中文核心期刊　中国科技核心期刊　中国核心学术期刊
第三届国家期刊奖百种重点期刊　信息通信领域产学研合作特色期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

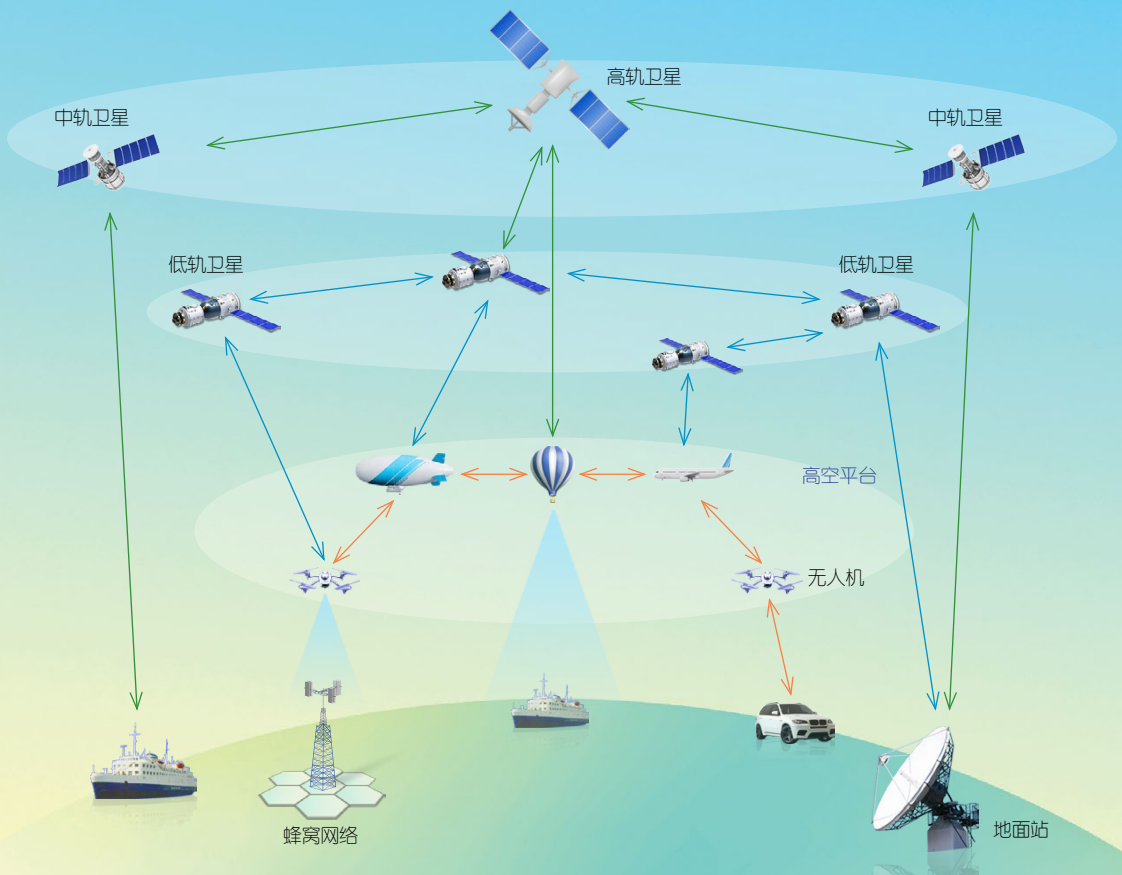
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

http://tech.zte.com.cn

第 30 卷 · 总第 179 期 · 2024 年 10 月 · 第 5 期

专题：卫星通信技术



（封面图片详解见 P56）

ISSN 1009-6868
9 771009 686243 10>

《中兴通讯技术》第 10 届编辑委员会

顾　问　**侯为贵**（中兴通讯股份有限公司创始人）　**钟义信**（北京邮电大学教授）
陈锡生（南京邮电大学教授）　**糜正琨**（南京邮电大学教授）

主　任　**陆建华**（中国科学院院士）

副主任　**李自学**（中兴通讯股份有限公司董事长）　**李建东**（西安电子科技大学教授）

编　委

陈建平　上海交通大学教授
陈前斌　重庆邮电大学教授、副校长
段晓东　中国移动研究院副院长
葛建华　西安电子科技大学教授
管海兵　上海交通大学教授、副校长
郭　庆　哈尔滨工业大学教授
洪　伟　东南大学教授
江　涛　华中科技大学教授
蒋林涛　中国信息通信研究院科技委主任
金　石　东南大学首席教授、副校长
李尔平　浙江大学教授
李红滨　北京大学教授
李厚强　中国科学技术大学教授
李建东　西安电子科技大学教授
李乐民　中国工程院院士、电子科技大学教授
李融林　华南理工大学教授
李自学　中兴通讯股份有限公司董事长
林晓东　中兴通讯股份有限公司副总裁
刘　健　中兴通讯股份有限公司高级副总裁
刘建伟　北京航空航天大学教授
隆克平　北京科技大学教授
卢光跃　西安邮电大学教授、校长
陆建华　中国科学院院士、清华大学教授
马建国　中原工学院教授、学术副校长
毛军发　中国科学院院士、深圳大学校长
孟洛明　北京邮电大学教授
尼玛扎西　中国工程院院士、西藏大学教授
石光明　鹏城实验室副主任
史振威　内蒙古大学教授
孙知信　南京邮电大学教授
谈振辉　北京交通大学教授
唐　宏　中国电信 IP 领域首席专家
唐万斌　电子科技大学教授
唐雄燕　中国联通研究院副院长
陶小峰　北京邮电大学教授
汪烈军　新疆大学教授、副校长
王　翔　中兴通讯股份有限公司高级副总裁
王文博　北京邮电大学教授、副校长
王文东　北京邮电大学教授
王喜瑜　中兴通讯股份有限公司执行副总裁
王耀南　中国工程院院士、湖南大学教授
王志勤　中国信息通信研究院副院长
卫　国　中国科学技术大学教授
邬贺铨　中国工程院院士
吴春明　浙江大学教授
向际鹰　中兴通讯股份有限公司首席科学家
肖　甫　南京邮电大学教授、副校长
解冲锋　中国电信研究院教授级高工
徐安士　北京大学教授
徐子阳　中兴通讯股份有限公司总裁
续合元　中国信息通信研究院首席专家
薛向阳　复旦大学教授
杨义先　北京邮电大学教授
易芝玲　中国移动研究院首席科学家
张　杰　北京邮电大学教授
张　平　中国工程院院士、北京邮电大学教授
张　卫　复旦大学教授
张宏科　中国工程院院士、北京交通大学教授
张钦宇　哈尔滨工业大学（深圳）教授、副校长
张云勇　中国联通云南分公司总经理
赵慧玲　工业和信息化部信息通信科技委常委
郑纬民　中国工程院院士、清华大学教授
钟章队　北京交通大学教授
周　亮　南京邮电大学教授、副校长
朱近康　中国科学技术大学教授
祝宁华　中国科学院院士、雄安创新研究院院长

目　次

中兴通讯技术（ZHONGXING TONGXUN JISHU）
第 30 卷　总第 179 期　2024 年 10 月　第 5 期

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国核心学术期刊 第三届国家期刊奖百种重点期刊 信息通信领域产学研合作特色期刊 1995 年创刊

热点专题 ▶

卫星通信技术

01 专题导读 …… 张钦宇

03 面向6G卫星通信的语义通信技术展望 …… 黄靖洪，孙梦颖，韩书君，许晓东

09 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术 …… 窦成龙，吴远，钱丽萍，Tony Q. S. QUEK

16 面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术 …… 杨帅斌，张昱，卢为党

24 分布式卫星码域协作传输技术 …… 徐亮，焦健，张钦宇

30 面向星地通信的低复杂度通用编译码技术 …… 张可，林文超，王野

41 基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知方法 …… 侯彦鹏，马嫄，张行健

48 一种基于OTFS调制的卫星车联网系统与性能评估 …… 马瞻希，薛鉴哲，周海波

55 卫星隐蔽通信技术综述 …… 邓娜，邢成文，赵楠

专家论坛 ▶

68 低轨卫星网络接入与传输技术 …… 申佳伟，洪涛，张更新

企业视界 ▶

75 5G电源模组高精度3D结构光测量技术 …… 邓芳伟，黄石军

技术广角 ▶

81 基于分层自编码器的异常网络流量检测 …… 张晓青，谷勇浩，田甜

综合信息 ▶

02 《中兴通讯技术》2025年专题计划

《中兴通讯技术》2024年热点专题名称及策划人

1. 下一代多址技术
北京交通大学教授 艾渤
北京交通大学教授 陈为

2. 网络大模型
中国电信IP领域首席专家 唐宏
中兴通讯无线首席架构师 熊先奎

3. 6G多天线技术
东南大学首席教授 金石
北京交通大学教授 章嘉懿
东南大学副研究员 韩瑜

4. 6G无线系统技术
中国信息通信研究院副院长 王志勤
中国移动研究院院长 黄宇红
东南大学教授 王东明

5. 卫星通信技术
哈尔滨工业大学(深圳)教授 张钦宇

6. 数据通信新技术
中国电信研究院教授级高工 解冲锋
中国联通研究院首席科学家 唐雄燕

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL
Oct. 2024 Vol. 30 No. 5

Special Topic ▶

Satellite Communication Technology

01 Editorial ····· ZHANG Qinyu

03 Prospects of Semantic Communication Technology for 6G Satellite Communication ····· HUANG Jinghong, SUN Mengying, HAN Shujun, XU Xiaodong

09 Communication, Sensing and Computing Integration Empowered LEO Satellite Constellation Networks: Architecture and Key Technologies ····· DOU Chenglong, WU Yuan, QIAN Liping, Tony Q. S. QUEK

16 Satellite Integrated Sensing and Communication Network for 6G and Its Key Technologies ····· YANG Shuaibin, ZHANG Yu, LU Weidang

24 Code-Domain Cooperative Transmission Technology for Cohesive Clustered Satellites ····· XU Liang, JIAO Jian, ZHANG Qinyu

30 Low-Complexity and Universal Channel Encoding/Decoding Technology for Satellite-to-Ground Communications ····· ZHANG Ke, LIN Wenchao, WANG Ye

41 Multi-Satellite Collaborative Compressive Sensing Method Based on Walk-Incremental Strategy ····· HOU Yanpeng, MA Yuan, ZHANG Xingjian

48 A Satellite-Based IoV System and Performance Evaluation with OTFS Modulation ····· MA Zhanxi, XUE Jianzhe, ZHOU Haibo

55 A Review of Satellite Covert Communication Technologies ····· DENG Na, XING Chengwen, ZHAO Nan

Expert Forum ▶

68 Access and Transmission Technology for LEO Satellite Networks ····· SHEN Jiawei, HONG Tao, ZHANG Gengxin

Enterprise View ▶

75 High-Precision 3D Structure Optical Measurement Technology for 5G Power Modules ····· DENG Fangwei, HUANG Shijun

Research Paper ▶

81 Malicious Network Traffic Detection Based on Hierarchical Autoencoder ····· ZHANG Xiaoqing, GU Yonghao, TIAN Tian

期刊基本参数：CN 34-1228/TN*1995*b*16*86*zh*P*¥20.00*6500*12*2024-10

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权，包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权，所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。
未经本刊许可，不得以任何形式全文转载本刊内容；如部分引用本刊内容，须注明该内容出自本刊。

卫星通信技术专题导读

专题策划人



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项目、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。

随着全球信息化进程的加速推进，卫星通信作为现代通信体系中的重要组成部分，正迎来前所未有的变革机遇。传统的卫星通信技术受限于硬件设施和技术瓶颈，往往存在着带宽不足、延迟较高以及覆盖范围有限等问题。随着新一代卫星技术的突破，如低轨卫星星座的部署、高频段通信技术的运用以及智能化网络管理的提升，卫星通信正逐步从“有限连接”向“泛在互联”跨越。尽管当前卫星通信技术已经取得显著进展，但仍面临诸多技术挑战，例如信号传输延迟、频谱资源有限、卫星间协同作业难度大等。这些挑战限制了卫星通信系统性能的进一步提升，尤其是在面对未来6G通信需求时，如何实现更低的延迟、更高的带宽利用率以及更强的安全保障成为了亟待解决的关键技术难题。

本期以“卫星通信技术”为主题，汇集了一系列前沿研究，邀请该领域的专家学者撰写了9篇文章。这些文章介绍并分析了当前卫星通信技术的最新关键进展，并对存在问题和具体的解决方案进行了深入讨论，旨在探索卫星通信技术的新突破，为卫星信息系统的未来发展提供有益借鉴。

《面向6G卫星通信的语义通信技术展望》探讨了基于语义通信的卫星通信系统的链路结构，拓展了面向星地传输的语义通信的高效信息提取和可靠信息恢复方案，并研究了基于语义通信的卫星中继方案的传输性能。《通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术》聚焦通信、感知和计算的深度融合，深入分析了通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术，以及其面临的未来挑战与发展前景。《面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术》详细分析了卫星通感一体化网络架构，讨论了卫星通信感知一体化的关键技术，具体包括通感波束形成、通感波形设计、星间链路技术、星上处理技术和卫星天线技术。《分布式卫星码域协作传输技术》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，深入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。《面向星地通信的低复杂度通用编译码技术》提出了一种适用于任意短线性分组码的新型译码思想，即基于翻转重量的阶序统计译码（FWB-OSD），并针对3GPP标准低密度奇偶校验（LDPC）码的速率兼容编码方案，提出了一种将迭代译码算法与FWB-OSD进行级联的译码算法，该算法在短码长LDPC编码方案下能够展现更优的译码性能。《基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知方法》针对传统集中式协作星间传输负载高以及中心节点故障对频谱监测的影响，提出了一种在轨组阵压缩感知方法，并基于低轨星座多重覆盖观测的互补性优势，运用多星在轨

DOI：10.12142/ZTETJ.202405001
收稿日期：2024-09-26

协作优化提高了低信噪比下的频谱感知性能。《一种基于OTFS调制的卫星车联网系统与性能评估》详细分析了卫星车联网（SIoV）场景的现状及星地信号传播所遇到的问题，研究利用正交时频空（OTFS）调制技术，设计并评估了基于SIoV传播信道的系统性能。《卫星隐蔽通信技术综述》对卫星通信网络的隐蔽通信技术进行了系统综述，全面介绍了卫星通信网络架构、卫星隐蔽通信典型场景、隐蔽通信的基本模型，以及卫星通信网络模型和性能指标，分别从信息编码、波形设计和传输策略等方面回顾了现有隐蔽通信技术研究的最新进展，并展望了卫星隐蔽通信技术的若干未来研究方向。《低轨卫星网络接入与传输技术》针对低轨卫星网络空口传输特征，在地面5G NR体制的基础上利用智能化网络与轻量化终端间的协同，实现了用户的广域无感接入与适变传输，并认为需要采用内生智能的方法辅助空口设计，从空口赋能AI和AI辅助空口两个方面构建完整闭环的研究体系。

本期的作者来自知名高校与科研机构，面向卫星通信技术，从核心挑战、关键技术、新型应用等方面介绍了最新的研究成果。期待这些高质量的研究成果能够为未来的卫星通信技术的发展提供有益的参考和启示，并在此对所有作者和审稿专家的大力支持表示由衷的感谢！

2024年9月25日

综合信息

《中兴通讯技术》2025年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	6G立体覆盖技术	李建东　西安电子科技大学教授 刘俊宇　西安电子科技大学教授
2	智算网络	段晓东　中国移动研究院副院长 李　丹　清华大学教授 虞红芳　电子科技大学教授
3	6G网络安全	刘建伟　北京航空航天大学教授 王景璟　北京航空航天大学教授
4	面向6G的高时效智能机器通信技术	张　平　中国工程院院士、北京邮电大学教授 秦晓琦　北京邮电大学副教授
5	网络中的AI技术	解冲锋　中国电信研究院教授级高工 孟洛明　北京邮电大学教授 崔　勇　清华大学教授
6	新一代光传输技术	陈建平　上海交通大学教授 唐雄燕　中国联通研究院副院长

面向6G卫星通信的语义通信技术展望

Prospects of Semantic Communication Technology for 6G Satellite Communication

黄靖洪/HUANG Jinghong，孙梦颖/SUN Mengying，
韩书君/HAN Shujun，许晓东/XU Xiaodong

（北京邮电大学，中国 北京 100876）
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405002
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241013.1135.002.html
网络出版日期：2024-10-14
收稿日期：2024-08-15

摘要：针对6G星地覆盖场景高动态、远距离、时变、资源有限等受限传输条件，实现基于语义通信的信息高效提取、信息可靠恢复及网络无缝覆盖扩展是有效路径。探讨了基于语义通信的卫星通信系统的链路结构，拓展了面向星地传输的语义通信的高效信息提取和可靠信息恢复方案，以增强星地传输能力，并研究了基于语义通信的卫星中继方案的传输性能。认为未来应积极研究语义通信基础理论及关键技术，深挖语义通信对面向6G卫星通信的支撑作用，使基于语义通信的6G卫星通信系统赋能更多应用场景。

关键词：卫星通信；语义通信；语义中继；语义提取；覆盖扩展

Abstract: Given the highly dynamic, long-distance, time-varying, and resource-constrained transmission conditions in 6G satellite-terrestrial coverage scenarios, the efficient extraction of information, reliable information recovery, and effective network coverage extension based on semantic communication offer viable solutions. The link structure of satellite communication systems based on semantic communication is discussed. The efficient information extraction and reliable information recovery schemes for satellite-terrestrial transmission based on semantic communication are expanded to enhance transmission capabilities. The transmission performance of satellite relay schemes based on semantic communication is also investigated. We believe that future efforts should actively focus on studying the fundamental theories and key technologies of semantic communication, deeply exploring its supporting role in 6G satellite communications to empower more application scenarios for 6G satellite communication systems based on semantic communication.

Keywords: satellite communication; semantic communication; semantic relay; semantic extraction; coverage extension

引用格式：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. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405002

Citation: HUANG J H, SUN M Y, HAN S J, et al. Prospects of semantic communication technology for 6G satellite communication [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 3-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405002

1 基于语义通信的卫星通信系统

中国“十四五”数字经济发展规划指出，构建全球覆盖、高效运行的通信、遥感、导航空间基础设施体系，加快中国数字经济发展。作为支撑网络强国、数字经济和双循环战略的关键新型基础设施，未来6G网络需要实现全域覆盖、高带宽、低延时和高可靠通信[1]。由于卫星信道的独特性，卫星通信与地面网络有显著的区别，包括卫星与地面设备之间距离较远导致信号严重衰减和长时间延迟，以及强大的视距信道特性，如路径损耗、大气衰减和雨衰。此外，卫星信道中还存在高多普勒频移和同频干扰[2]。受香农定理的限制，以上问题难以通过现有的卫星通信范式解决。

为了实现6G“泛在连接”愿景，面向6G的卫星通信需要满足激增的服务与覆盖需求，这进一步推动了卫星通信技术与人工智能（AI）的深度融合。语义通信是一种全新的通信范式，借助人工智能与通信融合，通过将任务需求与信息

基金项目：北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金重点项目（L242012）；国家自然科学基金项目（62401074）

传输有机映射，可以大幅度提升通信效率，缓解卫星通信系统的频谱稀缺问题，改善用户的业务体验[3]。依托智能与通信、网络等技术的深度融合，通过语义特征提取、语义信息传输以及语义信息恢复，可以保证恶劣卫星信道环境下的服务质量以及对信道的鲁棒性。同时，传统的通信系统关注信道容量、误码率和中断概率等与数据内容无关的指标，而语义通信关注数据的内容以及含义，并根据不同的数据类型定制不同的性能指标，例如针对文本的语句相似度、针对图像的峰值信噪比和结构相似性指标以及针对语音数据的失真率等[4]，从而满足6G多样化任务需求。因此，语义通信被认为是有竞争力的6G候选技术，可有效赋能6G卫星通信。

得益于语义通信的高效信息处理与抗干扰能力以及卫星通信的广域覆盖，基于语义的卫星通信在诸多应用中表现出巨大潜力，如海事通信、物联网、遥感图像传输等。

1.1 研究现状分析

近年来，以深度学习为代表的人工智能技术在语义信息提取方面已取得了一定的进展。斯坦福大学的学者率先设计了一个面向文本的传输语义通信系统，采用可用于提取语义信息的预训练查找表[5]把单词表征为嵌入向量[6]。伦敦玛丽女王大学的学者提出了基于Transformer的语义通信系统，可以有效地从文本中提取语义信息，并且对噪声具有鲁棒性[7]。北京邮电大学的学者从语义角度以模型方式将信源高维度信息提取，进而构建针对多模态信源和信道特征的模型信息空间，根据语义信息特征实现用户区分，并在语义通信原型系统上进行了实验验证[8-9]。

信源信道联合编码（JSCC）是语义通信的关键技术之一，比独立的信源编码和信道编码方案更好。帝国理工大学的学者通过基于深度学习的JSCC（DeepJSCC）方法，从训练数据中提取复杂语义特征，同时将信道特征隐式地纳入其编码中。该方法表现出优越的语义表征性能[10-12]。目前大部分研究建立在卷积神经网络的基础上，而卷积神经网络在捕获全局依赖关系方面效率低下。有学者提出采用Swin Transformer的模型来提取语义特征信息，针对图像传输进行了高效优化[13]。

通过生成上下文敏感、适应性强且语义密集的内容，生成式人工智能（GAI）极大地增强了语义通信有效传输信息的能力。此外，面对卫星通信的高动态、时变信道环境，GAI可用于不断完善语义知识库和学习模型，保证语义通信系统能够观察网络环境并适应不断变化的动态网络条件。新加坡南洋理工大学的学者提出了一种GAI辅助的语义通信框架，无需联合训练，与传统的语义通信方法相比，可以降低计算复杂性和能源成本[14]。东南大学的学者利用基于生成模型的语义分割和重建来提取语义特征，显著降低带宽需求[2]。

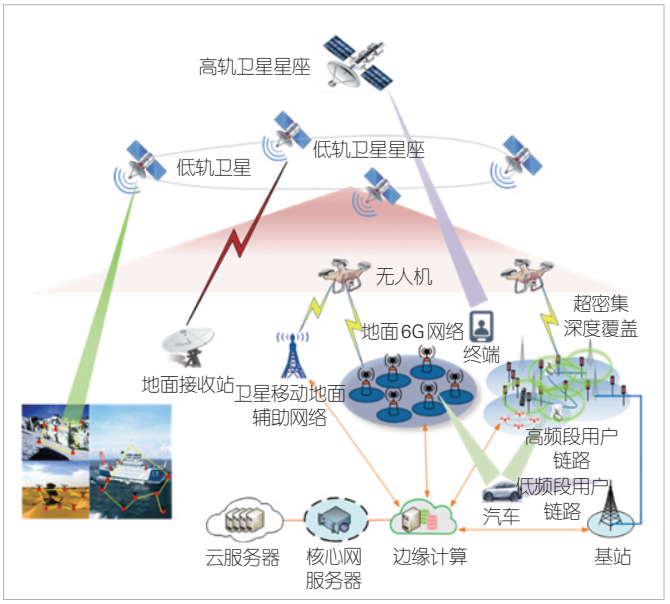
为应对无线信道中常见的信噪比（SNR）波动和噪声问题，北京邮电大学学者提出了一种基于潜在语义扩散模型的信道自适应去噪语义通信系统[15]。鹏城实验室的学者研究了基于语义知识库的多层级语义编码和传输机制，分别在视觉特征空间、语义特征空间、潜在特征空间进行类别判决，自适应地实现多层级传输与信道状态的智能适配[16]。

总的来说，在面向6G卫星通信场景下，如何针对高动态、不稳定信道，利用有限的通信带宽和能量，对多类型数据（如图像、视频、传感器数据等）进行语义融合提取与表征、高效传输以及可靠恢复，仍有待进一步研究。

1.2 基于语义通信的卫星通信系统的需求与挑战

如图1所示，卫星通信被视为6G空天地立体覆盖的重要组成部分，但由于卫星通信存在高衰落、长时延的问题，目前的基于语义的卫星通信在高效信息提取、可靠信息恢复及覆盖广度扩展3个方面面临诸多挑战。

首先，现有的卫星系统在资源和环境约束下所映射的信息提取与传输能力不足。节点的频繁移动和位置变化导致信道状态难以有效预测和稳定估计，现有的信号处理方法无法适应这种高频率变化。远距离传输增加了信号衰减和多径效应的可能性，使得在有限带宽和能量资源下提取关键信息变得更加复杂和重要。因此，如何针对高动态、不稳定信道，利用有限的通信带宽和能量，对多类型数据（如图像、视



