在海量重复数据的应用,语义通信可从设备采集的原始数据中提取关键语义 (如关键状态信息)^[3],仅传输这些高价值语义信息,而非连续的原始波形或数值,可以大幅减少数据传输量,节省传输带宽,降低设备能耗。

(2) 车联网与自动驾驶

车联网对低时延、高可靠性要求极高,需实时传输路况信息、碰撞预警、驾驶意图等关键内容。传统车载摄像头、雷达等设备采集的原始数据 (一般为图像) 占用带宽较大,经语义提取后可转化为直观的文字控制类语义信息,直接传输给其他车辆或控制系统^[4]。语义信息更易被接收方理解,可以有效减少误判风险,满足自动驾驶的实时决策需求。

(3) 卫星通信与应急通信

天地一体化是 6G 网络的一个重要特征,卫星通信与地面通信将共同构建空天地一体化通信系统。天基网络的星间链路传输速率为 1~10 Gbit/s,而地面光纤网络的典型传输速率为数百 Gbit/s 量级,最高可达上千 Gbit/s。相对于地面网络,天基的承载侧资源受限,约为地面承载网资源的千分之一,星间链路的传输速率远低于地面光纤传输速率。在卫星通信场景中,语义通信的核心价值是突破资源约束^[5]:针对卫星带宽稀缺问题,可将视频、语音、图片等信息提取为语义 (如应急场景中“灾区位置”“受困人数”等关键文本语义,或视频中“建筑损毁区域”的语义特征),大幅降低传输压力;在应急通信 (如灾害后地面网络瘫痪) 场景中,即使在星上功率不足、信噪比极低的条件下,仍能优先传输核心语义,保障救援指令的有效传递。

2 面向 6G 卫星网络的语义通信架构

为了满足 6G 的服务和网络需求,语义通信这一全新的通信范式通过和人工智能 (AI) 深度融合,将传统的信号提取转变为语义特征的提取、传输和恢复,保证在较小

传输带宽条件下实现语义信息的高效可靠传输。基于语义模型体系的智简网络可实现精准信息提取、按需传输、减少冗余,从而节省带宽、优化资源、提升网络容量。

2.1 分布式语义通信架构

语义认知网络架构需要通过“分布式协同 + AI 驱动”实现语义通信业务功能。面对 6G 空天地一体化网络的多域架构特征,语义网络架构可分为分布式语义处理节点及集中式统一管理平台两部分。分布式语义处理节点纵向可以分为终端、无线接入域 (包含天基接入)、传输域、核心网域 (地面和星上核心网)。在语义认知网络架构中,各域需要引入新的功能模块,实现对语义信息的感知、传输、解析与保障等^[6-10]。

(1) 语义通信统一管理平台

卫星场景下的分布式语义网络架构包括语义通信统一管理平台和各子域的分布式语义处理节点,如图 1 所示。语义通信统一管理平台通过以下 4 个功能模块实现全局智能调度,连接各类终端、系统与场景,承担语义信息的采集、解析、转换、分发与管控职能。

语义知识库管理:主要实现对多模态语义信息的抽取,挖掘实体间的关联关系,提取实体特征,并将抽取结果转换为标准化语义格式,确保信息的跨域互通和互操作性。

语义模型管理:主要实现语义模型的统一管理,构建语义能力的标准化与复用机制,支持模型轻量化部署。

语义计算资源管理:实现对语义通信所需网络侧计算资源的统一管理,根据语义策略实现计算资源的合理分配。

语义策略管理:主要根据场景需求 (如卫星应急通信的“低带宽、高可靠”需求、车联网的“低时延”需求) 动态调整传输策略 (如语义压缩比、优先级调度规则等)。

(2) 分布式语义处理节点

终端侧:须具备语义通信功能,实现语义的提取、压缩与重构。针对不同模态数据 (如视频、图片、语音) 及不同应用场景能够提取对应的表征向量。这些精炼的语义信息被送入信道编码器,后者负责将这些语义信息转换为一种专为无线传输优化的编码形式,以确保信息在传输过程中的高效与稳定。

无线接入域:由于不同场景与环境下的感知数据均可能影响语义理解,因此该域需要支持对用户所处环境、状态信息进行收集,并进行初步的数据预处理 (如数据去重等)。语义感知模块则对上述预处理后的辅助数据进行多维度综合分析、筛选和发送,以帮助接收端用户准确识别语义。在卫星场景下,区别于传统地面网络,需要统筹