▲图1 6G空天地立体覆盖场景

频、传感器数据等）进行语义融合提取与表征，高效传输，仍有待进一步研究。

其次，可靠信息恢复在受限的传输条件下面临严峻考验。高动态和时变环境中的信号容易受到干扰和噪声影响，导致信息丢失或失真，现有的纠错和信道编码技术难以满足6G卫星通信环境下的需求。远距离传输中的信号衰减和误码风险增加了信息可靠恢复的难度，需要在高度不确定的环境中保证信息的准确性和完整性。

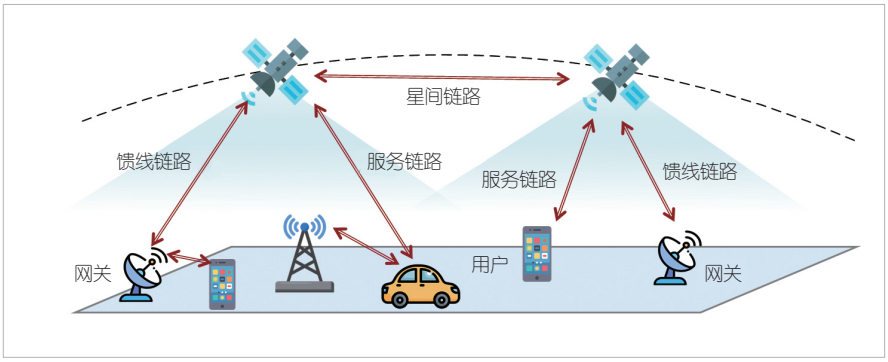
最后，在资源受限和动态变化的环境下的覆盖广度扩展问题也急需有效的解决方案。现有的固定基站架构和静态资源分配策略难以满足6G广域覆盖的需求，高度动态的节点移动和位置变化要求网络能够灵活调整覆盖范围和资源分配。同时，有限的频谱资源和能量约束使得实现广域覆盖更加复杂，频谱共享和能量管理在多网络环境中的协调难度增加。

综合来看，面向6G空天地立体覆盖的基于语义的卫星通信系统在高效信息提取、可靠信息恢复和覆盖广度扩展方面，将面临动态环境、远距离传输和资源有限等多重技术挑战。

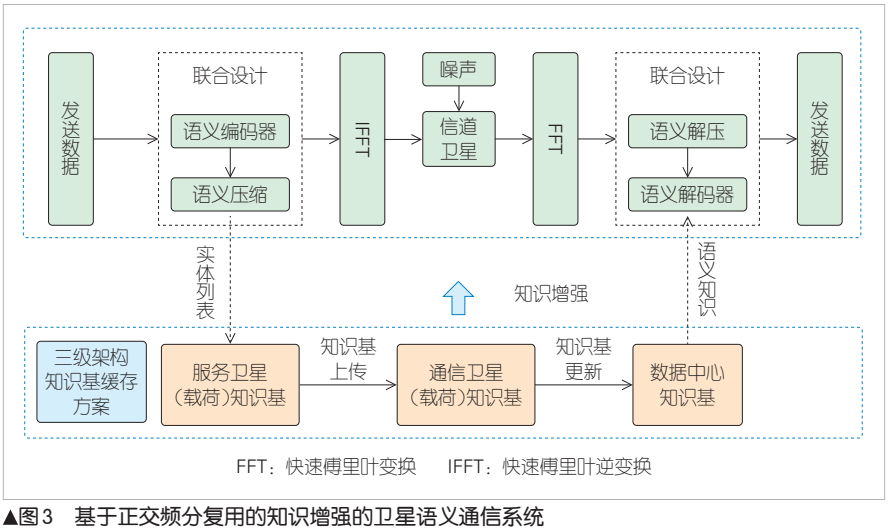
1.3 基于语义通信的卫星通信系统的链路结构

与传统的端到端语义通信模型不同，基于语义的卫星通信架构主要考虑3种不同类型的链路，包括卫星与用户间的服务链路、卫星与网关间的馈线链路以及卫星之间的星间链路，如图2所示。其中，服务链路处理业务数据的传输，馈线链路将网关连接到卫星促进卫星与核心网之间的交互，星间链路管理卫星服务之间的切换和协同控制。

受到传统通信中利用边缘缓存提升通信性能的启示，我们采用服务卫星（载荷）–通信卫星（载荷）–数据中心三级架构进行语义知识基的缓存，并构建了基于正交频分复用（OFDM）的知识增强卫星语义通信系统，如图3所示。借助深度学习技术实现语义编码，可在进一步高效压缩的同时，降低系统的总体复杂性。首先，发送方对服务数据进行实体识别，生成实体列表，接着利用神经网络模型将服务数据转换为语义向量，经过维度压缩处理后得到语义符号。根据发射器生成的实体列表，服务卫星知识基查询相应语义知识，并定义一个语义导频，作为当前知识基版本号和语义标签的组合。服务卫星会记录每个服务任务的请求频率，并根据记录的频率向通信卫星请求相应的知识图谱。将浮点型符号成对组合，转化为复数符号，并利用OFDM技术直接执行快速傅里叶逆变换（IFFT），将复杂符号转换为时域符号。为确保接收方能成功解码，拟借鉴梳状导频方法指定符号长度，并在每个符号开头插入语义导频。所有语义符号将以浮点型传输，实现直接通信。而传统信道导频符号则通过传统二进制位通信方法发送，在经过信道编码、调制等处理后，传统导频符号被转化为浮点型，与语义符号和语义导频叠加一起传输。最后，将包含语义向量、语义导频和信道导频的串行数据流通过IFFT变换为时域符号，通过无线信道传输。在接收端，对同步后接收到的OFDM符号流进行快速傅里叶变换（FFT），经过信道估计和信道补偿后，取出语义导频进行解码，得到相应的知识嵌入。如果发现当前知识基版本与语义导频中的版本不匹配，则直接将接收到的语义符号输入解码器进行恢



▲图2 基于语义的卫星通信架构



▲图3 基于正交频分复用的知识增强的卫星语义通信系统

复。否则，将使用语义导频中的语义标签来查询每个句子对应的知识嵌入。同时，知识嵌入和接收到的语义符号将一起解码以进行语义恢复。

2 面向6G卫星通信的语义通信技术

在传统通信系统中，传输的数据往往包含大量的冗余信息，导致传输效率低下。同时，基于卫星通信服务的广泛性，往往要求对不同类型数据共同分析与处理，这对网络计算能力提出更高要求。6G语义通信通过提取和传输关键语义信息，减少不必要的数据传输，从而提高传输效率。针对6G卫星通信场景下所面临的远距离、高动态、时变、有限资源等受限传输条件下的传输难题，在发送端实现多种类型关键信息捕捉、信道自适应传输以及语义级别信息恢复是6G卫星通信的潜在方式之一。

要实现面向6G的卫星通信的高效语义信息传输，可以从语义理解、多模态信息融合表征、高效语义提取表征入手，并探究基于大模型的多模态信息高效融合表征机制，研究自适应深度语义理解与语义高效传输机制，设计大模型辅助的生成式语义通信方案。

1）多模态信息高效融合表征机制

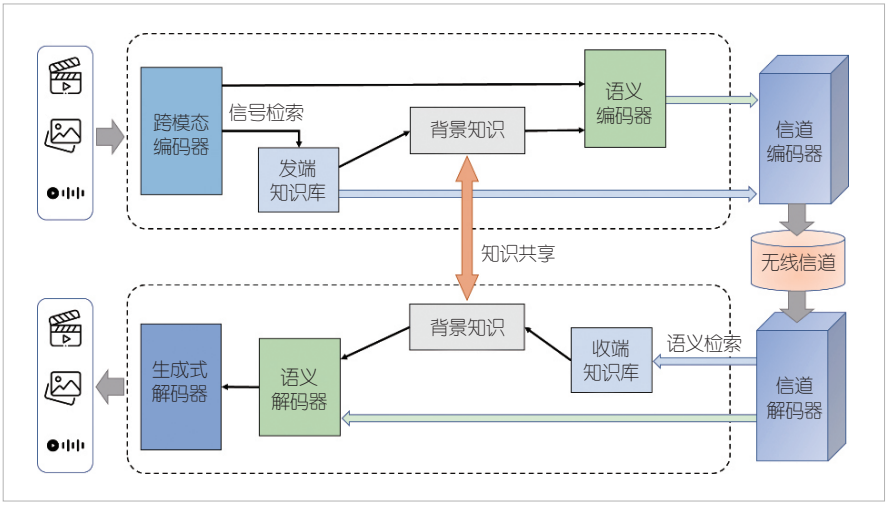
生成式大模型凭借较强的理解能力与生成能力将在语义通信中扮演着至关重要的角色。不管是在发送端基于先验知识提取语义信息，还是在接收端根据背景知识解码语义信息，生成式大模型都将极大地增强语义通信的有效传输能力。图4展示了一种大模型辅助的生成式语义通信框架，涵盖了从信息编码到解码的完整流程，包括跨模态编码、知识库检索、语义编码与解码、信道编码与解码等关键技术环节，收发端均依赖生成式大模型以增强通信效率和准确性。

2）自适应深度语义理解与语义高效传输机制

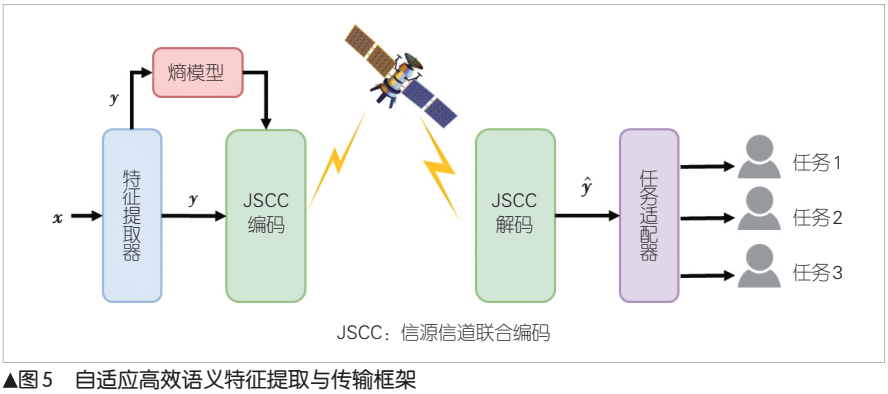
采用针对不同信源模态的特征提取器，并结合深度联合信源信道编解码技术，不仅可以优化特征信息的传输效率，还可以满足不同的应用需求。这种方法能够实现高效且自适应的特征提取和传输，以适应6G卫星通信的极端传输条件。信息自适应高效特征提取与传输框架如图5所示，其根据信息熵来衡量哪些数据应该被保留。熵模型可以估计输入语义特征的概率分布。因此，该框架基于熵模型，计算特征信息的信息熵来评估其对下游任务的重要性，其辅助深度联合信源信道编解码实现可变长编解码，优化带宽资源，同时保证任务的完成准确度等性能。

3）基于潜在扩散模型的信道自适应均衡去噪语义通信系统

传统的语义通信方案依赖于利用原始数据和经过信道退化的数据对来训练语义编解码器模型，这种模型针对特定信道进行优化。受限于卫星与地面终端之间的较高速的相对运动所导致的信道时变非平稳特性，传统的语义通信方案性能严重退化。通过基于潜在扩散模型的信道自适应均衡去噪语义通信系统可以有效解决这一问题，实现卫星通信系统语义信息的可靠恢复。该系统将消除信道影响视为去噪过程的逆过程，并利用扩散模型强大的语义信号先验信息捕捉能力来解决这一逆问题，从而实现自适应地消除信道影响。该系统在离线阶段无需反复训练、缓存语义编解码器模型，从而节约了语义通信系统的部署成本。此外，该系统在降低恢复信



▲图4 大模型辅助的生成式语义通信系统框图



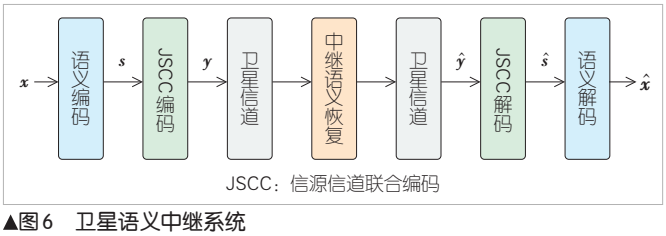
▲图5 自适应高效语义特征提取与传输框架

号失真的同时，能够同时提升恢复信号感知质量，在极端条件下（例如极低信噪比或压缩率）有着明显的性能优势。

3 面向6G卫星通信的语义中继增强技术

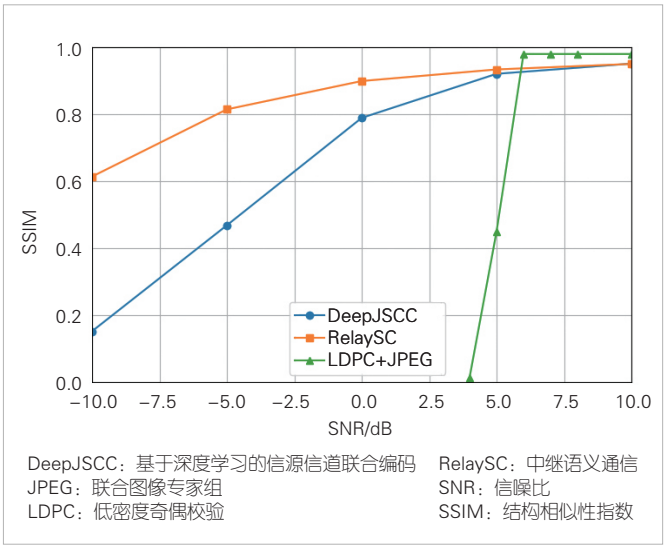
语义知识库对于语义信道编解码器的设计至关重要，可以提升语义通信传输效率以及智能任务的服务准确度。虽然语义通信是基于发送方和接收方共同的语义背景知识，但在实践中，由于卫星系统服务的海量连接，源节点和目的节点很难具有完全相同的语义背景知识。同时，考虑从用户到卫星，再到网关的典型通信链路场景，传统的放大转发和解码转发方式，面临级联衰落挑战，极大影响传输质量以及服务准确度。如图6所示，在卫星中继端部署基于卷积神经网络的中继语义恢复网络，可以有效削弱级联衰落所带来的性能退化，同时提高不同知识背景下卫星服务的适应性。具体来说，语义编码器由若干个下采样卷积层将原始数据转换到潜在空间，降低计算复杂度。JSCC编码器通过卷积层对来自语义编码器的潜在表示进行编码并适应信道条件。中继语义恢复器由3个连续的块组成，每个块包括一个卷积层和若干个残差层。

为了验证引入中继语义恢复器在卫星中继通信场景下的优势，我们构建了一个基于信源信道联合编码与中继语义恢复网络的卫星中继图像传输框架。在该框架中，地面收发端部署语义编解码器，卫星中继端部署中继语义恢复网络。传输图像经过语义编码传输到卫星中继端，并在卫星中继端进行语义转发，此处并不涉及信息的编解码过程，而视作语义信息的恢复与纠错，最后传输到地面接收端解码得到传输信息。在仿真验证中，我们采用结构相似性指数（SSIM）和峰值信噪比（PSNR）作为评价指标，对比方案包括：1）DeepJSCC传输模型，它是经典的语义通信模型，使用基于卷积神经网络的编码器–解码器；2）使用JPEG进行源编码以及使用低密度奇偶校验（LDPC）码进行信道编码来传输图像。Cityscapes数据集用于训练深度神经网络模型，传输图像被预处理为512×512像素。将图像依像素建模为$\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^m$的向量，通过基于深度神经网络的编码器映射到连续值信道输入符号$\boldsymbol{s} \in \mathbb{R}^k$的向量，通常$k < m$。$R = k/m$被称为信道带宽比（CBR），表示编码率。下面如无特殊说明，语义编码器的CBR均为1/6。

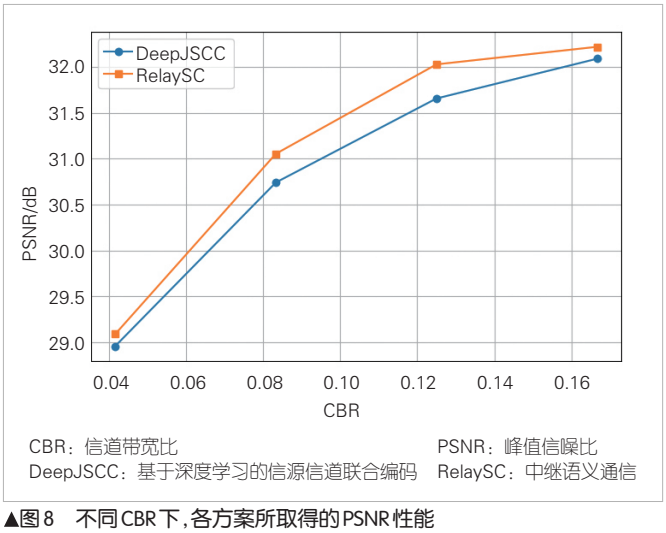


▲图6 卫星语义中继系统

如图7所示，在高信噪比下，3种方案均表现出良好的图像传输性能。随着SNR的降低，传统的JPEG+LDPC的传输方案由于“悬崖效应”，性能急剧退化，而基于信源信道联合编码技术的方案则能有效克服“悬崖效应”，保持稳定的信息恢复性能。在较低SNR（0 dB及以下）下，由于级联衰落效用的影响，DeepJSCC方案性能明显低于中继语义通信方案（RelaySC），论证了面向卫星通信的中继语义通信方案的有效性。图8显示了不同CBR下，DeepJSCC与RelaySC的PSNR性能对比，其中SNR均保持10 dB。在各CBR下，RelaySC方案的PSNR性能均优于DeepJSCC方案，进一步论证了面向卫星通信的中继语义通信方案的有效性与可靠性。



▲图7 不同SNR下，各方案所取得的SSIM性能



▲图8 不同CBR下，各方案所取得的PSNR性能

4 结束语

近年来全球航天活动持续深入，航天发展新模式、新业态不断涌现，空天信息服务的需求也在加速演进。针对面向6G的卫星通信的信息高效提取、可靠恢复、覆盖扩展难题，我们需要探索语义通信基础理论及关键技术，如多模态融合、大模型辅助语义通信、语义级反馈重传、语义知识库辅助、语义中继转发等，深挖语义通信对面向6G卫星通信的支撑作用。通过通信与AI的深度融合，面向6G卫星通信的语义通信在物联网、遥感图像回传、多种模态信息传输、军事等领域拥有广泛应用场景。

参考文献

[1] 张更新, 廖磊瑶, 何元智. 面向空天地海一体化的卫星通信关键技术研究 [J]. 电信科学, 2024, 40(6): 11-24

[2] JIANG P W, WEN C K, LI X, et al. Semantic satellite communications based on generative foundation model [EB/OL]. [2024-08-16]. http://arxiv.org/abs/2404.11941

[3] 牛凯, 戴金晟, 张平, 等. 面向6G的语义通信 [J]. 移动通信, 2021, 45(4): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2021.04.014

[4] PENG H X, ZHANG Z H, LIU Y L, et al. Semantic communication in non-terrestrial networks: a future-ready paradigm [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 119-127. DOI: 10.1109/MNET.2024.3380817

[5] PENNINGTON J, SOCHER R, MANNING C. Glove: global vectors for word representation [C]//Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). Association for Computational Linguistics, 2014: 1532-1543. DOI: 10.3115/v1/d14-1162

[6] FARSAD N, RAO M, GOLDSMITH A. Deep learning for joint source-channel coding of text [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2018: 2326-2330. DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461983

[7] XIE H Q, QIN Z J, LI G Y, et al. Deep learning enabled semantic communication systems [J]. IEEE transactions on signal processing, 2021, 69: 2663-2675. DOI: 10.1109/TSP.2021.3071210

[8] ZHANG P, XU X D, DONG C, et al. Model division multiple access for semantic communications [J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2023, 24(6): 801-812. DOI: 10.1631/FITEE.2300196

[9] LIANG H T, LIU K J, LIU X Y, et al. Orthogonal model division multiple access [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(9): 11693-11707. DOI: 10.1109/TWC.2024.3384421

[10] BURTH K D, GUNDUZ D. Joint source-channel coding of images with (not very) deep learning [C]//International Zurich Seminar on Information and Communication (IZS 2020). Proceedings. ETH Zurich, 2020: 90-94.

[11] KURKA D B, GÜNDÜZ D. DeepJSCC-f: deep joint source-channel coding of images with feedback [J]. IEEE journal on selected areas in information theory, 2020, 1(1): 178-193. DOI: 10.1109/JSAIT.2020.2987203

[12] TUNG T Y, KURKA D B, JANKOWSKI M, et al. DeepJSCC-Q: constellation constrained deep joint source-channel coding [J]. IEEE journal on selected areas in information theory, 2022, 3(4): 720-731. DOI: 10.1109/JSAIT.2022.3231042

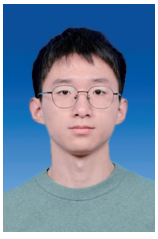
[13] YANG K, WANG S X, DAI J C, et al. WITT: a wireless image transmission transformer for semantic communications [C]// Proceedings of ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2023: 1-5. DOI: 10.1109/ICASSP49357.2023.10094735

[14] DU H Y, LIU G Y, NIYATO D, et al. Generative AI-aided joint training-free secure semantic communications via multi-modal prompts [C]//Proceedings of ICASSP 2024 - 2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2024: 12896-12900. DOI: 10.1109/ICASSP48485.2024.10447237

[15] XU B X, MENG R, CHEN Y, et al. Latent semantic diffusion-based channel adaptive de-noising SemCom for future 6G systems [C]//Proceedings of GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2023: 1229-1234. DOI: 10.1109/GLOBECOM54140.2023.10437849

[16] SUN Y P, CHEN H, XU X D, et al. Semantic knowledge base-enabled zero-shot multi-level feature transmission optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(5): 4904-4917. DOI: 10.1109/TWC.2023.3323380

作 者 简 介



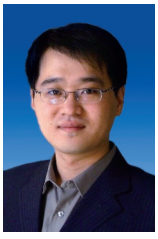
黄靖洪，北京邮电大学在读博士研究生；主要研究方向为面向6G的语义通信和卫星通信技术。



孙梦颖，北京邮电大学博士后；主要从事语义通信标准化、云边端协同边缘智能技术等方向的研究；主持中国博士后科学基金面上项目1项，参与国家重点研发项目、国家自然科学基金、企事业合作项目等10余项；发表论文20余篇，申请专利30余项。



韩书君，北京邮电大学副研究员；主要从事6G智简网络、语义通信、端边云协同分布式智能、智能通信内生安全与隐私保护关键技术等方向的研究；主持和参与国家级、省部级课题10余项；发表论文60余篇，申请专利60余项。



许晓东，北京邮电大学教授；主要研究领域为语义通信、智简网络、卫星通信等；作为负责人完成多项国家级项目，获北京市科学技术奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖，出版的专著获得“中国出版政府奖”；近5年发表重要期刊论文50余篇，申请专利80余项。

通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术

Communication, Sensing and Computing Integration Empowered LEO Satellite Constellation Networks: Architecture and Key Technologies

窦成龙/DOU Chenglong[1]，吴远/WU Yuan[1,2]，
钱丽萍/QIAN Liping[3]，Tony Q. S. QUEK[4]
（1. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室，中国 澳门；
2. 珠海澳大科技研究院，中国 珠海 519301；
3. 浙江工业大学，中国 杭州 310023；
4. 新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院，新加坡 487372）
(1. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau, China;
2. Zhuhai UM Science and Technology Research Institute, Zhuhai 519301, China;
3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;
4. College of Information System Technology and Design, Singapore University of Technology and Design, Singapore 487372)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405003
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241013.1141.004.html
网络出版日期：2024-10-14
收稿日期：2024-08-12

摘要：为了进一步支撑空天地一体化多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算的协同演进，低轨卫星星座网络亟需发展通信、感知、计算融合（ISCC）理论与关键技术。基于此，首先概述了低轨卫星星座网络的研究背景和通感算融合网络研究现状；进一步地，聚焦于通信、感知和计算的深度融合，深入分析了通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术；最后探讨了通感算赋能的低轨卫星星座网络面临的未来挑战与发展前景。本研究有望为未来实现空天地一体化的多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算奠定基础。

关键词：低轨卫星星座网络；通感算融合；空天地一体化

Abstract: To further support the synergistic evolution of multi-dimensional collaborative communications, precise remote sensing, and efficient ubiquitous computing for integrated space-air-ground networks, it is imperative to advance the theory and key technologies of integrated sensing, communication, and computing (ISCC) in low earth orbit (LEO) satellite constellation networks. This paper first provides an overview of the research background and status of ISCC in LEO satellite constellation networks. Subsequently, it delves into the architecture and key technologies empowered by ISCC, which facilitates LEO satellite constellation networks. Finally, it explores the future challenges and development prospects of ISCC-empowered LEO satellite constellation networks. This research is expected to lay the foundations for multi-dimensional collaborative communications, precise remote sensing, and efficient ubiquitous computing in integrated space-air-ground networks.

Keywords: low earth orbit satellite constellation network; communication, sensing and computing integration; space-air-ground integration

引用格式：窦成龙, 吴远, 钱丽萍, 等. 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 9-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405003
Citation: DOU C L, WU Y, QIAN L P, et al. Communication, sensing and computing integration empowered LEO satellite constellation networks: architecture and key technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 9-15. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405003

1 低轨卫星星座网络概述

1.1 研究背景

在全球化和信息化浪潮的推动下，通信网络的形态正在经历深刻的变革。尽管传统的地面通信网络在过去的几十年中取得了长足进步，但随着全球通信需求的不断增长和各类智能应用的快速涌现，其在覆盖范围和适应复杂环境方面的局限性也日益凸显。低轨卫星星座网络凭借独特的轨道优势，以其全域覆盖、超可靠低延迟和具韧性的特点，被视为实现全球信息一体化的关键范式以及地面网络的有效补充和扩展。作为6G重要技术特征之一的非地面网络（NTN），低轨卫星星座网络的发展已经上升到国家战略层面，成为推动国家数字化转型和提升国际竞争力的重要力量[1]。

基金项目：国家自然科学基金项目（62072490、62122069、62071431）；澳门科学技术发展基金项目（FDCT 0158/2022/A）

低轨卫星星座网络在实现蓬勃发展的同时，也面临着一系列挑战。长期以来，通信、遥感和计算功能卫星被分割在独立的系统中各司其职。然而，随着物联网、人工智能、大数据等新兴技术的不断革新和深度融合，这种传统的功能分离式的低轨卫星星座网络难以满足日益增长的跨领域、多元化的业务需求。卫星轨道资源的有限性，以及与地面网络的协同问题，都制约着低轨卫星星座网络的进一步发展。特别是随着对遥感技术精度要求的不断提升，如何高效传输和处理海量感知数据，成为制约低轨卫星星座网络发展的关键瓶颈[2−3]。

通感算融合网络是应对上述挑战的一种行之有效的方案。通过通感算融合为低轨卫星星座网络赋能，可以有效缓解轨道资源紧张的问题。通过在低轨卫星星座网络有限的轨道资源内高效集成通信、感知和计算功能，不仅可以极大地提升资源的利用效率，还为网络的综合服务能力提供了强有力的支撑；同时强化了网络的自主性和智能化水平，为未来空天地海一体化通信、多星组网遥感与在轨边缘计算等多维功能的协同演进打下了坚实基础[4−5]。

1.2 主要技术特征

低轨卫星星座网络作为新一代全球通信基础设施的核心，其独特的技术特征赋予了自身在全球信息化时代中的战略地位。面对日益复杂的通信需求和愈发多元的应用场景，低轨卫星星座网络通过创新的技术手段，突破了传统地面网络的诸多局限，展现出卓越的技术优势。以下是低轨卫星星座网络的关键技术特征：

1）全域覆盖

低轨卫星星座网络通过在近地轨道上部署密集的卫星阵列，实现全球范围内的无缝通信覆盖，确保在偏远、极端环境下依然能够提供稳定的通信服务。这种全域覆盖能力不仅为传统地面网络无法覆盖的偏远和海洋区域带来了高效、可靠的信息接入能力，也为全球用户提供了平等的数字服务机会，缩小了信息鸿沟，是全球信息一体化的重要基石。

2）智简网络

低轨卫星星座网络采用了智能化和自动化的网络架构和运营策略，通过集成先进的机器学习模型与人工智能算法，实现了资源分配和网络调度的自适应优化以及简化的网络管理与配置。智简网络不仅降低了运维的复杂性和成本，还极大地提升了整体网络效率与用户体验。

3）星地联动

通过与地面通信设施的深度融合，低轨卫星星座网络打造了一个高度协同的星地一体化通信体系。星地联动模式支持星地分布式学习星地群智式协作，增强了网络的稳健性和可靠性，提升了网络的整体智能性和服务质量。

4）异构网络协同

低轨卫星星座网络支持多种网络制式和接入技术的协同工作，兼容不同层级网络的异构连接。它能够与其他网络架构，如陆基网络、空基网络、海基网络等，形成高度互补的异构通信系统。异构网络协同使得网络能够在多样化的业务环境中灵活调整，以最佳方式满足不同的业务需求，实现高效的跨域资源共享和负载均衡，构建一个高度灵活和可扩展的通信生态系统。

5）韧性网络

低轨卫星星座网络通过多路径路由、多卫星冗余设计和分布式架构，具备了强大的抗干扰能力和自组织、自愈功能，使其在面对自然灾难、外部攻击或其他意外情况时，网络能够快速重构并恢复正常服务，展现出卓越的韧性和容错能力，保障了服务的连续性和高可靠性。

1.3 通感算融合网络研究现状

在现有的低轨卫星网络中，通信、感知和计算功能通常是通过不同载荷分离实现的，各自发展形成独立的技术体系。通信功能主要依靠卫星通信链路，通过卫星–地面站或星间链路完成数据传输、语音通话、互联网接入等服务。目前，卫星通信技术已经在全球范围内广泛应用，提供了从宽带互联网到物联网连接的多种服务支持。随着5G技术的发展，基于卫星的非地面网络成为了重要的研究方向，重点在于增强星地协同通信的效率和覆盖范围[6]。

感知功能通常由遥感卫星承担。这些遥感卫星通过搭载光学、合成孔径雷达等传感器，对地球进行全方位、多频段的观测，获取高分辨率的图像数据及环境信息[7]。这些数据广泛应用于气象监测、自然资源管理、灾害预警等领域。近年来，随着多光谱、高光谱成像技术的发展，感知技术的精度和范围进一步提升，成为国家和企业获取关键环境数据的重要手段。

在传统低轨卫星网络中，卫星本身的计算能力较为有限，主要负责简单的数据处理和转发任务，复杂的数据分析和计算通常依赖于地面站或云端的计算资源。随着卫星系统规模的扩大和数据量的增加，计算能力的需求也在不断提升，因此，星载计算逐渐成为研究的热点，包括边缘计算、在轨数据处理等新兴领域[8]。

尽管通信、感知和计算功能在现有卫星网络中分别取得了较大进展，但由于功能的割裂，这些系统在应对复杂和多样化的需求时显得捉襟见肘。尤其是随着物联网、大数据、

人工智能等技术的发展，各种跨领域、实时性要求高的应用场景对网络性能提出了更高的要求[9-10]。因此，如何将通信、感知、计算功能有效融合，成为当前卫星网络研究的重要方向。

通感算融合网络在国际上已经引起了广泛关注，并逐渐成为新一代卫星网络技术的核心方向。美国和欧洲的多个科研机构和企业，如美国航空航天局（NASA）、欧洲空间局（ESA）、SpaceX、OneWeb等，纷纷投入大量资源研究通感算融合技术，旨在提升卫星网络的整体性能和服务能力。例如，SpaceX的星链计划（Starlink）不仅致力于全球宽带互联网覆盖，还在探索将星载计算和人工智能技术应用于星间通信优化和数据处理。ESA则在多项计划中探讨了通信、感知、计算一体化的可能性，特别是通过人工智能算法优化卫星资源分配和数据处理的效率。

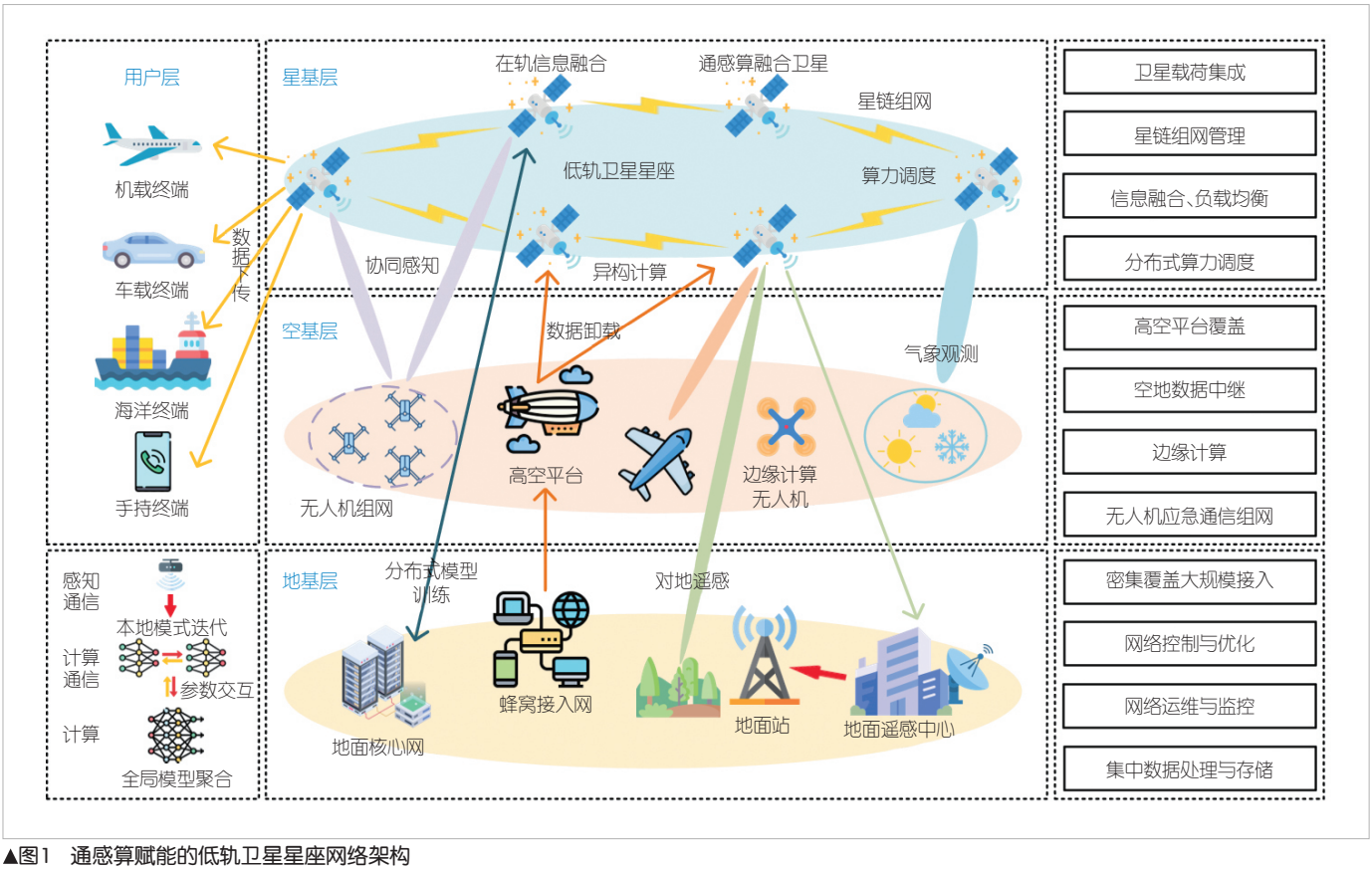
在中国，随着国家对空间信息网络的重视，通感算融合技术也逐渐成为科研机构和企业的研究重点。中国航天科技集团、中国电子科技集团等单位在多个卫星项目中探索了通感算融合技术。近年来，中国高校和科研院所也积极参与其中，进行前沿理论的研究和技术的开发。例如，清华大学、北京邮电大学等高校在通感算一体化的理论研究方面取得了显著进展，提出了多项具有创新性的融合技术方案。此外，国家重点研发计划和自然科学基金等项目也在不断支持通感算融合技术的研究，推动了中国在该领域的快速发展。

整体来看，通感算融合网络的研究已经在全球初步展开，并取得了一定的阶段性成果。尽管如此，当前关于低轨卫星星座网络中通感算融合应用的研究仍处于探索和试验阶段，尚未形成系统的理论框架和全面的技术体系。特别是在网络架构设计、信号处理技术、资源优化配置等方面，仍然缺乏多维度的考量及跨域综合技术解决方案，亟需进一步深入研究和实践验证。受此激励，本文旨在提出通感算融合深度赋能的低轨卫星星座网络架构，并以全局系统性的视角深入分析其关键技术，从而为低轨卫星星座网络乃至整个空间信息网络技术智能化和协同化发展提供全新策略。

2 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络

2.1 网络架构

通感算赋能的低轨卫星星座网络架构如图1所示。在该



▲图1　通感算赋能的低轨卫星星座网络架构

架构中，传统的通信、感知、计算功能不再是彼此独立的模块，而是通过深度融合实现更高效的资源利用与服务能力。这一网络架构的设计主要围绕以下几个核心层次：

1）星基层

星基层是整个网络的核心，由一组通感算融合低轨卫星组成，它们通过星间链路进行互联，构建出一个高度动态且灵活的星座组网系统。每颗卫星不仅具备强大的通信能力，还集成了感知和计算功能，可实现对地表、海洋、大气等目标的全时域监测和数据处理。

2）空基层

空基层作为连接星基层与地基层的中间桥梁，主要由无人机、飞艇、高空气球等高空平台构成，其作用在于扩展通信覆盖范围，并为数据传输提供中继服务。空基层不仅能减轻卫星直接与地面站连接的负担，通过信号放大和增强技术提高通信质量，还能够在特定情况下，临时接替失效卫星的功能，确保网络的连续性和稳定性，尤其是在地形复杂或偏远区域。

3）地基层

地基层由多个地面网络和数据中心构成，负责管理和调度星基层以及空基层的资源，是整个网络架构的支撑和管理中枢。地基层在任务调度与规划、卫星控制与维护方面发挥着关键作用，通过实时监控和调度，确保星座的稳定运行，并对传输的数据进行集中分析处理，提供高质量的服务支持。

4）用户层

用户层包括各种终端设备，如智能手机、物联网设备、无人机等。用户层通过与地基层或直接与星基层的连接，获取所需的通信、感知和计算服务。用户层在系统中承担着信息采集、任务分发、服务请求等多重功能，并可以根据需求灵活调整与卫星网络的互动模式。同时，用户层还可以向网络反馈使用体验和需求，促进服务的持续优化。

这种多层次化的网络架构不仅可以实现通信、感知、计算的无缝集成，还可以通过不同层次之间的协作与交互，最大化网络的整体效能，为用户提供更加智能化、定制化的服务。

2.2 关键技术

在通感算赋能的低轨卫星星座网络中，网络的高效运作和综合性能提升依赖于多个关键技术的协同作用。这些技术不仅奠定了网络架构的基础，还进一步提升了网络的智能化、动态化和高效化。本文从通信、感知、计算、知能、用控5个方面深入探讨了5项关键技术，分析其具体内容以及在实际应用中的重要性。

1）通信：星链均衡动态组网

星链均衡动态组网旨在实现卫星链路的高效管理与动态调整。在通感算融合的背景下，卫星网络不仅需要支持通信，还要兼顾感知与计算功能。这要求网络能够通过感知各卫星节点的通信状态、位置变化和业务负载，动态优化星链拓扑结构和星链资源分配，提高自组织与自愈能力，以确保网络的整体平衡与高效运行。通过引入智能调度算法和先进的链路管理机制，星链均衡动态组网能够在不同的任务场景下灵活调整网络拓扑结构，优化卫星间的通信路径，提升网络的服务质量与韧性。同时，这种动态组网还需结合机器学习和人工智能技术，预测链路变化趋势，提前进行资源调整，以确保网络的持续高效运行。

2）感知：智能多模态协同感知

随着卫星网络覆盖范围和应用场景的不断扩展，单一的感知模式已无法满足复杂环境和多样化任务的需求。智能多模态协同感知技术旨在通过整合来自不同传感器和感知设备的多种数据类型，如光学图像、雷达信号、红外数据等，实现多模态信息的互补融合与协同处理，从而提升感知的精度和可靠性。这一技术的核心在于利用人工智能和机器学习算法，对多模态数据进行深度分析与交叉验证，提取出更加准确的环境特征和目标信息。同时，智能多模态协同感知还能够在感知过程中的数据冲突或不一致时，选择最优的数据融合策略，确保感知结果的准确性和鲁棒性。这不仅提高了网络的环境感知能力，也为后续的通信与计算任务提供了更精准可靠的数据支持，确保网络在复杂环境下的稳定高效运行。

3）计算：星载协作异构计算

星载协作异构计算旨在解决有限的计算资源与日益增长的复杂计算需求之间的矛盾。传统的星载计算往往依赖于单一类型的计算资源，难以适应多样化、复杂度高的任务需求。通过引入异构计算技术，可以将不同类型的计算资源，如中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）、现场可编程门阵列（FPGA）等，集成在卫星平台上，协同完成复杂的计算任务，从而大幅提升计算效率和任务处理能力。此外，星载协作异构计算还支持跨卫星协作，通过高速星间链路，多个卫星可以共享计算任务，形成分布式算力网络，进一步提升了整个星座网络的计算能力与容错性。这种协作模式特别适用于处理需要进行大量数据分析的任务，如大规模图像处理、复杂物理模拟、分布式模型训练等，能够显著减轻单颗卫星的计算负载，同时提高任务的完成速度与可靠性。

4）知能：多维信息在轨融合

多维信息在轨融合旨在通过高效地融合集成的通感算多维跨域信息，使得网络能够提供更为全面和精准的服务。它将来自通感算等多个时空尺度获得的多维信息，如数据层信息、特征层信息、决策层信息，在轨道上进行语义级实时融合与处理，形成综合性的智能决策支持。这项技术的核心在于通过大数据技术，对不同来源的信息进行综合分析、知识萃取与数据融合，以提供更加全面和准确的环境感知和情境理解。

5）用控：按需分布式算力调度

按需分布式算力调度旨在根据实时需求动态分配和调度分布在低轨卫星星座中的计算资源，确保资源的高效利用和各类任务的顺利执行。网络获取的全面的态势感知数据，如组网状态、运行姿态、任务规划等，为按需分布式算力调度提供了精准的决策依据。该技术通过精准的资源调度和任务分解，最大化利用低轨卫星星座网络中的计算资源，支持复杂任务的并行处理，提升整体网络的服务能力和控制效率，使其能够灵活应对各种场景需求。

2.3 网络性能与服务评价体系

建立一个全面的服务评价体系对于衡量通感算赋能的低轨卫星星座网络性能与服务质量至关重要。该评价体系不仅需要涵盖通信、感知、计算等多维度的指标，还要关注网络的整体协调性和服务能力。从上一小节的5个方面出发，其网络性能与服务评价体系如表1所示。

3 未来挑战与发展前景

随着通感算赋能的不断深化，未来低轨卫星星座网络在迈向多业务承载和泛在智能的愿景的同时，也面临诸多复杂挑战和技术瓶颈。下面我们将从多个关键角度探讨通感算赋能的低轨卫星星座网络面临的未来挑战与发展前景。

1）通用融合理论基础与一体化信号设计

通感算赋能的低轨卫星星座网络在通用融合理论基础与一体化信号设计方面面临的挑战，主要集中在跨域理论的重构以及资源有限性与复杂环境下的多功能信号设计。

▼表1 通感算赋能的低轨卫星星座网络性能服务评价体系

类型域	评价项	关键指标
通信	通信性能	传输速率、频谱效率、能量效率、误码率
感知	感知性能	定位精度、感知范围、目标分辨率、图像熵
计算	计算性能	CPU利用率、计算服务响应时间、计算资源利用率
知能	数据域性能	数据融合精度、数据质量、数据一致性、数据处理时延
用控	网络协同性能	任务协调效率、资源利用均衡度、网络同步精度

通用融合理论基础的建立是整个通感算融合网络的核心。然而，通信、感知和计算功能之间存在着不同的物理机制和应用需求，如何在统一的理论框架下将这些功能有机结合，仍然是一个亟待解决的难题。现有的理论模型多是针对地面网络的应用场景设计，且往往侧重于单一功能模块的优化，缺乏对多维功能之间的协同效应的深度理解。在低轨卫星星座网络中，必须考虑高动态、广域覆盖、长时延等空间特有的约束条件，重构符合其特点的通用融合理论基础，以确保通信、感知和计算功能在轨道上能够高效协同。

此外，在一体化信号设计方面，通感算融合要求通信、感知和计算功能的信号能够在共享的资源下高效传输和处理。这涉及跨域信号的统一编码和调制技术，以及多维信号在复杂环境下的抗干扰能力和可靠性问题。在低轨卫星星座网络中，由于卫星的高速移动和频繁的链路切换，加之复杂的多接入星间干扰以及星地干扰，信号的一致性和连续性难以保障。因此，未来需要开发更加灵活、智能的信号处理算法，以应对多维功能的协同需求。同时，随着通信、感知和计算技术的不断演进，信号设计还需要考虑未来的技术发展趋势，如量子通信、大规模多输入多输出（MIMO）、智能反射面等新兴技术带来的复杂性，确保在未来复杂多变的技术环境中依然具有强大的适应性和竞争力。

2）服务分布不均与服务连续性

低轨卫星星座网络凭借其全域覆盖能力，能够为全球用户提供通信、感知和计算服务。然而，由于其轨道分布特性，覆盖区域和服务能力随时间变化，导致地面用户在不同时间和地点获得的服务质量存在显著差异，尤其是在地理位置偏远、人口密度低或资源匮乏的地区，服务分布的不均衡性尤为明显。此外，由于卫星轨道低、运行速度快，单颗卫星覆盖地面用户的时间较短。这种快速的链路切换和卫星覆盖的短暂性，导致了服务的连续性问题，影响实时通信、精确感知和大规模分布式计算等高需求应用的可靠性。

为应对这些挑战，未来的研究需要在多个层面进行突破。一方面，可以通过优化卫星星座的设计与部署策略，增加卫星的数量和轨道层级，以实现对全球区域的更均匀覆盖；另一方面，利用地面与卫星的协同工作机制，通过多点接入和智能切换技术，增强服务的连续性与可靠性。此外，利用人工智能和大数据技术，可以对服务需求进行精准预测和调度，动态调整资源分配，确保在服务高需求的时段和区域，能够提供稳定的通信、感知和计算服务。同时，探索多源融合技术，结合卫星、地面基站、无人机等多种平台，实现对服务的全方位补充与延伸，也将成为解决服务分布不均

与服务连续性问题的重要方向。

3）大规模时空尺度数据处理

随着卫星数量的不断增加和遥感精度要求的不断提升，低轨卫星星座网络将会产生海量的时空数据。这些数据不仅来源广泛，形式多样，包括结构化数据、非结构化数据和半结构化数据，还具有显著的时间和空间相关性。传统的数据处理技术在面对如此复杂的数据集时，难以兼顾高效处理与数据完整性和准确性。特别是在通感算融合的背景下，网络需要在短时间内处理和分析这些数据，以支持实时通信、感知和计算任务。这对数据处理能力提出了极高的要求，需要开发新的算法和架构，以适应这种高频率、低时延的数据处理需求。

随着卫星网络的规模不断扩大，数据的时空分布呈现出更为复杂的特征。这意味着处理这些数据不仅需要考虑单个卫星或地面节点的计算能力，还需要协调多个节点之间的数据共享与任务处理。如何有效地融合这些数据，并从中提取出有价值的信息，是一个亟待解决的问题。

此外，低轨卫星星座网络在处理大规模时空数据时，还面临计算资源和带宽资源的双重限制。在轨的计算能力有限，无法支持大规模数据的实时处理，而将所有数据传输至地面再进行处理，既耗费大量带宽资源，也可能导致时延过大，影响任务的实时性。语义通信技术通过在传输过程中仅传递数据的关键语义信息，减少了数据量，节省了带宽资源，提升了任务的实时性和整体网络的稳定性。未来，需要深入研究语义通信与通感算融合技术的结合，开发出针对大规模时空数据的智能处理方案，以确保网络在复杂的时空数据环境下高效稳定运行。

4）无线资源动态管控

随着低轨卫星数量的急剧增加，以及通信、感知、计算功能的深度融合，如何高效管理和分配有限的无线资源，以确保网络的稳定性、服务质量以及整体性能，成为未来发展的关键难题。

首先，卫星在轨道上的高速移动导致网络拓扑结构不断变化，从而引发资源需求的频繁波动。在这种环境下，传统的静态资源分配方法显然难以应对，需要引入能够实时感知网络状态和资源需求的动态管控策略。这种策略不仅要具备对当前资源使用情况的实时监控能力，还需能够预见未来的需求变化，并迅速调整资源分配，以适应不断变化的网络条件。

其次，通感算融合的特性进一步增加了无线资源管控的复杂性。在这种融合网络中，通信、感知、计算3种功能不仅相互依赖，还需要共享有限的无线资源。例如，在某些场景下，感知任务可能需要更多的频谱资源来传输高分辨率的遥感数据，而通信任务则可能需要更大的带宽来支持实时数据传输和处理。这种多样化的资源需求要求资源管控系统具备高度的灵活性和智能化，能够根据任务的优先级和实际需求进行动态调整，确保关键任务得到优先保障。