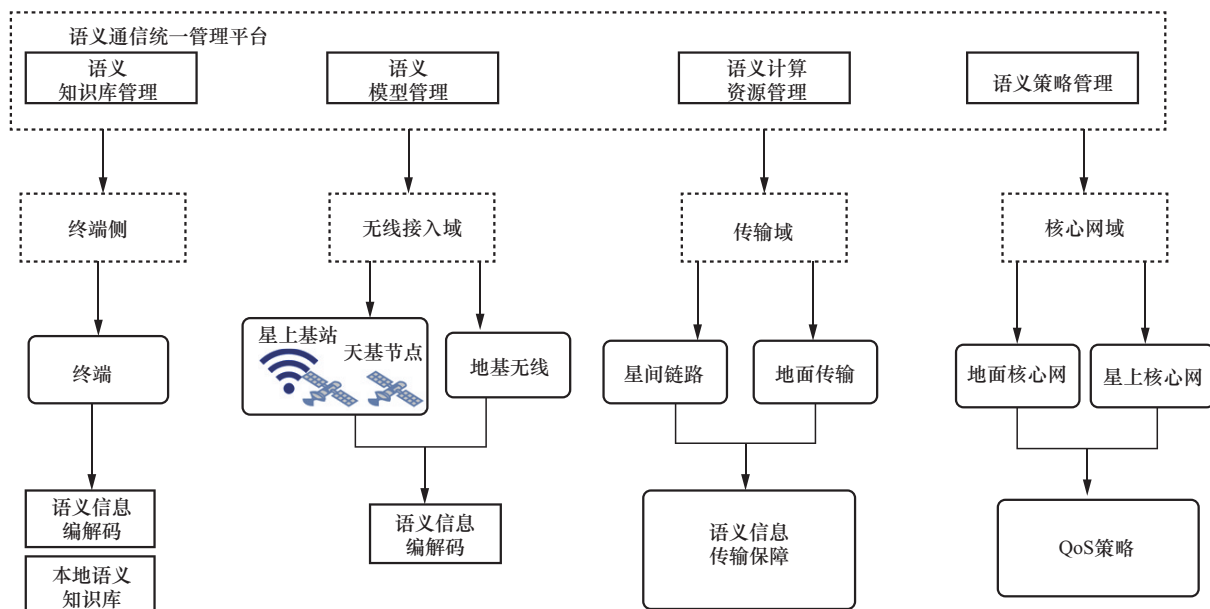


图1 卫星场景下的分布式语义网络架构

考虑卫星节点和地面节点的性能,实现分布式协同部署。

传输域:主要基于AI信道编码实现语义信息和辅助数据的高效传输,保障数据传输的可靠性和及时性。在卫星场景下,星间链路也需要支持基于AI的信道编码。

核心网域:实现对语义通信的管理和控制功能,部署语义模型训练与推理节点,通过算法更新全局语义模型,并向边缘/终端节点提供模型参数,同时提供QoS保障等服务。在卫星场景下,星上核心网也需要具备对语义通信的管控能力。

2.2 分布式语义知识库的构建

构建分层多级语义知识库,旨在将用户数据转化为可识别的语义信息,并将语义信息转化为网络需求,最终映射为对网络资源的计算和编排。为实现性能与实时性的动态平衡,语义知识库采用“云-边-端”3级分层部署架构,通过各层级功能协同与资源优化,构建高效、低时延的知识服务体系。

根据网络节点层级的差异,分布式语义知识库可分为3层:即本地语义知识库、边缘语义知识库和公共语义知识库。

在终端/基站层面,对应的是本地语义知识库,其包含:存储终端类型、用户设备(user equipment, UE)无线能力等信息的终端能力知识库;涉及频率、时间、波束、功率等要素的资源知识库;涵盖图像识别、数据解析等任务的任务知识库;存储实时高精度地图、交通流量等数据的环境知识库;记录电量消耗、网络使用等模式的设备状

态与行为模式知识库。终端节点通过标准化应用程序接口(application programming interface, API)实现与边缘节点或云端节点的灵活对接:对于高频简单查询,优先调用边缘节点服务;对于复杂个性化查询或边缘节点未覆盖的知识请求,则转发至云端获取深度知识支持。终端侧无须存储完整知识库,仅保留必要的交互逻辑与接口适配模块,实现轻量化部署,以适配不同终端设备的硬件资源限制(如手机端的存储与算力约束)。