最后，随着大语言模型和大数据技术的快速发展，无线资源管理系统正在向智能化方向迈进。通过对网络历史数据的分析与学习，大语言模型可以预测未来的资源需求趋势，并自动优化资源分配策略，这也对资源管理系统的计算能力和响应速度提出了更高的要求。未来，如何在资源管理中充分发挥以大语言模型为代表的人工智能的优势，并在极端复杂的网络环境中保持高效稳定的资源分配，仍将是一个重要挑战。

4 结束语

随着低轨卫星技术的蓬勃发展，通信、感知、计算融合已成为未来低轨卫星星座网络的长期演进趋势。本文围绕通感算融合对低轨卫星星座网络的赋能展开了系统性研究，深入分析和探讨了低轨卫星星座网络在通感算融合背景下的架构设计与关键技术，揭示了这一领域的重要地位与前瞻性发展方向。通过将通信、感知和计算有机融合，低轨卫星星座网络不仅突破了轨道资源紧张和独立功能系统的局限性，还为实现高度集成化和智能化的全球信息服务提供了新的可能性。本文提出的网络架构与关键技术方案，有望为实现空天地一体化的多维协同通信、精准遥感和高效泛在计算奠定坚实基础，并为未来多元化、智能化的全球信息网络发展提供全新思路与技术路径。

参考文献

[1] 王宁远, 陈东, 刘亮, 等. 未来低轨信息网络发展与架构展望 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 396-406
[2] 李高, 王威, 吴启晖. 面向低轨卫星的频谱认知智能管控 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 7-11. DOI: 10.12142/ZTETJ.202105003
[3] CAO X L, YANG B, SHEN Y L, et al. Edge-assisted multi-layer offloading optimization of LEO satellite-terrestrial integrated networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(2): 381-398. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3227032
[4] JIAO J, SUN Y Y, WU S H, et al. Network utility maximization resource allocation for NOMA in satellite-based Internet of Things [J]. IEEE Internet of things journal, 2020, 7(4): 3230-3242. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2966503
[5] 景毅, 姜春晓, 詹亚锋. 面向卫星通信的6G通感算融合架构、技术与挑战 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 12-20
[6] 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G星地融合无线网络及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 42-49. DOI: 10.12142/

ZTETJ.202404007
[7] 蒋忠元, 王森, 王启舟, 等. 低轨卫星多星协同及星地协同遥通算一体化技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 60–75
[8] LI Y J, WANG M, HWANG K, et al. LEO satellite constellation for global–scale remote sensing with on–orbit cloud AI computing [J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2023, 16: 9369–9381. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3316298
[9] HU Q F, JIAO J, WANG Y, et al. Multitype services coexistence in uplink NOMA for dual–layer LEO satellite constellation [J]. IEEE Internet of things journal, 2023, 10(3): 2693–2707. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3214927
[10] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信–感知–计算融合: 6G愿景与关键技术 [J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1–11. DOI: 10.13190/j.jbupt.2021–081

作 者 简 介



窦成龙，澳门大学在读博士研究生；主要研究领域为通感算一体化网络、非正交多址接入、边缘计算与边缘智能。



吴远（通信作者），澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室副教授、IEEE Communications Society澳门分会副主席；主要研究领域包括无线网络资源管理、边缘计算与边缘智能、感通算一体化网络等；主持国家自然科学基金面上项目、澳门科技发展基金项目等项目；研究成果获得IEEE ICC最佳会议论文奖、IEEE WCNC最佳会议论文奖等奖项。



钱丽萍，浙江工业大学教授；主要研究方向为无线通信与网络中的资源管理与优化理论、智能网络通信与计算融合、面向智能网络的分布式机器学习等；主持多项国家自然科学基金项目、省部级科研项目；研究成果获得浙江省通信学会科学技术奖一等奖、IEEE Marconi最佳论文奖、IEEE ICC最佳会议论文奖等奖项。



Tony Q. S. QUEK，新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院教授、院长，IEEE Fellow；主要研究方向为无线通信优化与统计理论的应用、网络信号处理和资源管理等；2016—2019年连续4年获汤森路透高被引科学家称号，2018年获得通信学会杰出讲师称号，并获得2012年度IEEE William R. Bennett Prize奖、2017年通信理论技术委员会早期成果奖、2017年IEEE通信学会亚太优秀论文奖、2016年IEEE信号处理学会青年作者最佳论文奖；发表IEEE期刊论文300余篇。

面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术

Satellite Integrated Sensing and Communication Network for 6G and Its Key Technologies

杨帅斌/YANG Shuaibin，张昱/ZHANG Yu，
卢为党/LU Weidang

（浙江工业大学，中国 杭州 310023）
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405004
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241012.1717.004.html
网络出版日期：2024-10-14
收稿日期：2024-08-12

摘要：通信感知一体化（ISAC）是6G网络的关键技术之一，而卫星通信感知一体化是其中的重要一环。探讨了卫星通感一体化网络及其关键技术，首先，详细分析了卫星通感一体化网络架构，包含相互协同的天基、空基和地基网络；随后，讨论了卫星通信感知一体化的关键技术，包括通感波束形成、通感波形设计、星间链路技术、星上处理技术和卫星天线技术；最后，探讨了若干未来研究方向，包括大规模多输入多输出（MIMO）通感一体化、空天地通感网络安全和新型天线架构，以推动6G卫星通感一体化技术的进步。

关键词：通信感知一体化；卫星通信；6G网络

Abstract: Integrated sensing and communication (ISAC) is one of the key technologies in 6G networks, wherein satellite integrated sensing and communication is an important part. This paper discusses the satellite ISAC network and its key technologies. Firstly, the satellite ISAC network architecture is introduced in detail, including the space-based, air-based and ground-based networks that cooperate with each other. Then, the key technologies of satellite ISAC are discussed, including ISAC beamforming, ISAC waveform design, inter-satellite link technology, on-satellite processing technology, and satellite antenna technology. Finally, several future research directions are explored, including ISAC with massive multiple input multiple output (MIMO), space-air-ground ISAC network security, and new antenna structure, in order to promote the progress of 6G satellite ISAC technology.

Keywords: integrated sensing and communication; satellite communication; 6G network

引用格式：杨帅斌, 张昱, 卢为党. 面向6G的卫星通信感知一体化网络及关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 16-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405004

Citation: YANG S B, ZHANG Y, LU W D. Satellite integrated sensing and communication network for 6G and its key technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 16-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405004

随着第5代（5G）移动通信网络的商业部署，第6代（6G）网络正逐渐从愿景演变为具体设计。6G网络旨在支持更低的延迟、更高的数据速率，以及更多样化的用户终端（UT），可支持各类新兴应用，包括智慧医疗、自动驾驶、工业控制等[1]。6G作为最新一代的智能数字信息基础设施，将与大数据、人工智能（AI）等前沿信息技术紧密结合，实现通信、感知和控制的深层次融合[2]。国际电信联盟（ITU）面向2030的未来技术趋势研究报告指出，通信感知一体化（ISAC）技术将成为新一代移动通信系统最有潜力的关键技术方向之一[3]。6G通信感知一体化技术将利用无线电信号，对目标进行检测、定位和识别，从而捕捉和重建环境数据，引领6G网络迈向物理世界与数字世界融合的新时代。

作为空天地的关键部分，卫星通信系统在提供全球覆盖方面发挥着至关重要的作用。卫星移动通信系统结合卫星通信、计算机、航天等领域技术，在地面移动通信系统的基础

基金项目：国家自然科学基金项目（62171412、62271447）；浙江省自然科学基金项目（LD21F010001）

上为用户提供大跨度、大范围的移动通信服务，有着地面系统难以企及的优势[4]。一方面，卫星通信具有广泛的覆盖范围、较远的通信距离以及灵活的机动能力，其广播性又能与多址接入技术相融合，从而构成一个庞大的通信网络；另一方面，卫星通信的电磁波主要在真空环境下传输且以视距传输为主，传输损耗较为稳定。除此之外，卫星在感知方面也有重要作用，比如气象卫星可以利用搭载的仪器来监测极端天气事件，导航卫星可以提供精确的定位、路线和时间同步服务[5]。

随着全球卫星通信网络的建设，以及卫星和地面移动通信的深度融合，卫星通感一体化系统越来越受到关注。卫星通感一体化技术通过空口及协议联合设计、时频资源的复用和硬件设备的共享，实现了通信与感知功能的无缝融合。这种设计不仅优化了卫星计算、通信、感知相关软硬件资源的利用，还提升了整体系统效率。卫星通感一体化为6G网络提供了新的通信层次和感知视角，能够提升6G网络通信质量以及感知精细度与准确度[6]，为6G网络提供广泛、智能化、协同化和高效率的信息与通信服务提供有效支撑。

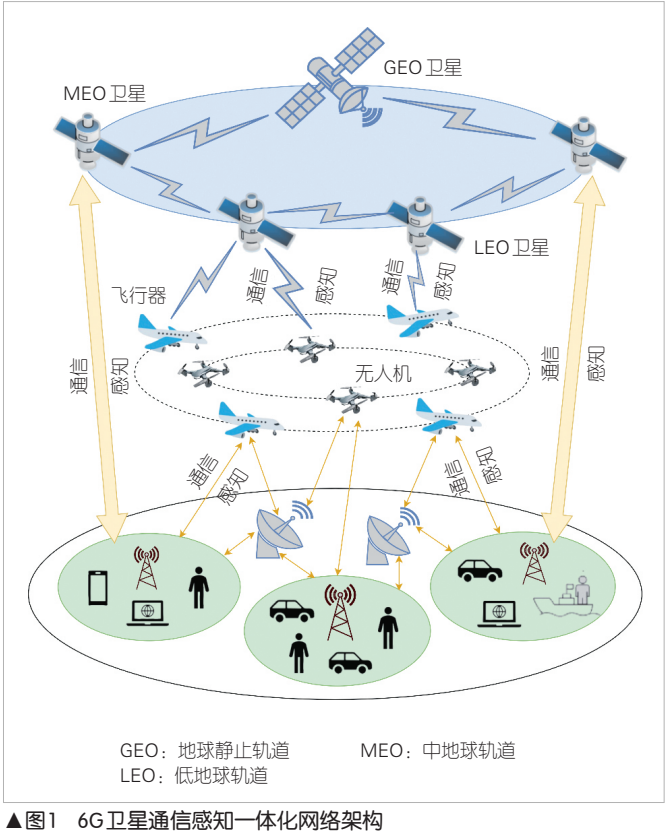
1 6G卫星通信感知一体化网络架构

在6G网络中，卫星通信感知一体化网络将充分利用现代信息技术，实现天基、空基和地基网络的深度融合。它将通信、感知和智能技术融为一体，构建起一个三维的全球覆盖网络，以覆盖空中、太空和地面。空天地一体化是未来网络发展的关键趋势之一。

文献[7]探讨了非地面网络从5G向6G的演变，强调了非地面网络在5G网络中的重要性以及它在6G生态系统发展中的关键作用。非地面网络的优势在于能够提供全球覆盖，实现连续、无处不在的高容量连接。文献[8]中提出的空天地一体化网络架构通过整合卫星、空中和地面网络，实现了全球无缝覆盖和高效灵活的通信。该架构的优势在于其能够充分利用各网络段的计算和通信资源，通过协同计算技术，优化资源分配，满足不同服务需求。文献[9]中提出的空天地一体化网络架构通过结合AI和软件定义网络技术，实现了资源的高效管理和优化。该架构的优势在于其分层混合深度强化学习方法，能够适应空天地一体化网络的动态性和异构性，通过在不同网络层面部署本地和全局控制器，实现精准的资源分配和网络优化。如图1所示，6G中的卫星通信感知一体化网络架构主要包含空基网络、天基网络以及地基网络。这一架构不仅能够提供无缝的全球连接，而且还能集成先进的感知技术和人工智能，使得网络不仅成为数据传输的通道，还是具备环境监测、目标跟踪等智能感知能力的综合体。

1）天基网络：天基网络即卫星网。卫星轨道根据轨道高度来分类时，主要分为3种类型：地球静止轨道（GEO）卫星、中地球轨道（MEO）卫星和低地球轨道（LEO）卫星。天基网络通过部署在地球低轨道、中轨道和地球静止轨道上的卫星，实现对地球表面的全面覆盖，确保全球用户都能获得通信服务。利用卫星作为中继站，一方面天基网络能够为地面基站提供数据回传服务，增强现有5G网络的覆盖范围和容量，同时支持新兴的6G服务，如增强型移动宽带（eMBB）、大规模物联网（mMTC）和超可靠低延迟通信（URLLC）；另一方面，天基网络通过利用卫星搭载的传感器、雷达等进行感知，实现对环境、气候、灾害等的监测，并为地面用户提供精准的感知数据。在6G ISAC架构下，天基网络不仅提供通信服务，还能够通过感知数据辅助通信网络的优化和管理，如通过环境感知数据优化波束成形和信号覆盖，或利用感知到的用户分布数据进行网络资源的智能调度。

2）空基网络：利用高空平台，如无人机、飞艇等，携



▲图1　6G卫星通信感知一体化网络架构

带先进的通信和感知设备，形成一个灵活、高效的网络服务和数据收集系统。这些平台在连接天基和地基网络中发挥着至关重要的作用。它们可以根据实际需求，快速部署到特定区域，为当地提供即时的通信和感知服务。这种快速响应能力在紧急情况下尤为重要，如自然灾害发生时，空基网络可以迅速覆盖受影响区域，提供关键的通信支持和数据收集服务。空基网络搭载的感知设备能够进行大范围的环境监测、交通监控等，收集关键数据并实时传输给地面站或用户。这种实时数据的收集和传输，对于优化资源分配和增强应急响应能力具有重要意义。空基网络的另一个重要特点是其与地面网络、卫星网络的协同工作能力。通过多维度的数据收集和信息融合，空基网络能够显著提高整体网络的感知能力。

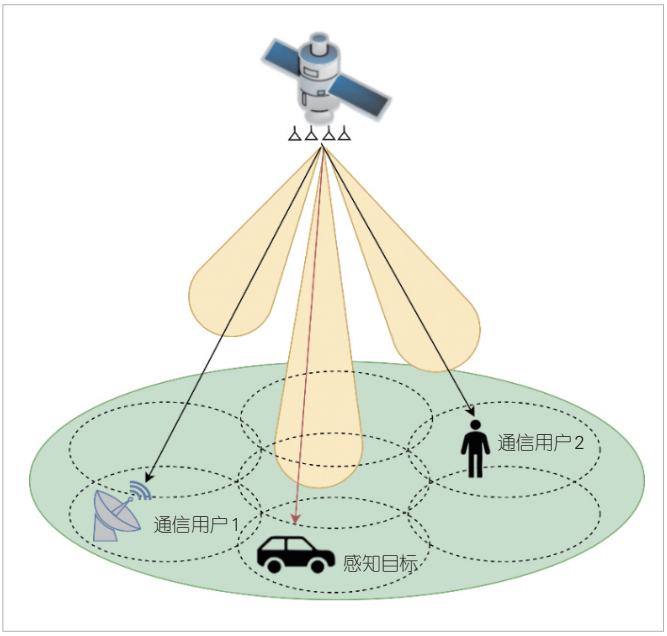
3）地基网络：作为6G架构中的主要通信枢纽，主要提供高容量、低延迟的宽带接入服务，可以支持大量用户和设备的数据传输需求，同时与天基网络和空基网络实现深度融合，以提供无所不在的通信和高精度的感知服务。地基网络能够提供多种无线接入技术，包括6G移动网、Wi-Fi、蓝牙等，实现与不同类型设备的无缝连接和互操作性。此外，地基网络节点可以搭载先进的感知计算设备，收集来自天基和空基网络的感知数据，并进行处理和分析，进而为任务决策、通信优化以及各类通感业务提供支持。通过与卫星和空基网络协同工作，可以提供更精准快速的感知服务，满足高可靠低时延、大连接、广覆盖等多样化通信服务质量需求，并支持智慧城市、工业自动化、远程医疗、智能交通等各类新兴应用场景，满足不同行业的通信和感知需求。

2 卫星通感一体化系统的关键技术

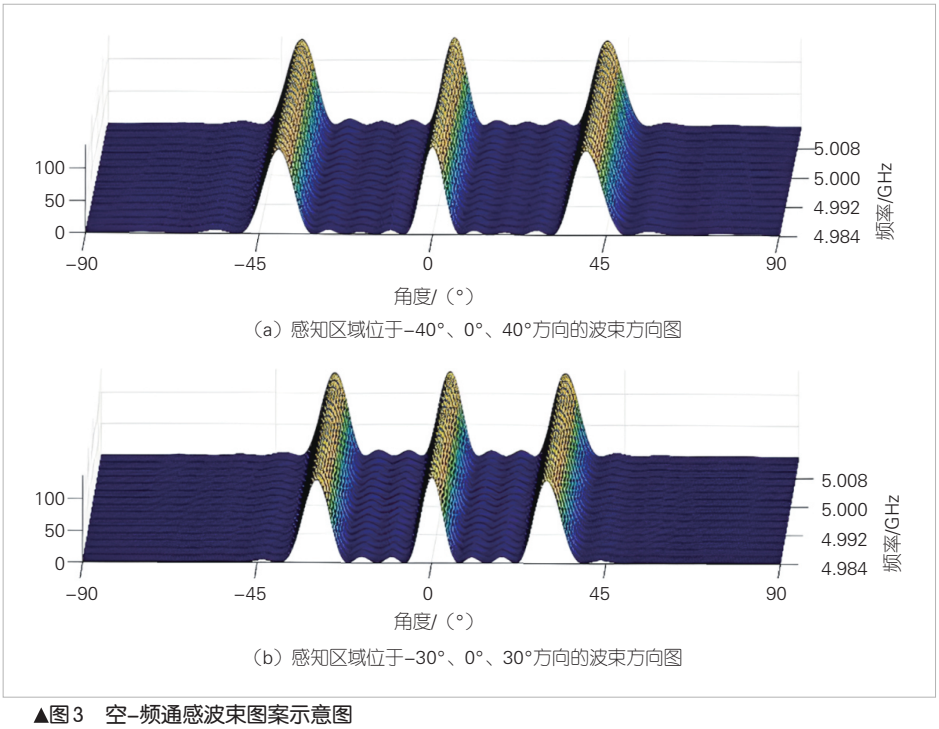
2.1 通感波束形成

通感波束形成技术是6G通信感知一体化系统中的一项关键技术，它使得卫星能够同时进行高效的通信和精确的感知任务。通感波束形成技术整合了通信和感知功能，允许使用同一硬件资源执行两种任务，提高了系统的效率和灵活性。

图2和图3分别是通感波束形成系统示意图和空-频通感波束图案示意图。通感波束形成技术使用先进的信号处理算法和相控阵天线，通过调整天线阵元的相位和幅度，形成指向特定方向（比如感知目标和通信用户所在区域）以及能量集中于特定频段的波束，以提升通信和感知性能。在通信



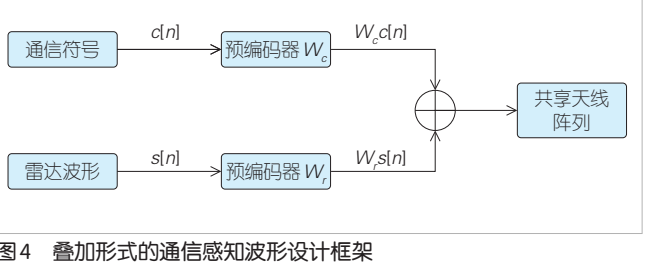
▲图2 通感波束形成系统示意图



▲图3 空-频通感波束图案示意图

方面，波束形成设计目标是增强信号强度，减少干扰，提高数据传输速率和通信质量，同时支持多用户接入。在感知方面，波束形成设计目标是增强波束指向性，提高空间分辨率，实现对目标的精确定位、成像和跟踪。围绕上述设计目标，文献[10]提出了一种全双工通信系统下的ISAC波束赋形和功率优化方法，通过联合优化基站的下行信号和上行接收波束赋形，以及上行用户的发射功率，最小化系统总功率消耗并最大化通信总速率。文献[11]提出了一种用于ISAC系统的广义收发波束成形设计方法，双功能基站同时作为多输入多输出雷达探测目标，并与多个多天线通信用户通信，通过联合收发器波束成形设计，实现了在保证雷达性能的同时提高通信速率。文献[12]提出了一种多天线网络ISAC系统中的最优协作传输波束成形设计方法，针对无法消除和能够消除专用感知信号干扰的通信用户，优化相应的波束成形，以最大化在特定目标区域的最小检测概率，同时保证通信用户的最小信干噪比（SINR）约束。另一方面，由于瞬时信道状态信息（CSI）的获取在动态环境中可能具有挑战性，通感波束形成技术可以利用统计CSI来实现更稳定的波束管理，减少计算复杂度[13]。

卫星混合波束形成[14]是一种先进的波束管理技术，它在卫星通信和感知一体化系统中发挥着至关重要的作用。混合波束形成技术结合了两种或多种波束形成方法，以实现更优的性能。在卫星系统中，通常结合固定波束和电子扫描波束的优势，以提供灵活的覆盖和高效的资源利用。固定波束形成是通过物理天线阵列实现的，波束的方向和形状是固定的，适用于提供稳定的覆盖区域。电子扫描波束形成则利用相控阵天线，通过改变天线阵元的相位来动态调整波束的方向，实现快速的波束指向调整。文献[15]验证了在毫米波ISAC系统中，通过设计模拟和数字混合波束成形，可以形成指向目标方向的期望雷达空间波束。混合波束形成技术可以根据用户需求和网络条件，动态调整波束的覆盖范围和形状，优化信号质量和系统容量[16]。



▲图4 叠加形式的通信感知波形设计框架

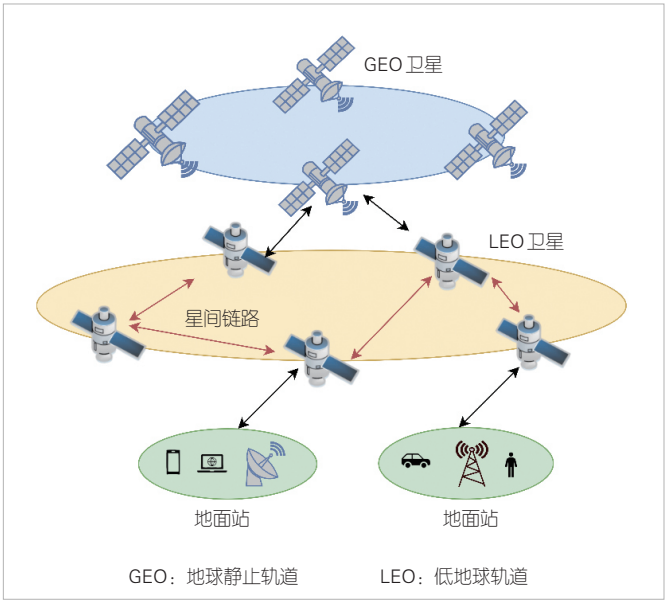
2.2 通感波形设计

在通信与感知功能融合的框架下，感知信号和通信信号能够通过一体化的波形设计和检测，共享同一硬件设备。这种设计允许系统在发送和接收信号时，同时进行信息的传输和环境的感知，大大提高了频谱和硬件资源的使用效率。使用精确的信号同步和优化算法，可以确保在不同模式下信号的稳定性和准确性，从而减少信号之间的干扰。图4为一种叠加形式的通感波形设计框架，即通感波形是由通信信号与雷达波形叠加而成的。

通感波形设计包括感知导向、通信导向以及通信感知折中。感知导向设计的目标是在满足通信需求下最优化感知性能，例如最大化雷达信干噪比、最小化感知误差或最小化通感波束图案均方误差等。文献[17]针对杂波环境中的双功能雷达通信系统，通过优化传输波形，保证通信用户的服务质量的同时，提高目标检测能力，最大化感测SINR。文献[18]研究了在杂波存在的环境下，双功能雷达通信系统的恒定模数波形设计问题，提出了一种基于循环优化和交替方向乘子法的迭代算法，对每个通信信号的合成误差施加了约束，保证每个通信用户的服务质量，同时最大化雷达SINR。通信导向设计目标是在满足感知指标下最优化通信性能（例如最大化用户接收信噪比或最大化用户传输速率等）。文献[19]研究了一种多用户多目标双功能雷达通信波形设计方法，提出了基于半定规划和矩阵空间投影方法的低复杂度波形设计，在保证雷达性能约束下，最大化用户通信速率。文献[20]提出了一种新颖的ISAC波形设计方法，通过可调节峰均功率比来最小化多用户通信干扰，同时保持与雷达信号的相似性。而为了灵活调节通信和感知性能，折中设计一般以两者加权和为设计目标。文献[21]研究了一种双功能多输入多输出雷达通信系统，在功率约束下通过加权优化ISAC波形设计，来逼近所需要的雷达波束图。文献[22]提出了一种面向多输入多输出正交频分复用的ISAC系统的波形设计方法，采用互信息（MI）作为统一的性能度量指标，通过调节通信MI和感知MI之间的权重，实现了在通信和感知性能之间取得平衡。借助通感一体化波形设计，一方面能够减少感知信号和通信信号之间的电磁干扰，降低雷达和通信双发射系统整体功耗，另一方面，还能显著提升软硬件以及空时频资源的利用效率。