分布式网络节点对应的是边缘语义知识库,其部署轻量级知识库副本,仅针对终端发起的高频简单查询请求,直接通过边缘节点本地响应,无须回传云端,大幅降低云计算负载与跨网络传输时延,将查询响应时间压缩至毫秒级。

云端网络节点对应的是公共语义知识库,其中包含的算网知识库能够为不同系统数据提供统一的语义模型,对多维度异构资源进行统一描述,并结合网络拓扑形成分布式算网知识库;在云端部署知识库的核心存储节点与大规模计算节点,采用HBase(hadoop database)等分布式数据库存储海量资源描述框架(resource description framework, RDF)格式知识数据,依托其高扩展性与容错性,支撑拍字节(petabyte, PB)级知识数据的稳定存储;同时集成Spark大数据计算框架,专注于离线知识处理任务,如知识推理(基于描述逻辑的本体一致性校验)、关联分析(实体间隐性关系挖掘)等,通过批处理模式提升复杂计算任务的效率,为知识库提供深度知识支撑^[11-15]。

3 面向6G卫星网络的语义通信编解码设计与验证

卫星通信作为6G空天地一体化网络的关键组成部分,面临资源受限、传输能力有限、信道环境恶劣等问题。传统通信方案难以在卫星场景下满足高效通信需求,而语义通信通过AI驱动的语义提取与优先级传输,可突破这些限制,提升业务服务质量。本文针对基于语音的语义通信系统,在实际卫星场景下开展双机通信性能和降噪性能测试,受卫星环境和网络设备的功能限制,本次只对终端支持的基于AI的语义编解码^[16]进行功能验证。

3.1 设计原理

本语义通信测试系统是一款端到端的流式语音编解码器,通过AI技术实现全链路智能化,流式语音编解码器架构如图2所示,主要由编码器,发送器,接收器和解码器构成^[17-19]。

3.1.1 语义编解码

系统采用预训练的Encodec作为编解码器,并使用ONNX Runtime进行部署。编码器将语音信号压缩为离散表示,减小占用空间,从而以较低的码率实现信息传输;发送器将编码器输出数据打包为二进制格式的网络数据包,通过网络传输至接收器;接收器完成数据解析后,由解码器将数据恢复为音频信号。在编码设计中引入无速率特性,通过迁移学习与模态转换机制,设计支持任务模态自适应、信道状态自适应的语义编码方案,提升语义编码的灵活性和语义通信部署的可行性,在任务模态多样,信道状态未知的场景下有效提高频谱效率。

3.1.2 语义特征提取与恢复

语音语义特征提取与恢复模块融合先进深度学习技术和短时平稳信号处理方法,其核心目标在于高效、精准地处理和分析语音数据中的语义信息。该模块以深度学习技术为基础,通过模拟人脑神经网络结构学习和识别数据特征。在大量语音样本的训练下,深度学习模型能够捕捉语音信号中复杂且微妙的特征模式,为后续的

语义理解和信息恢复提供关键支撑。

短时平稳信号处理方法则是处理语音这类非平稳信号的有效手段。该方法将语音信号划分为一系列短时片段,并假设各片段内的信号是平稳的,从而利用信号处理工具进行分析。该方法不仅有助于降低计算复杂度,还能更精准地捕捉语音信号中的瞬时变化,为语音语义特征的精确提取奠定基础。

在特征提取阶段,模块利用深度神经网络(deep neural network, DNN)对语音信号进行建模,模型能够自动学习并提取对语义理解具有重要价值的特征,形成语义层面的稀疏信息,其中包括音高、语速、语调及时序相关性等信息。这一过程具备高度自动化和智能化特点,同时保证特征提取的准确性和鲁棒性,以应对不同背景噪声、说话人差异等复杂环境因素的影响。

为提升通信效率,发送端结合接收端的通信任务需求,利用DNN对语音语义特征进行稀疏提取,通过端到端AI技术,系统能够智能选择并传输对接收端理解最为关键的信息,同时减少不必要的数据传输,从而有效降低传输符号的数量,提升通信的带宽利用率和系统实时性。

在接收端,模块同样采用DNN对接收的语义特征进行高质量重构与恢复。这一过程不仅要求保证语义信息与原始信息高度一致,还能有效抑制数据传输过程中可能引入的噪声和失真。通过精细化模型设计和训练,接收端DNN能够准确解析语音中的语义内容,为用户提供清晰、流畅的语音通信体验。

3.2 效果验证

测试中,两台个人计算机(PC)通过卫星无线互联:其中一台在机房通过端口连接,另一台部署在应急通信车上,双方均搭载语义通信系统。应急通信车上存在发电机和空调运行噪声。本次测试的收发端均采用低密度奇偶校验码(low-density parity-check code, LDPC)对信道进行编码,8PSK调制采用3/4码率,实现了每秒3 750 bit的低带宽传输,信道时延是600 ms(卫星收发器如图3所示)。

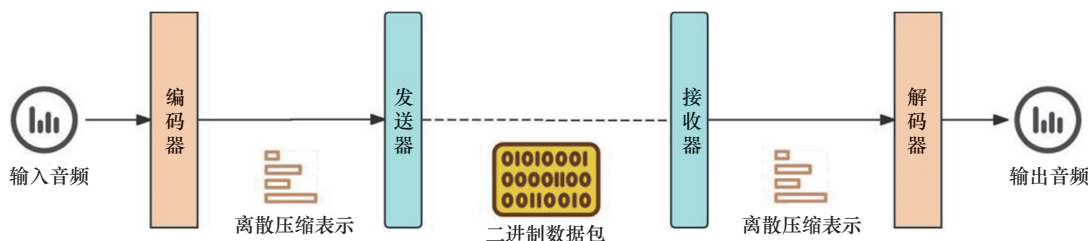


图2 流式语音编解码器架构



图3 卫星收发器

语义通信技术在中星6D卫星通话试验中取得成功,实现了双机高清语音通信。在发射功率降至约 -20.5 dB、信噪比约 6.5 dB的极限条件下,依然保持稳定通信,可有效抑制背景噪声,展现出语义通信技术的突破性应用前景。测试结果表明,该语义通信系统在卫星网络通信时,无论有无噪声环境,都能保证语音的清晰度和流畅度,且能在较小带宽占用下实现高清通话。

3.3 与传统编解码方法的对比分析

传统编码方法仅在信号层面进行冗余控制与纠错设计,其核心目标是保证“比特级传输的准确性”,不涉及对信息内容的语义解析。本次测试系统通过语义通信框架,先对语音信号进行语义提取(如分离关键指令与环境噪声语义),再结合LDPC码传输,本质上实现了“语义优先级引导的信道资源分配”——即使在 $3\,750$ bit/s的低带宽下,也能优先保障核心语义的传输完整性,具备传统编码方法无法实现的“内容感知”能力。

传统编码方法需分配部分带宽用于非语义冗余(如校验位),实际可承载的有效信息速率更低,在带宽受限的情况下,往往由带宽不足导致音质严重劣化,甚至丢失关键信息。本次方案通过语义压缩,去除语音中与应急通信无关的冗余语义,在相同码率下可提升有效语义的传输密度。同时,在低带宽、高噪声、固定时延的卫星应急场景中,“语义优先”的传输逻辑突破了传统编码“仅关注信号完整性而忽略内容价值”的局限,更能满足应急通信“核心信息优先送达”的实际需求。

4 结束语

随着网络技术的飞速发展与业务形态的创新演进,语义通信作为一种聚焦信息本质的智能传输范式,正逐渐在更广阔的领域展现出巨大应用潜力。然而,当前相关研究仍处于探索阶段:一方面,实验验证场景较为有

限,仅在终端侧完成了针对语音业务的语义通信效果的初步技术验证;另一方面,端到端的完整架构尚未实现系统性验证,知识库的搭建尚处于理论研究阶段,技术闭环仍有待构建。随着研究的持续深入,语义通信的理论体系将不断夯实,核心实现技术也将逐步走向成熟。尤为重要的是,它将与人工智能、6G、物联网等新兴技术深度融合,为未来通信技术的创新突破与场景落地带来广阔空间,为千行百业的智能化转型注入新动力。