2.3 星间链路技术

星间链路技术使得卫星之间能够建立高效通信链路，



▲图5 星间链路网络

即每颗卫星都能够作为网络中的一个节点，与其他卫星进行直接的数据交换，因此能够增强卫星通信以及感知效率。文献[23]探讨了面向6G的集成卫星–地面网络架构，强调了星间链路技术在实现卫星网络全球覆盖、增强网络连通性和可靠性方面的关键作用。星间链路技术通过在卫星之间直接建立通信链路，减少了对地面站的依赖，降低了传播延迟，并提高了信号传输的稳定性。文献[24–25]探讨了低地球轨道卫星星座网络中星间链路的动态建立问题，旨在最大化星座内部数据传输速率。通过使用星间链路技术，在LEO星座中动态建立星间链路，增加了卫星间的直接连接，提高了网络的连通性和自主性，对于实现全球覆盖、降低延迟、提升系统容量具有重要作用。图5为星间链路网络示意图，这样的网络不仅提升了通信的连续性和稳定性，而且通过感知数据的即时共享，增强了整个系统的监测和预测能力。通过星间链路的支持，卫星移动通信系统中的用户可以享受到更稳定、更抗干扰的通信服务。同时，星间感知数据的交互使得卫星网络能进行更精确的环境监测、目标跟踪和其他感知任务。

星间链路技术主要采用微波通信和激光通信两种形式。微波通信因其广泛的应用和相对成熟的技术而成为主流选择，尽管其传输速率的提升可能会受到带宽、尺寸和成本等因素的影响而受到限制。激光通信技术则展现出显著的优势，它提供的宽带能力可以显著提高卫星移动通信的潜在容量，同时减小卫星负载的尺寸和重量。更重要的是，激光通信技术能够实现广域上的大程度单跳连接，大幅度减少信号通信延迟，这对于实时性要求高的感知任务尤为关键。

2.4 星上处理技术

当前的卫星系统仍面临着信号传输延迟、传输质量不佳和系统容量有限等问题，这些问题严重制约了系统的性能。为了克服这些限制，卫星系统需要具备强大的处理能力，这不仅包括通信任务中的信号切换、精准调制和高效波束形成，也涵盖了感知任务中对数据的深度处理、特征的智能提取和信息的精准融合。强大的星上处理能力，是提升通信感知能力的关键。文献[26]探讨了星上处理技术在卫星通信中的应用，星上处理技术作为卫星通信关键技术之一，通过在卫星上进行数字化处理，提高了系统的灵活性和效率。星上处理技术使得卫星能够执行复杂的信号处理任务，例如波束成形、频率复用，从而优化了通信链路。星上处理技术通过在卫星上直接进行数据处理和优化，能够有效减少信号在传输过程中的延迟，同时提升信号的传输质量。它使得卫星在传输过程中能够快速响应，优化信号质量，并有效扩展系统的处理容量，为卫星系统带来了更敏捷的数据处理速度，更高效的资源管理和更智能的任务执行。

在卫星通信感知系统中，星上处理技术主要包括星上处理与交换、完全透明转发和部分处理与交换共3种形式。这些技术能够在数字域中实现，可以为通信和感知任务带来显著的优势。具体来说，星上处理技术能够提高资源利用率，确保通信服务的实时性和感知任务的快速响应。文献[27]探讨了非静止轨道卫星系统在通信领域的进展，强调了星上处理技术的重要性。星上处理技术的优势在于能够实现高速数据传输、增强网络连通性，并支持实时的通信能力。此外，星上处理技术还有助于提升卫星网络的灵活性和动态性，使其能够更好地适应不断变化的通信需求和环境条件。使用星上处理技术可以减少地面站的数据处理负担，快速处理和分发通信与感知数据，迅速响应用户请求，提供低延迟的通信和感知服务，动态调整资源分配，提高系统效率。

2.5 卫星天线技术

全球卫星移动通信系统经历了一个很长的发展阶段，在发展过程中出现了很多形式的天线[28]，其中相控阵天线技术对于卫星通信系统至关重要。文献[29]探讨了空间相控阵天线在结构设计方面的发展，强调了其在卫星系统中的关键作

用。相控阵天线具有轻质结构、高增益、远距离覆盖、快速波束扫描和多波束形成等优势，满足了现代卫星对数据传输能力的需求。文献[30]探讨了相控阵天线技术在卫星通信中的应用，相控阵天线可以形成和指向辐射波束，覆盖广泛的区域，这对于确保卫星通信系统能够覆盖偏远地区非常关键。

同样地，相控阵天线技术对卫星通感一体化的实现也具有重要作用，这主要基于以下优势：1）多波束成形，相控阵天线能够在一个周期内转换波束，形成多个不同方向的发射和接收波束；2）波束赋形，通过调整相控阵阵列中各单元的信号幅度与相位，可以改变天线方向图或波束形状；3）抗干扰性能强，相控阵天线能够集中多个辐射单元的能量，将能量和增益集中到特定方向，从而大大增强抗干扰能力；4）系统可靠性高，由于相控阵系统是由多个阵列组件并联组成的，即使部分组件失效，系统仍可以继续运行。

相控阵天线采用电扫的方式控制波束指向，而不会在所谓的“先通后断”的切换过程中失去链接。相控阵天线可采用模拟波束赋形、数字波束赋形和混合波束赋形3种方式。其中，模拟波束赋形网络是固定的，可实现波束少，无法实时改变波束数量与天线极化方式；数字波束赋形网络灵活，可实现波束多，但存在设备复杂、功耗大、成本高、散热难等问题；混合波束赋形结合模拟波束赋形和数字波束赋形的优势，能灵活改变波束数量，实现性能、成本、复杂度和功耗等因素的综合优化。

3 未来研究方向

3.1 大规模MIMO通感一体化

卫星通信感知一体化系统，旨在通过单一平台实现通信与感知的双重功能。然而，在实际运行过程中，卫星通信感知一体化系统在提供服务时可能会遇到覆盖范围的限制，这在一定程度上影响了其在大范围内提供连续、稳定服务的能力，同时其抗干扰能力也相对有限，容易受到外部噪声的干扰。为了解决这些问题，WANG等引入了大规模MIMO技术[31]。这项技术部署于低轨道卫星，形成大规模天线阵列，从而增强信号的接收和处理能力，同时还能加强基于这些卫星的感知服务。

在卫星通信感知一体化系统中，利用大规模天线阵列接收通信和感知信号，可以有效地减少多径效应和信号衰减，大大提升通信和感知性能。利用波束成形并使用大量天线集中能量形成针状波束，可以提升通信、感知的指向性，减少对拥塞和干扰的敏感度，有助于提高系统的整体效率。

3.2 空天地通感网络安全

在6G网络中，空天地ISAC系统的充分融合给通信和感知带来了可观的系统集成优势，这种集成不仅提升了网络的覆盖能力和服务质量，还为用户带来了更加丰富和高效的应用体验。然而，随着系统集成度的提高，网络安全问题也变得更加突出[32]。例如，空天地一体化网络中的路由节点由于缺乏足够的物理保护，其移动性和灵活性在一定程度上限制了复杂密码算法的部署和应用。这种局限性不仅影响了网络的安全性，还增加了敌对势力控制或捕获路由节点的风险。此外，由于传感和通信功能的共享波形，关键信息可能会在不经意间泄露给传感目标，从而增加了信息泄露的风险。

为了应对这些安全挑战，迫切需要对集成系统中的安全问题进行深入调查和探索研究。这包括但不限于开发更加安全的路由协议、增强路由节点的物理和网络安全防护，以及设计更加安全的传感和通信共享机制，以减少关键信息泄露的风险，并保护用户的隐私；同时，还需要加强对网络安全威胁的监测和预警，提高网络的抗干扰能力和抗攻击能力，确保网络在面对复杂网络攻击时能够保持稳定运行。

3.3 新型天线架构

超大规模MIMO技术在6G网络中的重要性日益凸显，它将为低轨道卫星ISAC系统带来重要改进。这种技术通过成倍增加天线阵列的数量，能够显著提高频谱和能量的使用效率，从而实现更高的数据传输速率和更广泛的覆盖范围。然而，天线数量的增加也给物理空间和硬件管理带来挑战，包括天线阵列的体积增大和系统复杂度的提升。

为了应对这些挑战，全息超表面天线（HMA）作为一种新兴的天线架构[33]，提供了有效的解决途径。HMA利用超材料元件，能够在亚波长尺度上精密排布天线单元，从而实现超大规模天线阵列的紧凑布局。这种布局不仅能够减少天线阵列的物理尺寸，还能够提高天线阵列的灵活性和可调性。

4 结束语

随着移动通信技术的迅猛发展，通信感知一体化技术已经成为6G网络的关键技术之一。卫星通信系统由于其覆盖范围大、算力强等特点，成为6G通信感知融合的重要一环。

通过将通信和感知功能集成到卫星系统中，可以实现更高效的数据传输和更广泛的覆盖范围。这种技术的集成不仅提高了通信效率，还增强了网络的感知能力，使得网络能够更好地适应各种复杂的环境和场景。卫星通信感知一体化技术的发展，推动了一系列行业的技术进步和应用创新。随着对关键技术的持续创新和应用，卫星通信感知一体化技术将为未来的通信和感知服务提供更加强大的支持。它将使得通信网络更加智能、灵活和可靠，能够满足未来社会对于高速、高效、智能化通信的迫切需求。

参考文献

[1] IMT-2030(6G)推进组. 6G典型场景和关键能力 [R]. 2022

[2] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 2022

[3] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告 [R]. 2021

[4] LIU F, CUI Y H, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728-1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632

[5] ZHOU D, SHENG M, LI J D, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(2): 975-1019. DOI: 10.1109/COMST.2023.3245614

[6] CHEN S, SUN S, MIAO D, et al. The trends, challenges, and key technologies of beam-space multiplexing in the integrated terristrial-satellite communication for B5G and 6G [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(6): 77-86. DOI: 10.1109/MWC.004.2200085

[7] AZARI M M, SOLANKI S, CHATZINOTAS S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672. DOI: 10.1109/COMST.2022.3199901

[8] SHANG B D, YI Y, LIU L J. Computing over space-air-ground integrated networks: challenges and opportunities [J]. IEEE network, 2021, 35(4): 302-309. DOI: 10.1109/MNET.011.2000567

[9] ZHANG P Y, CHEN N, SHEN S G, et al. AI-enabled space-air-ground integrated networks: management and optimization [J]. IEEE network, 2024, 38(2): 186-192. DOI: 10.1109/MNET.131.2200477

[10] HE Z Y, XU W, SHEN H, et al. Full-duplex communication for ISAC: joint beamforming and power optimization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(9): 2920-2936. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3287540

[11] CHEN L, WANG Z Q, DU Y, et al. Generalized transceiver beamforming for DFRC with MIMO radar and MU-MIMO communication [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1795-1808. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3155515

[12] CHENG G Y, FANG Y, XU J, et al. Optimal coordinated transmit beamforming for networked integrated sensing and communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(8): 8200-8214. DOI: 10.1109/TWC.2023.3346457

[13] ZHAO Z Y, ZHANG L, JIANG R, et al. Joint beamforming scheme for ISAC systems via robust cramér - rao bound optimization [J]. IEEE wireless communications letters, 2024, 13(3): 889-893. DOI: 10.1109/LWC.2024.3349488

[14] LIU F, MASOUROS C. Hybrid beamforming with sub-arrayed MIMO radar: enabling joint sensing and communication at mmWave band [C]//Proceedings of ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2019: 7770-7774. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683591

[15] QI C H, CI W, ZHANG J M, et al. Hybrid beamforming for millimeter wave MIMO integrated sensing and communications [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(5): 1136-1140. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3157751

[16] DEHKORDI S K, GAUDIO L, KOBAYASHI M, et al. Beam-space MIMO radar with OTFS modulation for integrated sensing and communications [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2022: 509-514. DOI: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814573

[17] ZHU J K, LI W, WONG K K, et al. Waveform design of DFRC system for target detection in clutter environment [J]. IEEE signal processing letters, 2023, 30: 1517-1521. DOI: 10.1109/LSP.2023.3324298

[18] WU W J, TANG B, WANG X Y. Constant-modulus waveform design for dual-function radar-communication systems in the presence of clutter [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2023, 59(4): 4005-4017. DOI: 10.1109/TAES.2023.3234927

[19] DU Y, LIU Y, HAN K F, et al. Multi-user and multi-target dual-function radar-communication waveform design: multi-fold performance tradeoffs [J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2023, 7(1): 483-496. DOI: 10.1109/TGCN.2023.3234275

[20] BAZZI A, CHAFII M. On integrated sensing and communication waveforms with tunable PAPR [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(11): 7345-7360. DOI: 10.1109/TWC.2023.3250263

[21] LIU F, ZHOU L F, MASOUROS C, et al. Toward dual-functional radar-communication systems: optimal waveform design [J]. IEEE transactions on signal processing, 2018, 66(16): 4264-4279. DOI: 10.1109/TSP.2018.2847648

[22] WEI Z Q, PIAO J H, YUAN X, et al. Waveform design for MIMO-OFDM integrated sensing and communication system: an information theoretical approach [J]. IEEE transactions on communications, 2024, 72(1): 496-509. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3317258

[23] ZHU X M, JIANG C X. Integrated satellite-terrestrial networks toward 6G: architectures, applications, and challenges [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(1): 437-461. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3126825

[24] CHEN Q, GIAMBENE G, YANG L, et al. Analysis of inter-satellite link paths for LEO mega-constellation networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(3): 2743-2755. DOI: 10.1109/TVT.2021.3058126

[25] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(6): 3430-3443. DOI: 10.1109/TWC.2021.3050335

[26] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23(1): 70-109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247

[27] AL-HRAISHAWI H, CHOUGRANI H, KISSELEFF S, et al. A

survey on nongeostationary satellite systems: the communication perspective [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(1): 101–132. DOI: 10.1109/COMST.2022.3197695
[28] ABDU T S, KISSELEFF S, LAGUNAS E, et al. Flexible resource optimization for GEO multibeam satellite communication system [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(12): 7888–7902. DOI:10.1109/TWC.2021.3088609
[29] WANG C S, WANG Y, LIAN P Y, et al. Space phased array antenna developments: a perspective on structural design [J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 2020, 35 (7): 44–63. DOI: 10.1109/MAES.2020.2984300
[30] CHEN Z N, QING X M, TANG X Y, et al. Phased array metantennas for satellite communications [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 46–50. DOI: 10.1109/MCOM.001.2100538
[31] WANG Z, ZHANG J Y, DU H Y, et al. A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: fundamentals, signal processing, and applications [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2024, 26(3): 1560–1605. DOI: 10.1109/COMST.2023.3349276
[32] GUO H Z, LI J Y, LIU J J, et al. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 53–87. DOI: 10.1109/COMST.2021.3131332
[33] XU J, YOU L, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Near-field wideband extremely large-scale MIMO transmissions with holographic metasurface-based antenna arrays [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(9): 12054–12067. DOI: 10.1109/TWC.2024.3387709

作 者 简 介



杨帅斌，浙江工业大学在读硕士研究生；主要研究方向为通信感知一体化、智能反射面、无人机通信、卫星通信网络等。



张昱，浙江工业大学副教授；主要研究方向为无线通信、通信感知一体化、云接入网、多天线通信、智能反射面、无速率编码等；主持国家自然科学基金面上项目、青年基金项目，中国博士后科学基金，浙江省自然科学基金等项目，获得浙江省通信学会科学技术奖一等奖、中国发明协会创业创新奖二等奖等奖励；发表论文30余篇。



卢为党，浙江工业大学教授、博士生导师，信息工程学院副院长，浙江省通信网技术应用研究重点实验室主任；主要研究方向为智能通信、无人机通信、安全通信和移动边缘计算；作为负责人主持国家自然科学基金和国防科技项目等国家级项目5项、省部级项目5项，相关研究成果获省部级科技奖励3项；发表论文50余篇。

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信息设施建设迅猛发展，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持、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，影响用户服务体验。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

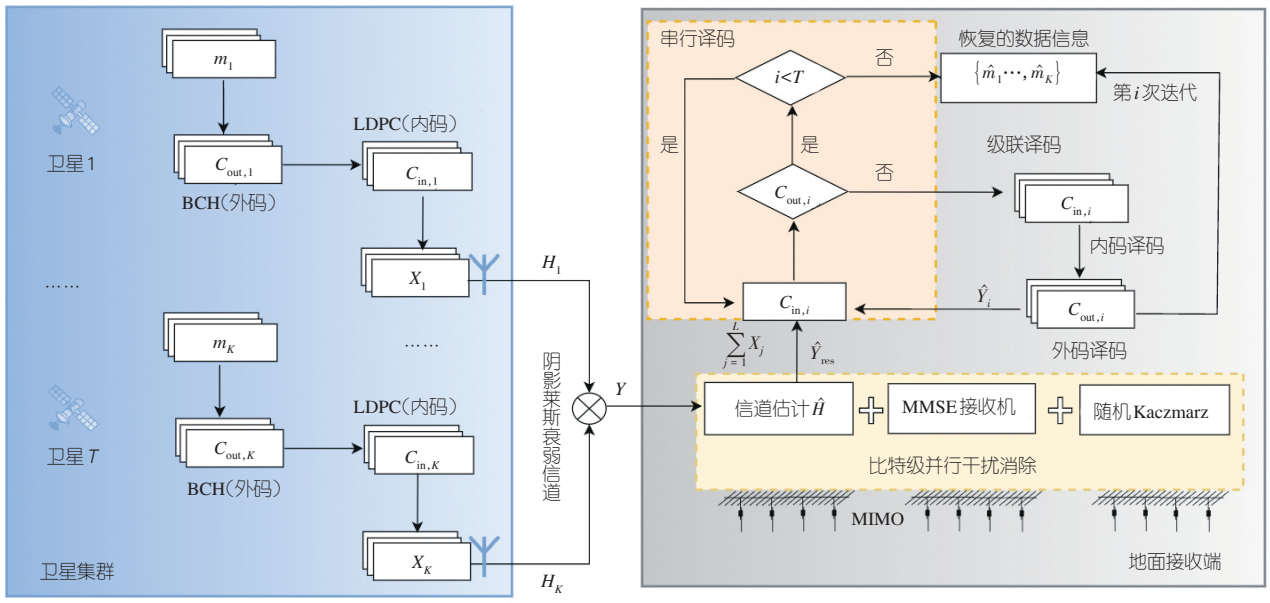
基于级联编码思想选择适当的外码与内码，设计能够区分T个卫星消息的高阶卫星公用码本，保证不超过T个卫星从公共码本中选择不同码字对各自在轨处理后的信息m_i进行映射，以码率R进行外码与内码级联编码得到需要传输的码字X_i。假设地面接收端配置M根接收天线，其接收来自K个卫星的叠加信号可以表示为：

$$\boldsymbol{y}=\sum_{i=1}^{K}\sqrt{P_t\mathrm{PL}_i^{-1}G_i}\,\boldsymbol{h}_iX_i+\boldsymbol{z},\tag{1}$$

其中，P_t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，$\boldsymbol{h}_i\in\mathbb{C}^{M\times1}$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，$\boldsymbol{z}\in\mathbb{C}^{M\times1}\sim\mathcal{CN}(\boldsymbol{0},\sigma^2\boldsymbol{I}_K)$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$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\cdots,\boldsymbol{h}_K]$，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



LDPC：低密度奇偶校验码　MIMO：多输入多输出　MMSE：最小均方误差

▲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：

$$\gamma_k = \frac{P_t\left|([\boldsymbol{V}]_L)^H \boldsymbol{h}_L\right|^2}{\sum_{z=L+1}^{|K|} P_t\left|([\boldsymbol{V}]_Z)^H \boldsymbol{h}_z\right|^2 + \sigma^2\left|([\boldsymbol{V}]_L)^H\right|^2}, \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{V} = (\boldsymbol{H}^H\boldsymbol{H} + \sigma_n^2/P_t\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{H}^H$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$\boldsymbol{A}\boldsymbol{w} = \boldsymbol{b}$的最优解$\boldsymbol{w}^*$，并在有限迭代次数$\tau$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$\widehat{Y}_{\text{res}}$为：

$$\widehat{Y}_{\text{res}} = \boldsymbol{y} - \sum_{\ell=1}^{L} \sqrt{P_t \text{PL}_\ell^{-1} G_\ell}\, \boldsymbol{h}_\ell X_\ell 。 \tag{3}$$

进一步对残余信号$\widehat{Y}_{res}$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：

$$y_r = \left[f_{\text{out},\oplus} + I\right] \bmod 2, \tag{4}$$

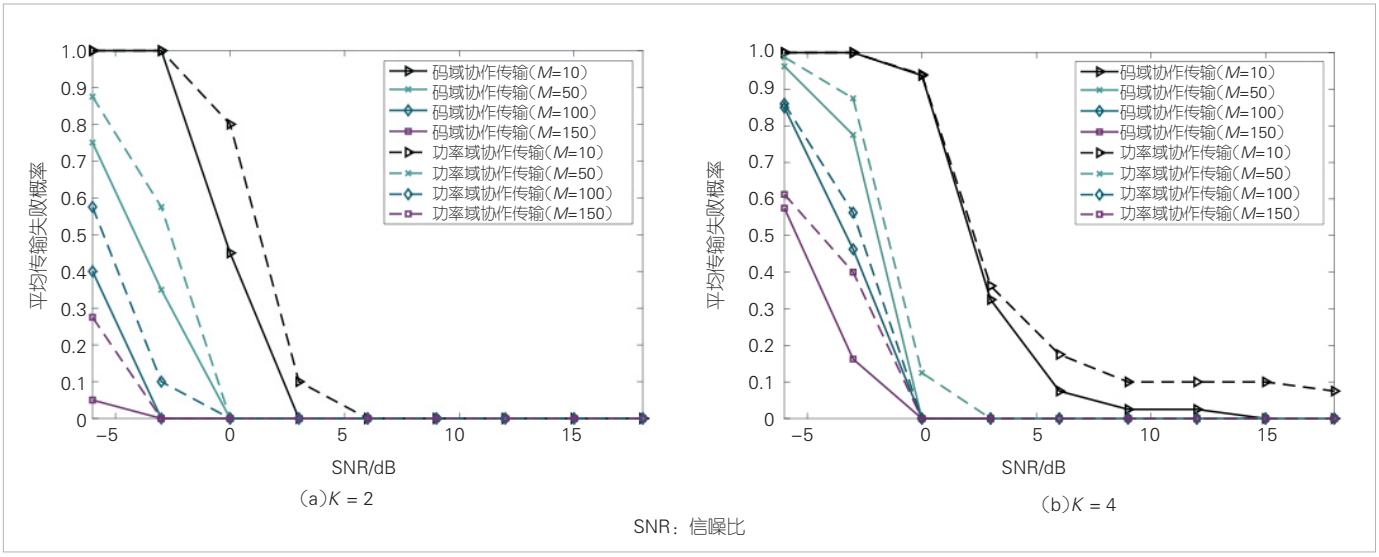
其中，$f_{\text{out},\oplus} = \left[\sum_{\ell=1}^{K-L+1} f_{\text{out},\ell}\right]$为多个卫星消息外码编码后的叠加码字信号，$I$为干扰信号和噪声。以BCH码作为外码进行级联传输为例，每一个消息m_i都被映射为$GF(2^k)\backslash 0$中元素α_i的多项式系数，接收端依据Berlekamp–Massey等算法计算对应的误差定位多项式的多个根，并通过根的逆运算估计得到元素α_i对应的消息，以恢复出剩余$K-L \leqslant T$个卫星的信息。

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大损耗信道条件下，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

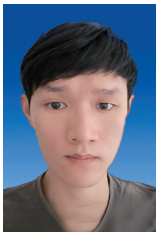
分布式卫星网络将有力支撑遥感遥测、导航定位、手机直连卫星、低空智联等卫星全覆盖新型产业应用，助力新质生产力发展。本文围绕分布式卫星网络的多星协作传输关键技术进行了相关研究现状分析，提出了能够支持多星并发传输并提升传输可靠性的分布式卫星码域协作传输方案，对探索任务驱动的分布式卫星智能协作传输研究奠定了重要研究基础。

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] 张淅, 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, BJÖRNSON 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。

面向星地通信的低复杂度通用编译码技术

Low-Complexity and Universal Channel Encoding/Decoding Technology for Satellite-to-Ground Communications

张可/ZHANG Ke，林文超/LIN Wenchao，王野/WANG Ye
（鹏城实验室，中国 深圳 518055）
(Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405006
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1350.006.html
网络出版日期：2024-10-17
收稿日期：2024-08-15

摘要：面向高动态、大尺度变化的低轨星地链路，具有强大纠错能力的速率兼容（RC）信道编码方案对保障星地时敏业务的信息时效性是至关重要的。提出了一种适用于任意短线性分组码的新型译码思想，称为基于翻转重量的阶序统计译码（FWB-OSD）。FWB-OSD可以达到比传统译码算法更优秀的误码性能水平。在此基础上，针对3GPP标准低密度奇偶校验（LDPC）码的速率兼容编码方案，提出了一种将迭代译码算法与FWB-OSD进行级联的译码算法，称为多层置信组合译码（MBCD）算法。相比于现有置信传播（BP）及级联译码算法，所提MBCD算法在短码长LDPC编码方案下能够展现更优的译码性能。最后，基于星地信道模拟器及相关前端信号处理方法，在桌面端开发了所提编译码方案在星地链路下的半实物验证系统。

关键词：低轨星地链路；速率兼容信道编码；翻转重量辅助；多层置信；译码性能

Abstract: In the context of low-orbit satellite-ground communication, where both dynamic and large-scale changes are prevalent, the deployment of a rate compatible (RC) channel coding scheme with robust error correction capabilities is of paramount importance for the timely delivery of services. In this paper, an idea of flipping weight-aided ordered statistics decoding (FWB-OSD) for arbitrary short linear block codes is proposed, which can achieve superior error performance compared to traditional decoding algorithms. On this basis, a novel decoding algorithm is proposed for RC 3GPP LDPC coding schemes, which cascades belief propagation (BP) and FWB-OSD, called multi-belief combination decoder (MBCD). In comparison to the existing BP decoder and cascade decoder, the proposed MBCD performs better decoding performances in terms of block error rate (BLER). Finally, based on the land mobile satellite channel simulator and signal processing algorithms, a hardware-in-the-loop verification system for the proposed encoding/decoding schemes under the satellite-ground link is developed on the desktop.