参考文献

- [1] Letaief K B, Chen W, Shi Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(8): 84-90.
- [2] 张平,牛凯,姚圣时,等.面向未来的语义通信:基本原理与实现方法[J].通信学报,2023,44(5):1-14.
Zhang P, Niu K, Yao S S, et al. Semantic communication for the future: fundamental principles and implementation methods[J]. Journal on Communications, 2023, 44(5): 1-14.
- [3] 石光明,肖泳,李莹玉,等.面向万物智联的语义通信网络[J].物联网学报,2021,5(2):26-36.
Shi G M, Xiao Y, Li Y Y, et al. Semantic communication networks for the Internet of everything with intelligence[J]. Chinese Journal of Internet of Things, 2021, 5(2): 26-36.
- [4] Xie H Q, Qin Z J. A lite distributed semantic communication system for Internet of things[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(1): 142-153.
- [5] 黄靖洪,孙梦颖,韩书君,等.面向6G卫星通信的语义通信技术展望[J].中兴通讯技术,2024,30(5):3-8.
Huang J H, Sun M Y, Han S J, et al. Outlook on semantic communication technologies for 6G satellite communications[J]. ZTE Communications, 2024, 30(5): 3-8.
- [6] 傅宇舟,程文驰,陈小军,等.面向6G网络的基于语义通信的端到端服务框架[J].移动通信,2023(6):35-40.

- Fu Y Z, Cheng W C, Chen X J, et al. End-to-end service framework based on semantic communication for 6G networks[J]. Mobile Communications, 2023(6): 35-40.
- [7] 朱慧翔, 柴靖轩, 肖泳, 等. 基于感算通融合的语义认知通信网络[J]. 移动通信, 2023(3):31-39.
- Zhu H X, Chai J X, Xiao Y, et al. Semantic cognitive communication network based on perception-computation-communication integration[J]. Mobile Communications, 2023(3): 31-39.
- [8] ITU-T. Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020: Recommendation ITU-T Y.3172[S]. 2019.
- [9] 张亦弛, 张平, 魏急波, 等. 面向智能体的语义通信: 架构与范例[J]. 中国科学:信息科学, 2022,52(5):907-921.
- Zhang Y C, Zhang P, Wei J B, et al. Semantic communication for intelligent devices: architectures and a paradigm[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2022, 52(5): 907-921.
- [10] 陈曙东, 李伟炜, 杜蓉, 等. 一种支持语义解析的智能通信服务网络架构[J]. 无线电通信技术, 2022,48(4):614-622.
- Chen S D, Li W W, Du R, et al. An intelligent communication service network architecture supporting semantic parsing[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(4): 614-622.
- [11] Xiao Y, Shi G M, Li Y Y, et al. Toward self-learning edge intelligence in 6G[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(12): 34-40.
- [12] 杨定熹, 黄印桓, 应憬恺, 等. 算力网络驱动的语义通信[J]. 移动通信, 2024(7):101-108.
- Yang D X, Huang Y H, Ying J K, et al. Semantic communication driven by computing power network[J]. Mobile Communications, 2024(7): 101-108.
- [13] 李文璟, 喻鹏, 张平. 6G 智能内生网络架构及关键技术分析[J]. 中兴通讯技术, 2023,29(5):2-8.
- Li W J, Yu P, Zhang P. Architecture and key technologies of 6G intelligent native network[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(5): 2-8.
- [14] Jankowski M, Gündüz D, Mikolajczyk K. Wireless image retrieval at the edge[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(1): 89-100.
- [15] Lokumarambage M U, Gowrisetty V S S, Rezaei H, et al. Wireless end-to-end image transmission system using semantic communications[J]. IEEE Access, 2023, 11: 37149-37163.
- [16] 陈鸣锴, 柳明浩, 王文俊, 等. 面向6G的跨模态语义编解码技术[J]. 信号处理, 2023,39(7):1141-1154.
- Chen M K, Liu M H, Wang W J, et al. Cross-modal semantic communication technology for 6G[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(7): 1141-1154.
- [17] Patel M I, Suthar S, Thakar J. Survey on image compression using machine learning and deep learning[C]//Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICCS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1103-1105.
- [18] Rezaei H, Rajatheva N, Latva-aho M. A combinational multi-kernel decoder for polar codes[PP]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2211.08778.
- [19] Rezaei H, Rajatheva N, Latva-aho M. High-throughput rate-flexible combinational decoders for multi-kernel polar codes[PP]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2301.10445.

[作者简介]



吴琼 (1983—), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为6G、空天地一体化关键技术及创新业务。



王泽林 (1983—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为空地一体化关键技术、激光通信及创新业务。



朱斌 (1980—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为5G网络能力开放、天地一体化新技术跟踪及创新业务产品研究。



刘善彬 (1982—), 男, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为网络能力开放、天地一体化新技术跟踪研究及产品创新。