Keywords: low-orbit satellite-ground link; rate-compatible channel coding; flipping weight-aided ordered statistics decoding; multi-belief; decoding performances

引用格式：张可，林文超，王野．面向星地通信的低复杂度通用编译码技术 [J]. 中兴通讯技术，2024, 30(5): 30-40. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405006
Citation: ZHANG K, LIN W C, WANG Y. Low-complexity and universal channel encoding/decoding technology for satellite-to-ground communications [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 30-40. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405006

面向高动态、大尺度变化的低轨星地链路，具有强大纠错能力的速率兼容（RC）信道编码方案，对保障星地时间敏感型业务的信息时效性是至关重要的：通过信道编码冗余比特实现的物理层纠错能力，一是可以避免重传机制在高动态链路下频繁介入导致的信息时效性严重下降问题，二是在低仰角弱链路条件下实现可靠传输以大幅提升有效通信时间。

现有信道编译码技术研究中，低密度奇偶校验（LDPC）码在渐进码长条件下可实现速率兼容的高速编译码，并已经在各种卫星通信标准中得到应用，例如第二代数字视频广播（DVB-S2）及其扩展（DVB-S2X），近年也被3GPP的5G NR标准采纳作为数据信道的编码方案。但是，现有以置信传播

基金项目：鹏城实验室重大攻关项目（PCL2024A01）；中国博士后科学基金面上资助项目（2023M741845）

（BP）作为译码算法的LDPC码在短码长条件下纠错性能显著退化；另一种可理论逼近香农容量的新型编译码技术，采用连续消除列表（SCL）作为译码算法的极化码方案，虽然被证明可以逼近最大似然（ML）译码性能，但也存在译码复杂度过高的问题。

综上，面向短数据包业务与低时延高可靠通信的短码长信道编译码技术仍然是一个开放问题。特别是在星地高动态链路下，一个适用于多种码长、码率配置的高性能通用译码技术对于星地通信技术至关重要。

1 通用译码相关技术

1.1 基于阶序统计的译码思想

近年针对高可靠编译码技术的研究中，阶序统计译码（OSD）被广泛认可为通用（对任意短线性分组码进行译码）、高性能（逼近ML译码）译码算法[1]。OSD首先根据接收信号的可靠度将接收信号划分为最可靠基（MRB）和最不可靠基（LRB），然后通过执行高斯消元（GE）构建与MRB相关的系统生成矩阵，按照汉明重量递增的顺序生成测试错误模式（TEP），利用系统生成矩阵重编码得到候选码字。在所有候选码字中，最有可能的一个将被选择作为译码输出。对于信息长度为k且汉明距离最小为$d_{\min}$的线性分组码，阶数$m=\lceil d_{\min}/4-1\rceil$的OSD可以接近ML译码性能[2]，但其复杂度高达$O\left(k^{\lceil d_{\min}/4-1\rceil}\right)$。

当前已有许多文献提出了方法来降低OSD的复杂度。主要方法是通过引入跳过或停止准则来避免处理不可靠的TEPs序列[3-6]。文献[3]提出了Fast-OSD，该算法同时考虑概率必要条件和概率充分条件，以限制处理TEP的数量。文献[4]提出了分段抛弃译码的方法，将TEPs序列划分成多段并对不可靠分段执行跳过操作以降低译码复杂度。此外，文献[5]提出了一种基于概率的OSD（PB-OSD），给出两种概率度量分别用来抛弃TEPs和停止译码，在保证性能的前提下降低了重编码的次数。文献[6]中提出了一种局部约束的OSD，使用串行列表维特比算法在由局部奇偶校验矩阵指定的网格上搜索TEPs。上述算法虽然可以一定程度减少处理的TEP数量，但参数设定并无严谨理论推导，在面向RC编码方案时会出现译码性能退化，这将在本文的仿真结果中得到体现。因此，OSD算法的优化方向在降低译码复杂度之外，还需进一步考虑设计TEPs序列的最优生成规则与自适应跳出准则。

此外，对于短码长LDPC码，现有文献也提出了一些BP和OSD组合的级联译码方案以同时保持BP低复杂度和OSD可以达到ML性能的优点。一般来说，BP输出的对数似然比（LLR）比从信道接收到的更可靠，因此OSD可以用较低的译码阶数纠正错误比特，从而降低复杂性。文献[7]首先提出了一种BP-OSD算法，在每次迭代后，都会对BP译码的输出LLRs执行OSD。然而，该算法在对一个码字译码时需要多次GE操作，导致译码复杂度和延迟较高。为了降低复杂度，文献[8]给出了BP和OSD的串行级联的方案，其中OSD在BP译码的最后一次迭代之后执行。在该算法中，OSD的输入是迭代译码时累加的LLR，可以消除LLR振荡的影响。此外，累加前需要给LLR分配系数，但是该参数取决于代码和迭代次数，并且很难确定。对于阶梯LDPC码，文献[9]提出了一种基于BP和OSD的混合译码方案。上述算法相比BP译码均能实现误码性能的提升，但仍存在复杂度高且参数难以确定的问题。

1.2 基于猜测随机加性噪声的译码思想

猜测随机加性噪声译码（GRAND）[10]是另一种先进的通用译码算法。与传统译码器相比，GRAND与编码结构无关，通过猜测传输过程中破坏码字的噪声来译码。GRAND的核心译码思想是，从解调的接收信号中按顺序从最可能到最不可能的顺序去除假定的噪声并检查剩下的是否是合法码字。具体来说，GRAND根据接收到的信号生成TEPs序列来猜测噪声，这些TEPs生成的顺序是不同GRAND改进算法之间的主要区别。对于硬判决输入GRAND，研究人员已经验证GRAND可以在离散信道中对任何中等冗余分组码逼近ML译码性能[11]。此外，现有论文提出了基于符号可靠性的GRAND（SRGRAND），它使用一个比特将每个接收到的符号标记为可靠或不可靠，在译码中只对不可靠的位置进行处理[12]。软信息GRAND（SGRAND）根据接收到的信号生成可靠性递减的有序TEPs序列，但其复杂度很高。为了在SRGRAND和SGRAND之间取得性能均衡，一些研究提出了有序可靠性比特GRAND（ORBGRAND）[13]。然而，GRAND复杂度为$O\left(2^{\min\left(nH_{0.5},n-k\right)}\right)$，其中$H_{0.5}$是参数为0.5时的熵率。随着码率的下降，GRAND复杂度急剧上升，因此其仅适用于高码率的线性分组码。这限制了GRAND在低码率编码方案中的实际应用。

1.3 现有技术总结

为长短兼顾的RC编码方案设计一种高效通用译码器仍然是一个有待解决的问题。现有OSD思想被广泛认为是逼

近ML性能的译码方法，但其面向多种编码码率下的译码可靠性与复杂度折衷问题亟待解决。GRAND思想在高码率编码方案下的优异性能已经得到了充分验证，但其在低码率编码方案时译码复杂度急剧上升，无法适配任意码率配置的RC编码方案。

1.4 本文贡献

本文关注适用于RC编码方案的高性能通用译码器设计，主要贡献总结如下：

1）引入了一种基于翻转重量的阶序统计译码（FWB-OSD）思想，其将TEPs可靠度映射为可能的比特翻转位置，使得FWB-OSD可以理论上实现TEPs可靠度降序的最优生成。在此基础上，面向3GPP标准LDPC编码方案，通过密度进化理论分析短环对迭代译码性能的影响，设计了一种新型的BP和FWB-OSD级联方案，称为多层置信组合译码（MBCD）算法。MBCD可以根据LDPC编码方案码长变化，设计最大BP迭代次数与输入到FWB-OSD的LLR序列组合方式，所提MBCD算法在短码长LDPC编码方案下能够展现更优的译码性能。

2）考虑每个信息位的平均操作数量，对所提FWB-OSD和MBCD的计算复杂度与其他各种算法进行比较。仿真结果表明，所提出的FWB-OSD和MBCD在译码复杂度上实现了更优的折衷。

3）将3GPP标准LDPC编码方案与MBCD译码算法在星地半实物验证系统上进行了样机开发，基于半实物验证系统，MBCD算法与面向星地通信的时频域信号处理算法结合后具有良好性能，可以提高低轨星地通信场景的传输可靠性。

2 传输模型

2.1 信号模型

令$\mathcal{C}(n,k)$是一个码长为n、维数为k的编码方案。信源（信息比特）序列和编码码字分别表示为$\boldsymbol{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_k)$和$\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\cdots,c_n)$。采用二进制相移键控（BPSK）调制，得到调制序列$\boldsymbol{x}$。经加性白高斯噪声（AWGN）信道传输后，在接收端接收序列为$\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}+\boldsymbol{z},\boldsymbol{z}\sim N(0,\sigma^2)$。解调后产生的硬判决序列为$\hat{\boldsymbol{c}}$，其中，若$y_i\geqslant 0$，则$\hat{c}_i=0$，否则$\hat{c}_i=1$。解调后产生的对数似然比（LLR）序列$\boldsymbol{L}=(L_1,L_2,\cdots,L_n)$定义为：

$$L_i=\log\frac{\Pr\{y_i|c_i=0\}}{\Pr\{y_i|c_i=1\}}=\frac{2y_i}{\sigma^2},1\leqslant i\leqslant n, \tag{1}$$

其中，令$\alpha_i=|L_i|$表示可靠度序列，则可靠度序列为$\boldsymbol{\alpha}=\{\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_n\}$。硬判决比特$\hat{c}_i$错误概率为：

$$\Pr(\hat{c}_i\neq c_i)=\frac{1}{1+e^{\alpha_i}}。 \tag{2}$$

2.2 OSD算法

在OSD中，译码器首先对可靠度序列$\boldsymbol{\alpha}$进行降序排列，生成矩阵$\boldsymbol{G}$被相应的置换为$\overline{\boldsymbol{G}}=\boldsymbol{G}\Pi_1$，其中，$\Pi_1$表示相应的置换。接下来，对矩阵$\overline{\boldsymbol{G}}$执行高斯消元（GE）得到系统形式的矩阵$\tilde{\boldsymbol{G}}$。为了确保前$k$列是线性无关的，在GE中可能会发生置换$\Pi_2$。最终，硬判决序列和可靠度序列置换为$\tilde{\boldsymbol{c}}=\hat{\boldsymbol{c}}\Pi_1\Pi_2$和$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}=\boldsymbol{\alpha}\Pi_1\Pi_2$。

经过上述置换后，最可靠基（MRB）对应的硬判决序列为$\tilde{\boldsymbol{c}}_B=\{\tilde{c}_1,\tilde{c}_2,\cdots,\tilde{c}_k\}$，相应的可靠度序列为$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_B=\{\tilde{\alpha}_1,\tilde{\alpha}_2,\cdots,\tilde{\alpha}_k\}$。然后，按照汉明重量递增的顺序生成$k$比特的TEP序列$\boldsymbol{e}=\{e_1,e_2,\cdots,e_k\}$，其中最大汉明重量为OSD的阶数。对于每一个TEP $\boldsymbol{e}$，相应的估计码字可由如下重编码得到：

$$\tilde{\boldsymbol{c}}_e=(\tilde{\boldsymbol{c}}_B\oplus\boldsymbol{e})\tilde{\boldsymbol{G}}。 \tag{3}$$

找到最优的候选码字$\tilde{\boldsymbol{c}}_{best}$等价于最小化$\tilde{\boldsymbol{c}}_e=(\tilde{\boldsymbol{c}}_B\oplus\boldsymbol{e})\tilde{\boldsymbol{G}}$和$\tilde{\boldsymbol{c}}$之间的加权汉明距离（WHD），WHD定义为：

$$\mathcal{D}(\tilde{\boldsymbol{c}}_e,\tilde{\boldsymbol{c}})=\sum_{\substack{1\leqslant i\leqslant n\\ \tilde{c}_{e,i}\neq\tilde{c}_{i,i}}}\tilde{\alpha}_i。 \tag{4}$$

最后，输出码字作为译码结果，即$\hat{\boldsymbol{c}}_{\text{best}}=\tilde{\boldsymbol{c}}_{best}\Pi_2^{-1}\Pi_1^{-1}$。

2.3 GRAND算法

GRAND是一种硬输入译码器，不利用接收信号的软信息。传统译码器寻找最可能的码，而GRAND则寻找最可能的TEP $\boldsymbol{e}_G$。在GRAND中，按照从最可能到最不可能的顺序，TEP和硬判决序列作用如下：

$$\hat{\boldsymbol{c}}_{e_G}=\hat{\boldsymbol{c}}\oplus\boldsymbol{e}_G。 \tag{5}$$

然后，系统利用校验矩阵检测得到的序列$\hat{\boldsymbol{c}}_{e_G}$是否是一个合法码字，当找到第一个有效码字时停止译码，并将该码字作为结果输出。值得注意的是，TEP $\boldsymbol{e}_G$是一个n长的序列，它按照汉明重量递增的顺序生成。TEP的生成顺序是不同GRAND改进算法之间的主要区别。此外，通常会给出最大允许的校验次数以限制译码复杂度。

3 基于翻转重量的阶序统计译码思想

3.1 翻转重量映射与TEPs序列生成方法

基于最优TEPs生成规则应按照其概率降序排列这一基本认识，文献[14]设计了一种最优TEPs生成规则及低复杂度生成算法。假设TEP以$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_B$为条件的概率为

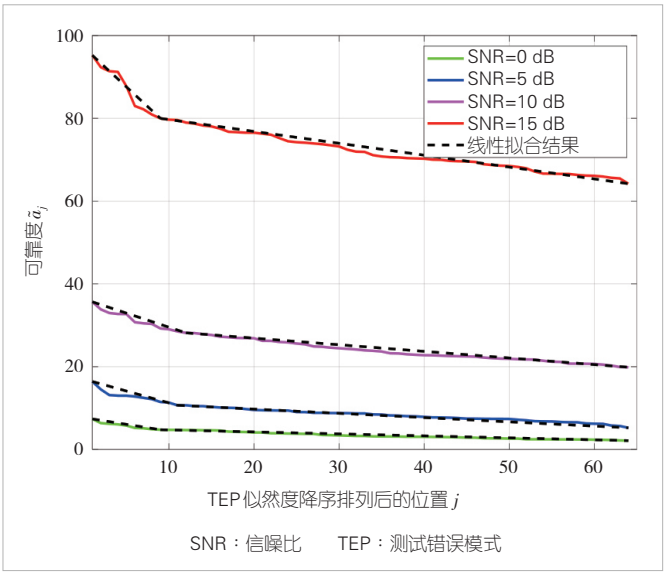
$$\Pr(\boldsymbol{e}) = \prod_{j:e_j=0} 1 - \Pr(\hat{c}_j \neq c_j) \prod_{j:e_j=1} \Pr(\hat{c}_j \neq c_j) = \prod_{j=1}^{k} 1 - \Pr(\hat{c}_j \neq c_j) \prod_{j:e_j=1} \frac{\Pr(\hat{c}_j \neq c_j)}{1 - \Pr(\hat{c}_j \neq c_j)} \propto \prod_{j:e_j=1} \frac{\Pr(\hat{c}_j \neq c_j)}{1 - \Pr(\hat{c}_j \neq c_j)} = \exp\left(- \sum_{j=1}^{k} \tilde{\alpha}_j e_j \right)。 \tag{6}$$

令$R(\boldsymbol{e}) = \sum_{j=1}^{k} \tilde{\alpha}_j e_j$表示TEPs的似然度。文献[14]给出一种线性近似方法来获得TEP似然度和翻转位置之间的关系。令$\boldsymbol{r} = (r_1, r_2, \cdots, r_k)$是$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_B$的近似描述，图1展示了码$\mathcal{C}(128,64)$在各种信噪比（SNR）下$\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_B$的曲线，采用AWGN信道和BPSK调制，则$\boldsymbol{r}$可以建模为$D$ ($D \geqslant 1$)段直线的拟合。

若$D=1$，该描述可以建模为一条截距$I>0$、斜率$s<0$的直线：

$$r_j = sj + I = s\left(j + \frac{I}{s}\right), j = 1,2,\cdots,k。 \tag{7}$$

不失一般性，令$s=-1$，定义量化参数$Q = \dfrac{\tilde{a}_{\lfloor k/2 \rfloor} - \tilde{a}_k}{\lfloor k/2 \rfloor - k}$，$\boldsymbol{r}$可表示为：



▲图1 $\mathcal{C}(128,64)$最可靠基(MRB)部分可靠度曲线

$$r_j = -j + \left\lfloor \frac{\tilde{a}_k}{Q} \right\rfloor + k, j = 1,2,\cdots,k, \tag{8}$$

其中$\lfloor \cdot \rfloor$是向下取整操作。若$D>1$，每段直线的端点下标$\{J_d, 0 \leqslant d \leqslant D\}$可以通过寻找直线和可靠度曲线之间的最大垂直距离找到，其中$J_0=0$，$J_D=k$。第d条直线可表示为：

$$r_j = s_d j + I_d, J_{d-1} < j \leqslant J_d, \tag{9}$$

其中，$s_d<0$是斜率，$I_d>0$是截距。定义量化参数：

$$Q = \min\left\{ \left| \frac{\tilde{\alpha}_{J_1} - \tilde{\alpha}_1}{J_1 - 1} \right|, \min_{d \in \{2,\cdots,D\}} \left\{ \left| \frac{\tilde{\alpha}_{J_d} - \tilde{\alpha}_{J_{d-1}}}{J_d - J_{d-1}} \right| \right\} \right\}。 \tag{10}$$

则每条直线的斜率可计算为：

$$\begin{cases} s_1 = \left\lfloor \dfrac{\tilde{\alpha}_{J_1} - \tilde{\alpha}_1}{(J_1 - 1)Q} \right\rfloor \\ s_d = \left\lfloor \dfrac{\tilde{\alpha}_{J_d} - \tilde{\alpha}_{J_{d-1}}}{(J_d - J_{d-1})Q} \right\rfloor, 2 \leqslant d \leqslant D \end{cases}。 \tag{11}$$

截距可以计算为：

$$I_d = \left\lfloor \frac{\tilde{\alpha}_{J_d}}{Q} \right\rfloor - s_d J_d, 1 \leqslant d \leqslant D。 \tag{12}$$

基于上述近似，TEP似然度$R(\boldsymbol{e})$可近似表示为：

$$R(\boldsymbol{e}) \approx \sum_{j=1}^{k} r_j e_j = \sum_{d=1}^{D} \sum_{j=J_{d-1}+1}^{J_d} r_j e_j = \sum_{d=1}^{D} \left(s_d w_F(\boldsymbol{e}_d) + I_d w_H(\boldsymbol{e}_d) \right), \tag{13}$$

其中，$\boldsymbol{e}_d = \{e_{J_{d-1}+1}, \cdots, e_{J_d}\}$是第$d$条直线对应的TEP，$w_H(\boldsymbol{e}_d) = \sum_{j=J_{d-1}+1}^{J_d} e_j$是$\boldsymbol{e}_d$的汉明重量，定义$w_F(\boldsymbol{e}_d) = \sum_{j=J_{d-1}+1}^{J_d} j e_j$是翻转位置之和。令$\mathcal{F}_R$表示似然度$R$对应的TEP的集合，$\mathcal{F}_R$可以表示为：

$$\mathcal{F}_R = \left\{ \boldsymbol{e} \in \{0,1\}^k \middle| \sum_{d=1}^{D} \sum_{j=J_{d-1}+1}^{J_d} r_j e_j = R \right\} = \bigcup_{\boldsymbol{R}} \left(\mathcal{F}_{R_1}^1 \times \mathcal{F}_{R_2}^2 \times \cdots \times \mathcal{F}_{R_D}^D \right), \tag{14}$$

其中，$\boldsymbol{R}$为集合$\left\{ \boldsymbol{R} \in \mathbb{N}^D \middle| \sum_{d=1}^{D} R_d = R \right\}$，且

$$\mathcal{F}_{R_d}^d = \left\{ \boldsymbol{e}_d \in \{0,1\}^{J_d - J_{d-1}} \middle| \sum_{j=J_{d-1}+1}^{J_d} r_j e_j = R_d \right\}, \tag{15}$$

$\times$表示笛卡尔积。对于似然度R_d，它的每段TEP的汉明重量上下界可以表示为：

$$w_d^{\text{upper}} = \left\lfloor J_d + \frac{I_d}{s_d} + \frac{1}{2} - \sqrt{-\frac{2R_d}{s_d} + (J_d + \frac{I_d}{s_d} + \frac{1}{2})^2} \right\rfloor, \tag{16}$$

和

$$w_d^{\text{lower}} = \left\lceil -J_{d-1} - \frac{I_d}{s_d} - \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{2R_d}{s_d} + (J_{d-1} + \frac{I_d}{s_d} + \frac{1}{2})^2} \right\rceil。 \tag{17}$$

当所有 k 个比特被翻转时，有最大的似然度 $R_{\max} = \sum_{d=1}^{D}(s_d(J_{d-1}+1) + I_d + s_d J_d + I_d)(J_d - J_{d-1})/2$。对于一个给定的似然度序列 $(R_1,R_2,\cdots,R_D) \in \boldsymbol{R}$，当每段的汉明重量 w_d 给定时，翻转位置之和为：

$$F_d = \frac{R_d - I_d w_d}{s_d} \in \mathbb{Z}_+, 1 \leqslant d \leqslant D 。 \tag{18}$$

第 d 段的TEPs序列可表示为：

$$\mathcal{F}_{R_d}^d = \bigcup_{w_d = w_d^{\text{lower}}}^{w_d^{\text{upper}}} \left\{ \boldsymbol{e}_d \in \{0,1\}^{J_d - J_{d-1}} | w_F(\boldsymbol{e}_d) = F_d, w_H(\boldsymbol{e}_d) = w_d \right\}。 \tag{19}$$

确定上式中一个集合等价于找到一个长为 w_d 的正整数序列 $\boldsymbol{a}$，且满足：

$$\left\{ \boldsymbol{a} \in \mathbb{N}_+^{w_d} | J_{d-1} + 1 \leqslant a_1 < \cdots < a_{w_d} \leqslant J_d, \sum_{j=1}^{w_d} a_j = F_d \right\}。 \tag{20}$$

定义 $\boldsymbol{b} = \{b_1,b_2,\cdots,b_{w_d}\}$，$a_j = j + b_j, j = 1,2,\cdots,w_d$，且

$$\begin{cases} F'_d = F_d - w_d J_{d-1} - w_d(w_d+1)/2 \\ k'_d = J_d - J_{d-1} - w_d n \end{cases} 。 \tag{21}$$

将式（22）中的集合变换为将 F'_d 分割为 w_d 个非负且不大于 k' 的整数，则确定式（22）等价于找到所有整数序列 $\boldsymbol{b}$，且满足：

$$\left\{ \boldsymbol{b} \in \mathbb{N}^{w_d} | 0 \leqslant b_1 \leqslant \cdots \leqslant b_{w_d} \leqslant k'_d, \sum_{j=1}^{w_d} b_j = F'_d \right\}。 \tag{22}$$

对于寻找 $\boldsymbol{b}$ 的方法，本文提出利用Ferrers图进行整数分割：如图2所示，单元格总数等于待分割的整数，每行的单元格数对应分割整数的一部分。在Ferrers图中，每行的大小从上到下是非递增的。

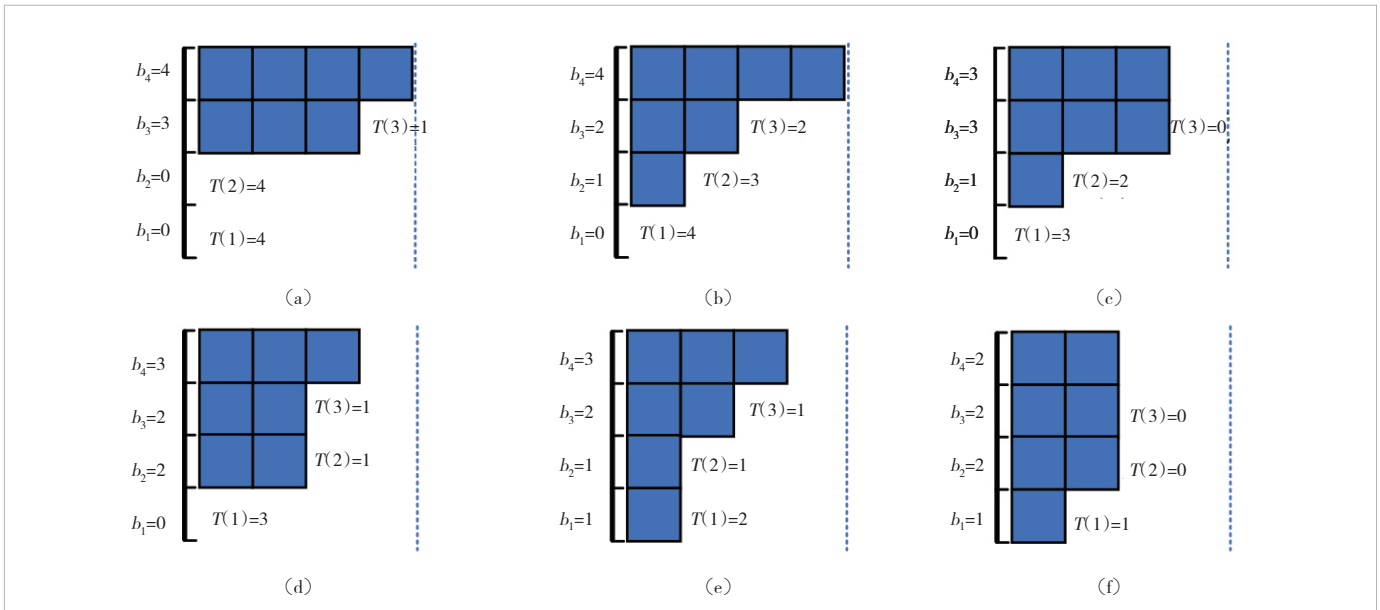
令函数 $t:\{1,2,\cdots,w_d\} \mapsto \{0,1,\cdots,F'_d\}$ 记录相邻部分 b_j，b_{j+1} 的差值为：

$$t(j) = \begin{cases} 0, & \text{if } j = w_d \\ b_{j+1} - b_j, & \text{if } j \in \{1,2,\cdots,w_d - 1\} \end{cases}。 \tag{23}$$

则累积差值函数定义为：

$$T(j) = \sum_{i=j}^{w_d} t(i), j = 1,2,\cdots,w_d , \tag{24}$$

其中，$T(1)$ 记录整数分割 $\boldsymbol{b}$ 的不同，$T(w_d) = 0$ 总是成立的。如果 $T(1) \geqslant 2$，则表明存在相应的整数分割。在本文所提最优TEPs生成方法中，首先找到对于近似似然 R 满足集合



▲图2 参数 $F'_d = 7, k'_d = 4, w_d = 4$ 的整数分割过程

$\left\{\boldsymbol{R}\in\mathbb{N}^{D}\middle|\sum_{d=1}^{D}R_d=R\right\}$的所有序列。然后，使用整数分割的方法生成相应的TEPs，最优TEPs序列生成方法的细节在文献[14]中进行了总结，本文不再赘述。

3.2 基于WHD阈值的停止准则

对于传统OSD，在阶数达到最大后，具有最小WHD的候选码字作为OSD的结果输出。但由于FWB-OSD采用了不固定阶数TEPs生成方法，需要在译码过程中设定准确的WHD阈值$\mathcal{D}^*$。

综上，本文所提FWB-OSD译码跳出准则为：当重编码后的WHD小于$\mathcal{D}^*$，则译码中止并跳出。

备注1：$\mathcal{D}^*$可以通过下式进行计算：

$$\mathcal{D}^*=\mathcal{D}^*_{MRB}+\mathcal{D}^*_{LRB}, \tag{25}$$

其中，$\mathcal{D}^*_{MRB}$和$\mathcal{D}^*_{LRB}$分别为MRB和最不可靠基（LRB）的WHD。$\mathcal{D}^*_{MRB}$可以用当前TEP的WHD进行计算：

$$\mathcal{D}^*_{MRB}=\mathcal{D}_{MRB}(\tilde{\boldsymbol{c}}_e,\tilde{\boldsymbol{c}})=\sum_{j=1}^{k}\tilde{\alpha}_j\boldsymbol{e}_j。 \tag{26}$$

$\mathcal{D}^*_{LRB}$可用均值进行计算：

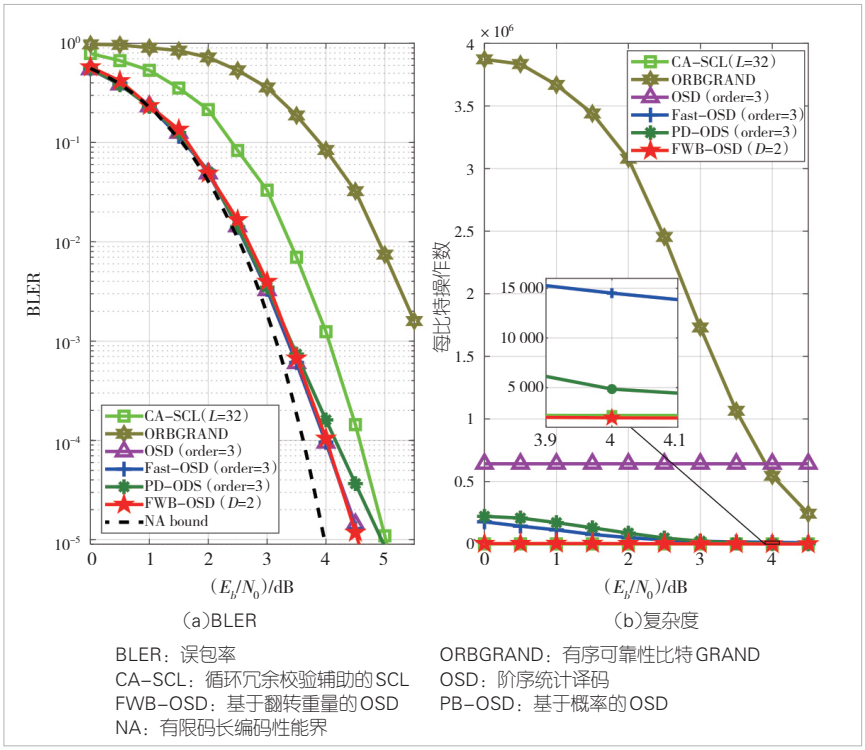
$$\mathcal{D}^*_{LRB}=\sum_{i=k+1}^{n}\frac{1}{1+e^{\alpha_i}}\cdot\alpha_i。 \tag{27}$$

3.3 FWB-OSD的译码性能

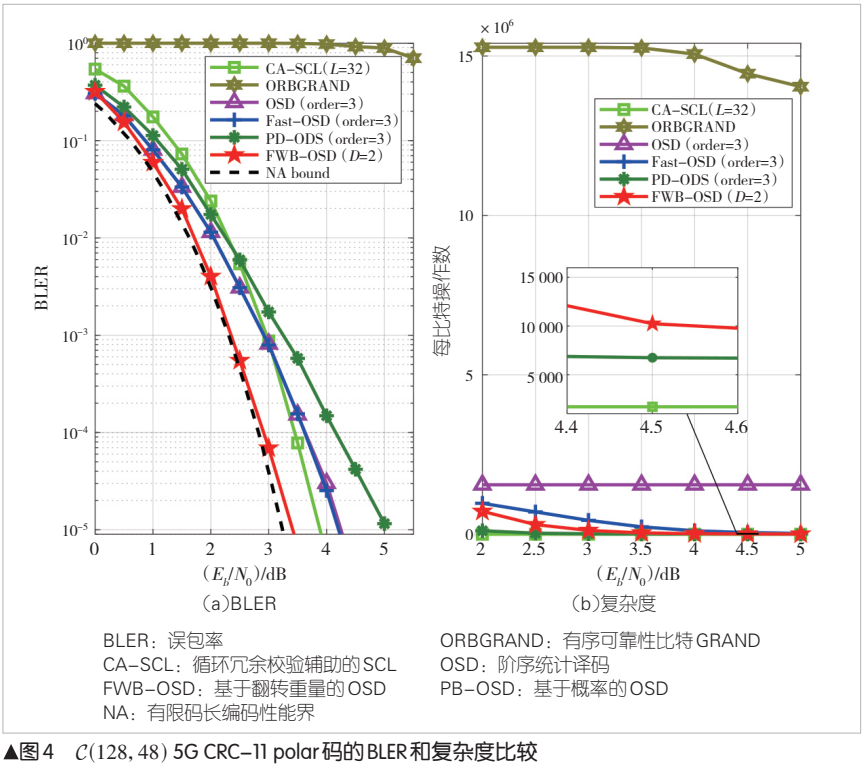
在本节中，给出了编码方案为5G Polar码的仿真结果来评估所提出的FWB-OSD思想的纠错性能和复杂度。所有仿真均是假设BPSK调制和AWGN信道。我们通过比较误包率（BLER）来展示译码性能，并给出有限码长编码性能界（NA）[7]作为评估标准，并通过比较每个信息位比特的操作数来展示译码复杂度。

值得注意的是，“操作数”即为计算复杂度分析中的运算次数，定义为译码过程中使用的实数加法、二进制加法、乘法、比较和查表操作的总数。仿真对比译码算法包括传统OSD[1]、Fast-OSD[3]和PB-OSD[5]，以及循环冗余校验辅助的SCL（CA-SCL）译码算法，列表大小$L=32$。误码性能基线为NA界[15]。

$k=48$时两种不同码长的5G CRC-11polar码仿真的仿真结果分别如图3和图4所示。从图3中可以看出，OSD、



▲图3 $\mathcal{C}(80,48)$ 5G CRC-11 polar码的BLER和复杂度比较



▲图4 $\mathcal{C}(128,48)$ 5G CRC-11 polar码的BLER和复杂度比较

Fast-OSD 和 FWB-OSD 表现出相同的 BLER 性能，并且优于其他算法。例如，当 BLER=10^{-4} 时，与 PB-OSD 和 CA-SCL 相比，FWB-OSD 分别具有约 0.15 dB 和 0.55 dB 的增益。在复杂度方面，FWB-OSD 远低于其他算法。在图 4 中我们可以看到，FWB-OSD 表现出最佳性能并且可以接近 NA 界。具体来说，FWB-OSD 相比 CA-SCL、OSD、Fast-OSD 和 PB-OSD 分别约有 0.54 dB、0.7 dB、0.7 dB 和 1.2 dB 的增益。

4 面向 LDPC 码的级联译码算法

FWB-OSD 的原理是通过对接收符号阶序 LLR 的“穷举式比特翻转”以获得最优的译码结果，其理论上可逼近编码方案的 ML 译码性能。基于这一结论，我们进一步对 3GPP 标准中 LDPC 码的译码方案进行优化，核心思想在于通过 BP 译码与 FWB-OSD 的结合，对 BP 译码结果进行进一步纠错，适合用于短码长 LDPC 码的高可靠译码需求。

4.1 LDPC 编码方案的密度进化分析

一个 LDPC 码可以由维数为 $m \times n$ 的校验矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_{ji})$ 定义，其中 $m=n-k$。若 $\boldsymbol{H}$ 每行和每列都分别有 d_c 和 d_v 个 1，则该 LDPC 码是规则的；否则，是非规则的。令 $V_1,V_2\cdots,V_n$ 和 $C_1,C_2,\cdots,C_m$ 分别表示 n 个变量节点和 m 个校验节点。令 $\mathcal{N}_j=\left\{i:1\leqslant i\leqslant n,h_{j,i}=1\right\}$ 表示和校验节点 C_j 相连的变量节点的下标集合，令 $\mathcal{M}_i=\left\{j:1\leqslant j\leqslant m,h_{j,i}=1\right\}$ 表示和变量节点 V_i 相连的校验节点下标集合。BP 译码就是在变量节点和校验节点之间交换信息，其中，信息初始化为 $L_{i\to j}^{(0)}=L_i,1\leqslant i\leqslant n$。

在第 l 次迭代中，从校验节点 C_j 发送到变量节点 V_i 的信息可计算为：

$$L_{j\to i}^{(l-1)}=2\tanh^{-1}\left(\prod_{i'\in\mathcal{N}_j\backslash i}\tanh\left(L_{i'\to j}^{(l-1)}/2\right)\right),\tag{28}$$

其中，$\mathcal{N}_j\backslash i$ 表示和 C_j 相连的变量节点除去 V_i 后的下标集合。从变量节点 V_i 到校验节点 C_j 发送的信息为：

$$L_{i\to j}^{(l)}=L_i+\sum_{j'\in\mathcal{M}_i\backslash j}L_{j'\to i}^{(l-1)},\tag{29}$$

其中，$\mathcal{M}_i\backslash j$ 表示和 V_i 相连的校验节点除去 C_j 后的下标集合。每次迭代后，每个变量节点的总的后验 LLR $L^{(l)}$ 可计算为：

$$L_i^{(l)}=L_i+\sum_{j\in\mathcal{M}_i}L_{j\to i}^{(l-1)}。\tag{30}$$

BP 译码在每次迭代后对 $\boldsymbol{L}^{(l)}$ 进行硬判决得到估计码字 $\hat{\boldsymbol{c}}_{BP}$。若 $\hat{\boldsymbol{c}}_{BP}\boldsymbol{H}=\boldsymbol{0}$ 或达到最大迭代次数 $T_{\max}$，则停止译码并输出译码结果。

密度进化（DE）是分析 LDPC 收敛译码性能的有效工具，它主要跟踪迭代译码过程中 LLR 的概率密度函数（PDF）的演进规律。借助 DE 分析，可以根据变量节点的最后一次迭代的 LLR 的 PDF 来估计误码性能。令 $p_v^{(l)}$ 和 $p_c^{(l-1)}$ 分别是 $L_{i\to j}^{(l)}$ 和 $L_{j\to i}^{(l-1)}$ 的 PDF。对于规则 LDPC 码，每个变量节点或校验节点的 LLR 的 PDF 是相同的，则校验节点的更新规则为：

$$p_c^{(l-1)}=\Gamma^{-1}\left[\left(\Gamma\left[p_v^{(l-1)}\right]\right)^{*(d_c-1)}\right],\tag{31}$$

其中，Γ 表示从 x 的概率密度映射到 $\tanh(x)$ 的概率密度，$*$ 表示卷积。变量节点的更新规则为：

$$p_v^{(l)}=p_0*\left(p_c^{(l-1)}\right)^{*(d_v-1)},\tag{32}$$

其中，p_0 表示接收符号的 LLR $\boldsymbol{L}$ 的概率密度函数。

对于非规则 LDPC 码，令 λ 和 ρ 表示如下的分布多项式：

$$\lambda(x)=\sum_{i=1}^{d_v^{\max}}\lambda_i X^{i-1},\tag{33}$$

$$\rho(x)=\sum_{i=1}^{d_c^{\max}}\rho_i X^{i-1},\tag{34}$$

其中，λ_i 和 ρ_i 分别表示与度为 i 的变量节点和校验节点相连的边占总边数的比例。$d_v^{\max}$ 和 $d_c^{\max}$ 分别表示变量节点和校验节点的最大度数。非规则 LDPC 码校验节点和变量节点的更新规则分别可以重写为：

$$p_c^{(l-1)}=\Gamma^{-1}\left[\sum_{i=1}^{d_c^{\max}}\rho_i\left(\Gamma\left[p_v^{(l-1)}\right]\right)^{*(d_c-1)}\right],\tag{35}$$

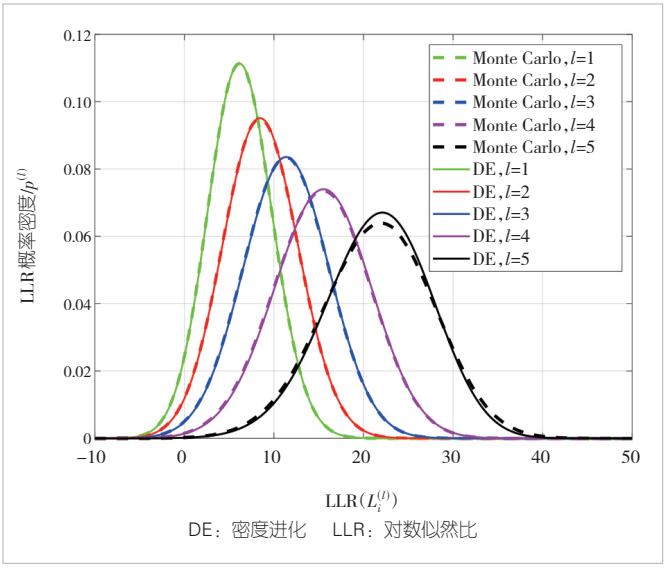
$$p_v^{(l)}=p_0*\sum_{i=1}^{d_v^{\max}}\lambda_i\left(p_c^{(l-1)}\right)^{*(d_v-1)}。\tag{36}$$

由于 $L_i^{(l)}(1\leqslant i\leqslant n)$ 的 PDF 在渐进码长下可以假设是独立同分布的，则每次迭代后非规则 LDPC 码在 BP 译码后 LLR 的 PDF 可计算为：

$$p^{(l)}=p_0*\sum_{i=1}^{d_v^{\max}}\lambda_i\left(p_c^{(l-1)}\right)^{*d_v}。\tag{37}$$

4.2 短码长 LDPC 编码方案的高可靠译码算法

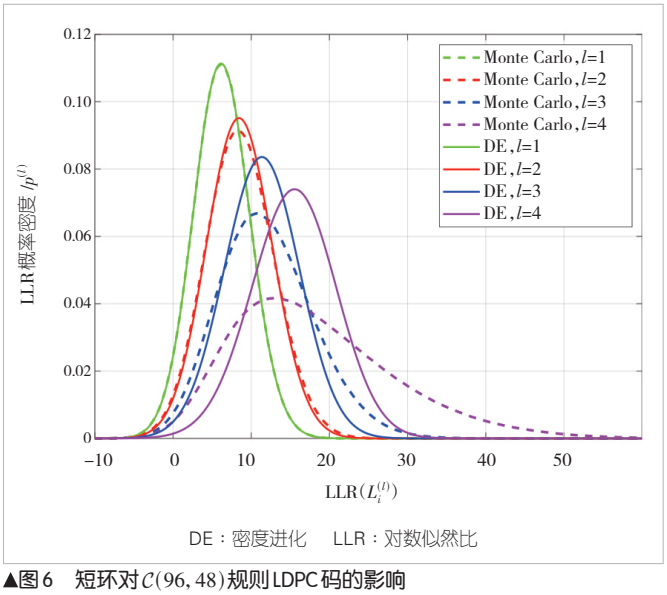
在图 5 中，我们展示了 $d_v=3$ 和 $d_c=6$ 的 $\mathcal{C}(8\,000,4\,000)$ 规则 LDPC 码在 3 dB 处的 DE 和蒙特卡罗（Monte-Carlo）仿真结果。可以看出，DE 和仿真结果在不同的迭代中匹配得



▲图5　$\mathcal{C}(8\,000, 4\,000)$规则LDPC码DE结果和Monte-Carlo仿真

很好。然而，短码长条件下的DE需要进一步考虑短环带来的影响。假设LDPC码的围长为g，则在第$g/2$次迭代之前每个节点的输入消息是独立的，每个节点的消息在第$(g/2-1)$次迭代之后是相关的，其中围长包含的节点将接收到其初始消息。因此，可认为当迭代次数$l \geqslant g/2$时，输出的LLR序列是不可靠的。

在图6中，我们展示了$\mathcal{C}(96,48)$规则LDPC码在3 dB时的DE和Monte-Carlo仿真结果，其中$d_v=3$，$d_c=6$，$g=6$。通过仿真图可以看到，在BP译码器进行第1次和第2次迭代时，DE和Monte-Carlo的仿真结果匹配很好。这证明了每个



▲图6　短环对$\mathcal{C}(96, 48)$规则LDPC码的影响

节点的输入信息在第$g/2$次迭代前是相互独立的。而从第3次迭代开始，DE分析与实际LLR的PDF并不匹配，短环对短码长LDPC的LLR输出产生了影响，而这些依赖性将降低BP译码器的有效性。

基于上述分析，为了提高短码长LDPC码的译码性能，本文提出多层置信组合译码（MBCD）算法：在MBCD开始时，对接收符号的LLR序列$\boldsymbol{L}$执行BP译码。当达到最大迭代次数$T_{\max}$但没有输出有效的码字估计时，FWB-OSD将被激活。考虑BP译码中短环的影响，MBCD在FWB-OSD前设置一个组合器，组合器选择前$(g/2-1)$次迭代输出的LLR和接收符号的LLR来构造OLD的输入$\boldsymbol{L}'$。$\boldsymbol{L}'$可以计算为：

$$\boldsymbol{L}' = \sum_{l=0}^{g/2-1} \beta_l \boldsymbol{L}^{(l)}, \tag{38}$$

其中，

$$\beta_l = \frac{1-\epsilon^{(l)}}{\sum_{t=0}^{g/2-1}(1-\epsilon^{(t)})}, \tag{39}$$

是$\boldsymbol{L}^{(l)}$正确概率的归一化表示，且

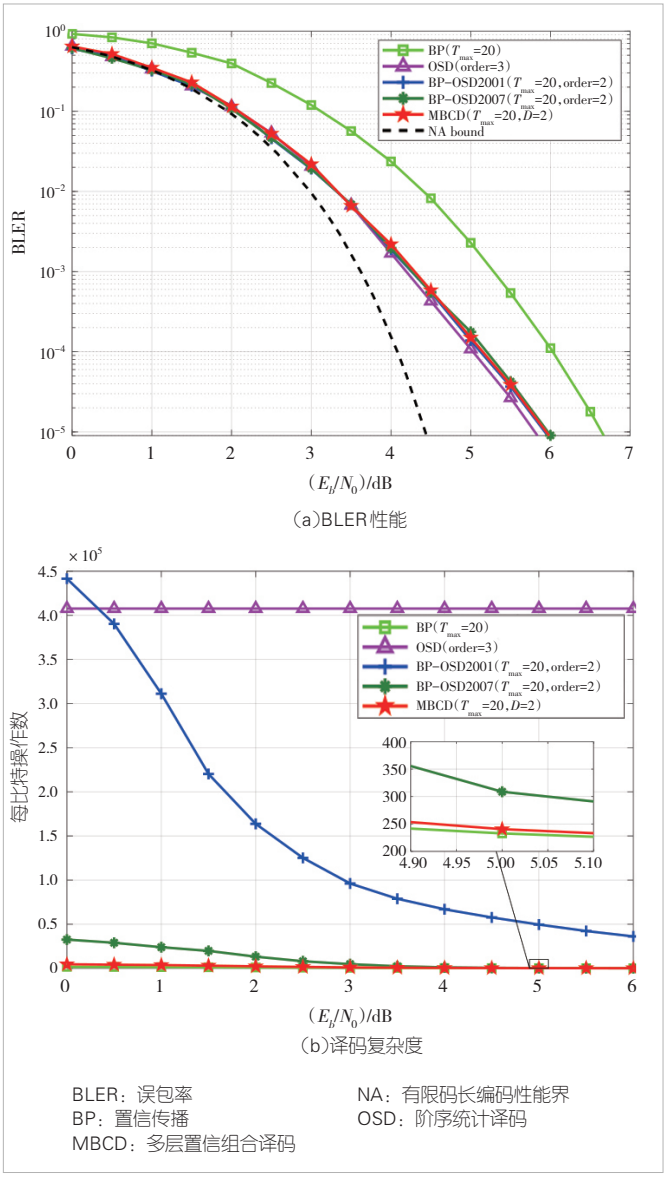
$$\epsilon^{(0)} = \int_{-\infty}^{0} p_0(x)\mathrm{d}x。 \tag{40}$$

4.3 MBCD的译码性能

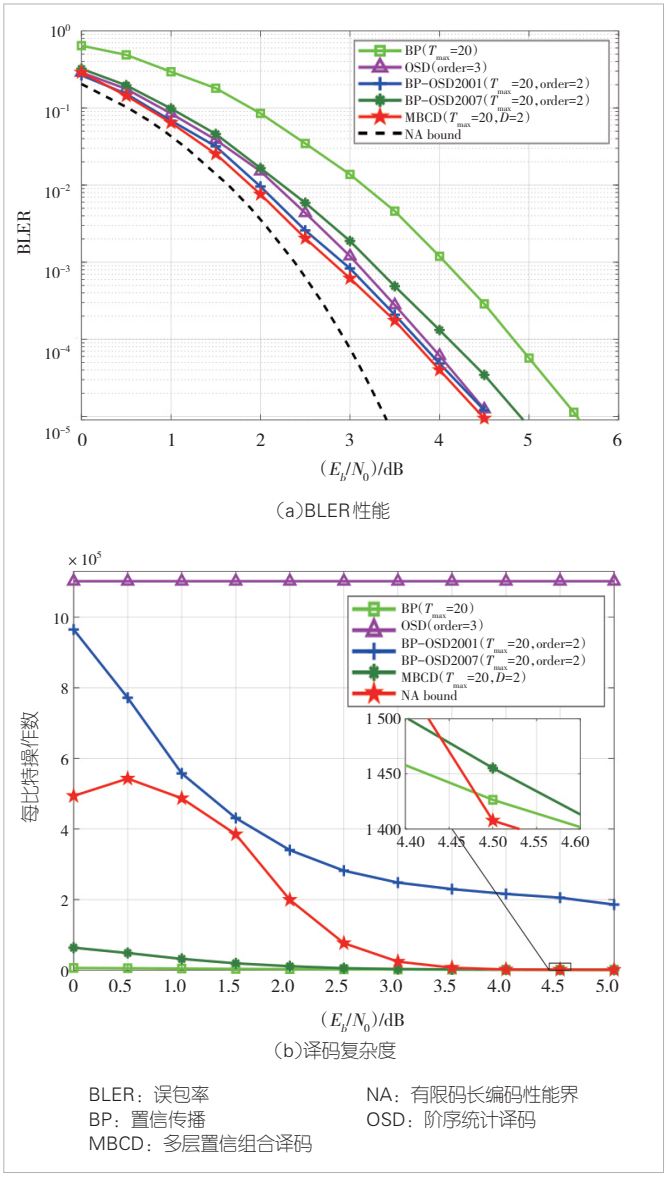
本节我们选取了几种BP与OSD级联译码算法作为对比方案，称为BP-OSD2001[7]和BP-OSD2007[8]。此外，还给出了原始OSD和BP的仿真结果，OSD阶数设置为3阶，BP译码的最大迭代次数设置为$T_{\max}=20$。

图7和图8分别对信息长度$k=40$的5G标准LDPC码在不同码率下进行了译码性能与复杂度仿真。对于$\mathcal{C}(60,40)$5G标准LDPC码，如图7所示，除了BP之外，所有算法的性能几乎相同。然而，所提出的MBCD的复杂度是这些算法中较低的，但略高于BP。对于较低码率的5G标准LDPC码$\mathcal{C}(120,40)$的仿真结果，如8所示，在BLER=10^{-4}时，所提出的MBCD具有最优性能，并且相比BP-OSD2001、OSD和BP-OSD2007分别约有0.06 dB、0.15 dB和0.4 dB的增益。在译码复杂度方面，所提出MBCD远低于BP-OSD2001，并且在高信噪比下也低于BP-OSD2007和BP译码。上述实验仿真结果表明，与现有译码算法相比，所提出的MBCD能够以较低译码复杂度实现更好的BLER性能。

图9展现了$k=45$的5G标准LDPC码在RC编码方案下达到10^{-4}的BLER所需的最小E_b/N_0和相应的译码复杂度。通



▲图7 采用MBCD的5G标准LDPC码性能仿真(1)



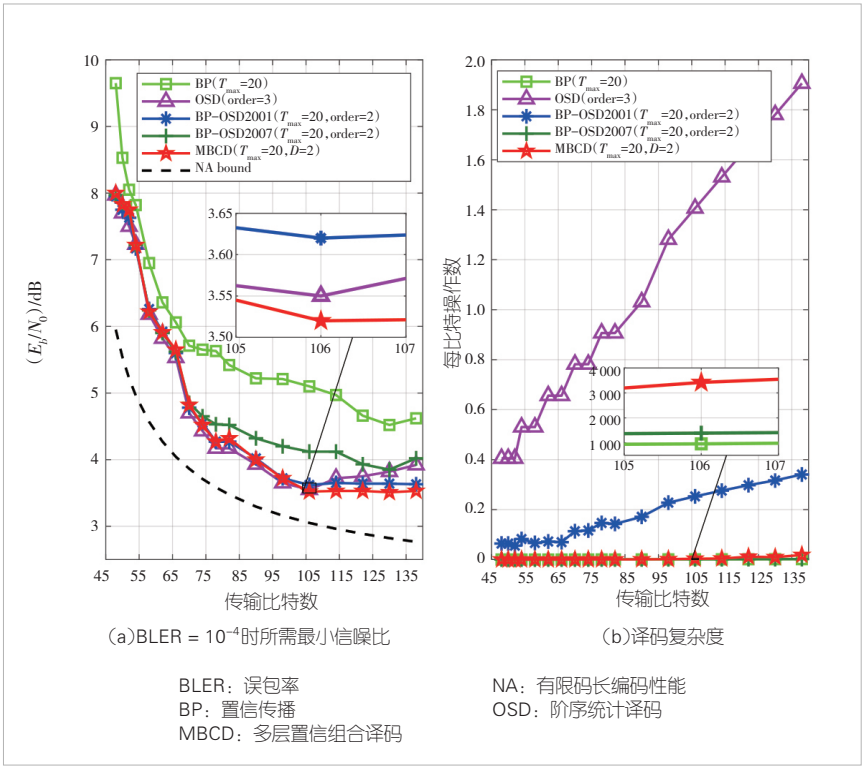
▲图8 采用MBCD的5G标准LDPC码性能仿真(2)

过仿真可以看出，与其他BP-OSD译码算法相比，所提的MBCD更接近NA界，并且在各种码率下具有较低的复杂度，尤其是在低码率范围内，这表明MBCD在RC编码方案上具有出色的性能。

5 面向星地通信链路的FPGA样机研制

为验证本文所提出的MBCD算法在高动态、大尺度变化的低轨星地链路下的实际性能，展现其与低轨星地接收机中其他信号处理算法结合后的实际效果，我们基于MBCD算法研制了低轨星地通信FPGA样机，并利用样机与卫星信道模拟器搭建了半实物验证系统，在桌面端完成了MBCD算法的低轨星地通信仿真实验。

不同于高轨同步卫星，低轨卫星具有与地面相对运动速度快、仰角变化大等特点。这个意味着在低轨卫星与地面进行通信的过程中，信道一直处于高动态、大尺度的变化中，这对星地通信设备的设计提出了更高的要求。图10为半实物验证系统结构，主要包括MBCD样机、信道模拟器、卫星仿真软件。MBCD样机采用成都定为电子的U3-CPCI高性能处理平台和FMC205S双通道9371射频收发子卡实现，发送链路可对测试序列进行编码并产生发射信号，接收链路可对接收信号进行时频域信号处理、解调、译码，最后进行误码统计。信道模拟器采用坤恒顺维的KSW-WNS02B深空信道

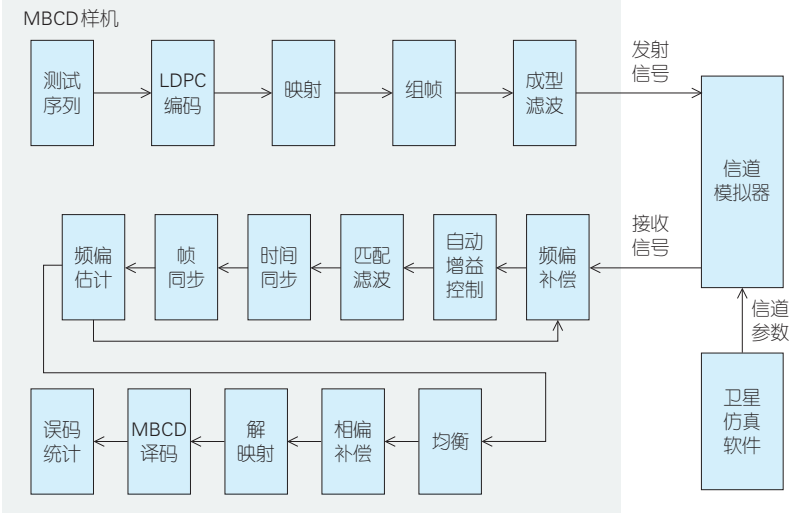


（a）BLER = 10^{-4}时所需最小信噪比　（b）译码复杂度

BLER：误包率
BP：置信传播
MBCD：多层置信组合译码

NA：有限码长编码性能
OSD：阶序统计译码

▲图9　BLER = 10^{-4}且k = 45时，5G标准LDPC码在不同码率下需要的最小E_b/N_0和译码复杂度



LDPC：低密度奇偶校验　MBCD：多层置信组合译码

▲图10　半实物验证系统结构

模拟器，可以模拟真实的低轨星地链路。该模拟器支持对多普勒频移、动态时延、信噪比等多种信道参数的设置，支持自定义信道文件导入。卫星仿真软件采用美国Analytical Graphics公司的STK软件，可根据卫星轨道信息仿真得到信道模拟器所需的信道参数文件。

针对低轨星地链路的信道特点，样机先对接收信号进行一系列时频域信号处理，消除高动态、大尺度变化的信道所带来的影响，然后解映射得到比特软信息，并进行MBCD译码。其中，FPGA样机的关键时频域信号处理包括以下几个方面：

1）时间同步：我们采用了Gardner定时恢复算法[16]使插值时刻尽可能接近于最佳采样点。

2）频偏估计与补偿：为兼顾低轨星地链路频偏范围大、估计精度要求高的特点，我们采用大范围粗估计与高精度精估计相结合的结构。频偏粗估计由锁频环实现，精频偏估计由L&R算法[17]实现，该算法在低信噪比下依然能保持较高的估计精度。

3）均衡与相偏补偿：为了消除射频器件的带内幅相不一致、信道衰落所导致的码间串扰，我们采用了适用于恒包络调制方式的恒模算法[18]（CMA）对信号进行均衡。

基于上述半实物验证系统，MBCD算法与面向星地通信的时频域信号处理算法结合后具有良好性能，可以提高低轨星地通信场景的传输可靠性。

6 结束语

面向未来卫星互联网宽窄带结合的业务类型，如何在卫星有限通信时间内传输更多、更有价值的星上数据是中国星地通信系统亟需解决的一大难题。本文对速率兼容LDPC编码方案进行了一种优化译码算法的开发（MBCD），通过级联BP和新型比特翻转译码思想（FWB-OSD），可以提升星地通信场景中短数据包业务在物理层单次传输的可靠性。未来，基于FWB-OSD思想可以进一步针对极化码、Turbo码的专用译码算法（SCL译码，维特比译码）进行级联算法的开发，同时结合上层接入机制，设计接收端高可靠的用户-信道联合译码技术。

致谢

实验工作是由鹏城实验室马骋团队完成的。感谢马骋工程师对本研究的帮助！

参考文献

[1] FOSSORIER M P C, LIN S. Soft-decision decoding of linear block codes based on ordered statistics [J]. IEEE transactions on information theory, 1995, 41(5): 1379-1396. DOI: 10.1109/18.412683

[2] ZHANG K, JIAO J, HUANG Z X, et al. Finite length analog fountain codes for ultra-reliable low latency communications [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(3): 1391-1404.

[3] VAN WONTERGHEM J, ALLOUM A, BOUTROS J J, et al. On short-length error-correcting codes for 5G-NR [J]. Ad hoc networks, 2018, 79: 53-62. DOI: 10.1016/j.adhoc.2018.06.005

[4] WANG F, JIAO J, ZHANG K, et al. Self-adaptive ordered statistics decoder for finite block length raptor codes toward URLLC [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(5): 3282-3297. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3097948

[5] YUE C T, SHIRVANIMOGHADDAM M, PARK G, et al. Probability-based ordered-statistics decoding for short block codes [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(6): 1791-1795. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3058978

[6] LIANG J F, WANG Y W, CAI S H, et al. A low-complexity ordered statistic decoding of short block codes [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(2): 400-403. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3222819

[7] FOSSORIER M P C. Iterative reliability-based decoding of low-density parity check codes [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2001, 19(5): 908-917. DOI: 10.1109/49.924874

[8] JIANG M, ZHAO C M, XU E Y, et al. Reliability-based iterative decoding of LDPC codes using likelihood accumulation [J]. IEEE communications letters, 2007, 11(8): 677-679. DOI: 10.1109/LCOMM.2007.070450

[9] ZHANG Y S, JIAO J, ZHANG K, et al. Synodic period channel modeling and coding scheme for deep space optical communications [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2024, 60(2): 2364-2378. DOI: 10.1109/TAES.2024.3353726

[10] DUFFY K R, LI J G, MÉDARD M. Guessing noise, not code-words [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 671-675. DOI: 10.1109/ISIT.2018.8437648

[11] DUFFY K R, LI J G, MÉDARD M. Capacity-achieving guessing random additive noise decoding [J]. IEEE transactions on information theory, 2019, 65(7): 4023-4040. DOI: 10.1109/TIT.2019.2896110

[12] DUFFY K R, MÉDARD M, AN W. Guessing random additive noise decoding with symbol reliability information (SRGRAND) [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(1): 3-18. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3114315

[13] DUFFY K R, AN W, MÉDARD M. Ordered reliability bits guessing random additive noise decoding [J]. IEEE transactions on signal processing, 2022, 70: 4528-4542. DOI: 10.1109/TSP.2022.3203251

[14] ZHANG K, LI C J, JIAO J, et al. A novel ultra-reliable decoder of short rate-compatible codes for mission critical communications [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024(99): 1-5. DOI: 10.1109/TVT.2024.3443136

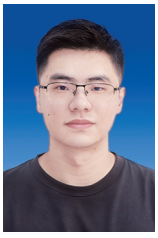
[15] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDU S. Channel coding rate in the finite blocklength regime [J]. IEEE transactions on information theory, 2010, 56(5): 2307-2359. DOI: 10.1109/TIT.2010.2043769

[16] GARDNER F M. Interpolation in digital modems [J]. IEEE transactions on communications, 1993, 41(3): 501-507. DOI: 10.1109/26.221081

[17] LUISE M, REGGIANNINI R. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions [J]. IEEE transactions on communications, 1995, 43(2/3/4): 1169-1178. DOI: 10.1109/26.380149

[18] GODARD D. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems [J]. IEEE transactions on communications, 1980, 28(11): 1867-1875. DOI: 10.1109/TCOM.1980.1094608

作 者 简 介



张可，鹏城实验室助理研究员；主要研究领域为信道编码、随机接入等；先后主持和参加基金项目3项；已发表论文10余篇。



林文超，鹏城实验室工程师；主要研究领域为FPGA系统开发与算法工程实现。



王野，鹏城实验室空天通信技术研究所所长、副研究员；主要研究领域为新一代卫星通信系统与协议设计；主持或参与国家级重大科研项目10余项，先后获得广东省科技进步奖三等奖（排名第3）、深圳市自然科学奖一等奖（排名第3）；发表学术论文80余篇，授权国家发明专利30余项。

基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知方法

Multi-Satellite Collaborative Compressive Sensing Method Based on Walk-Incremental Strategy

侯彦鹏/HOU Yanpeng[1,2]，马媛/MA Yuan[1,2]，张行健/ZHANG Xingjian[3]
（1. 深圳大学电子与信息工程学院，中国 深圳 518060；
2. 广东省智能信息处理重点实验室，中国 深圳 518060；
3. 哈尔滨工业大学（深圳），中国 深圳 518055）
(1. College of Electronic and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Shenzhen 518060, China;
3. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405007
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1346.004.html
网络出版日期：2024-10-17
收稿日期：2024-08-05

摘要：利用低轨卫星的大规模星座优势，建立多星协同感知系统成为当前研究热点。针对传统集中式协作星间传输负载高以及中心节点故障对频谱监测的影响，提出了一种在轨组阵压缩感知方法。所提算法首先通过在轨宽带压缩采样，降低星上宽带信号采集的硬件成本与传输开销；之后根据各卫星节点的低维采样值，基于增量游走策略，顺序激活各卫星节点，以递增的方式进行协作迭代更新。基于低轨星座多重覆盖观测的互补性优势，运用多星在轨协作优化提高低信噪比下的频谱感知性能。仿真结果表明，与传统集中式协作优化算法相比，所提算法在降低计算复杂度的同时提升了频谱感知效能。

关键词：低轨卫星；多星协作；宽带压缩采样；增量游走策略

Abstract: Leveraging the large-scale constellations of low earth orbit (LEO) satellites to develop a multi-satellite cooperation system has become a research focus. This paper proposes an on-orbit compressive sensing method to address the high transmission load of traditional centralized inter-satellite communication and the impact of central node failures on spectrum monitoring. The proposed algorithm first reduces hardware cost and transmission overhead for onboard wideband signal acquisition through on-orbit wideband compressive sensing. Then, using the sub-Nyquist sampling data from each satellite node and following a walk incremental strategy, the satellite nodes are sequentially activated for collaborative iterative updates. By exploiting the complementary advantages of multi-cover observation within the LEO constellation, multi-satellite cooperation on-orbit optimization enhances spectrum sensing performance under low signal-to-noise ratios. Simulation results demonstrate that, compared to traditional centralized cooperative optimization algorithms, the proposed method reduces computational complexity while improving spectral sensing efficiency.

Keywords: low earth orbit satellite; multi-satellite cooperation; wideband compressive sensing; walk-incremental strategy

引用格式：侯彦鹏, 马媛, 张行健. 基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知方法 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 41-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405007
Citation: HOU Y P, MA Y, ZHANG X J. Multi-satellite collaborative compressive sensing method based on walk-incremental strategy [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 41-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405007

1 研究背景

为实现全球泛在连接，信息服务网络将向海洋、沙漠、山区等更广阔的区域推进，利用低轨卫星建设空天地海一体化感知通信网是维护国家权益的必要保障。相比于地面电磁频谱监测体系有限的监测范围，基于低轨（LEO）卫星的天基电磁频谱监测系统利用卫星平台的高度优势可以提供大尺度范围下经济快速的频谱监测[1-2]。然而受限于LEO卫星运行特性与硬件能力的制约，单颗卫星过顶时间短、计算资源不足，无法满足广域范围下的电磁频谱监测任务。通过星地协同网络将计算任务卸载到地面计算中心，虽然能有效地降低卫星端的计算负担，提高频谱感知性能，但星地之

基金项目：国家自然科学基金项目（62101295）；中国科协青年人才托举工程项目（2020ONRC001、2023ONRC001）；深圳市科技计划资助项目（ZDSYS20220527171402005）

间的远距离传输会带来较大的通信开销。因此，利用LEO卫星星座的优势，探索基于多星在轨协作的频谱感知技术成为当前研究热点。

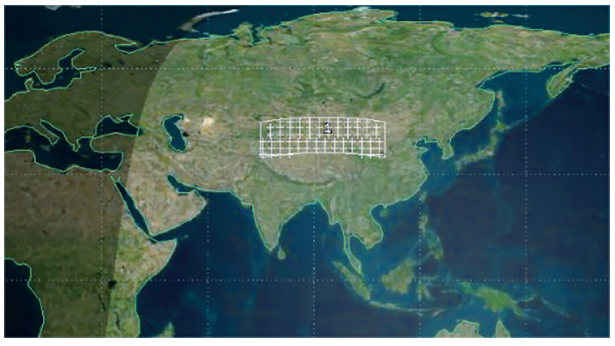
近年来，天基电磁频谱监测系统受到了全球各国的广泛关注[3]。当前，国外天基电磁频谱监测系统主要包括卢森堡的“Kleos Space”[4]、法国的“UnseenLabs”[5]与美国的“鹰眼（HawkEye）360”[6]。其中鹰眼360是全球首个商业天基电磁频谱监测星座，有效助力了陆地及海上关键区域的频谱探测，在维护全球用频安全与频谱秩序方面具有巨大潜力。在天基探测和遥感领域，中国也相继推出了“天地一体化无线电信号监测系统”“智能频谱管理与认知无线电技术研发”等重大专项建设[7]。在商用天基电磁监测系统建设方面，“吉林一号”卫星星座发展迅猛，目前在轨卫星数量已达108颗，成为全球最大的亚米级商业遥感卫星星座[8]，显著增强了中国在天基监测领域的国际竞争力。

迅速发展的微纳卫星技术凭借其高集成度、低费效比、短研制周期等优势[9]，极大促进了大规模天基电磁频谱监测星座的形成。为满足全天候宽带电磁频谱实时感知的需求，实现宽频带范围内的信号采集对天基电磁频谱监测至关重要。然而受卫星载荷性能和功率限制，高速宽带信号采样与处理难以在微纳低轨卫星上实现。近年来，压缩感知技术的兴起为宽带电磁频谱监测提供了新的解决思路[10-11]。在天基广域电磁频谱监测范围下，电磁频谱呈现出大带宽、大空间分布特点。在广域观测范围内，尽管可能存在多个辐射源，但相对于整个观测空间而言，这些辐射源的数量和其占有的频段是有限的。因此，所观测的宽带信号在频域和空域下呈现出稀疏分布的特点[12]，为压缩感知技术的应用提供了基础。然而，传统的压缩感知技术通常在物理硬件上难以实现[13]，如高斯随机测量矩阵、伯努利随机测量矩阵等。为解决这一问题，多陪集采样[14]、随机解调采样器[15]和调制宽带转换器[16]等硬件可实现的宽带压缩采样技术被陆续提出。这种硬件可实现的宽带压缩采样架构，以较低的硬件复杂度和采样速率实现了对宽带信号的瞬时抓取，有效提高了天基电磁频谱的感知性能。

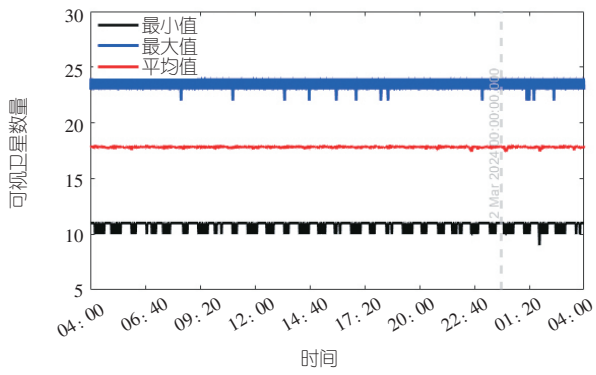
受限于LEO卫星单星视角与载荷能力的限制，单星感知能力不足，难以实现对广域复杂电磁环境的高精度实时监测。受益于日趋密集的LEO卫星星座，不同轨道的卫星可以形成相互协调支持的卫星集群。如图1所示，同一区域内的设备终端同时被多颗卫星覆盖，部分区域同时可视卫星数量多达24颗左右。随着低轨卫星星座规模的不断扩大，多星共视数量必将进一步增加。因此挖掘LEO卫星星座的规模优势，利用多星共视的空间分集增益可以进一步提高天基电磁频谱的监测性能。

根据协作卫星间数据融合的不同方式，多星协作的频谱感知方案可划分为决策级融合和信号级融合[17-18]。决策级融合的网络传输成本低，但由于受到各卫星独立感知能力的限制，频谱感知性能的提升空间有限；信号级融合将采样数据传输至中心卫星进行融合处理，因此可以获得更高的感知精度，但其需要更高的传输带宽。此外，信号级融合中通常采用集中式协作网络架构，通过一个具有先进计算能力的中心卫星负责汇聚和处理边缘卫星数据，然而大量集中性并发数据流的接收会造成星间链路的严重拥塞[19-20]。此外，当中心卫星节点出现故障或性能下降时，集中式协作网络的频谱感知能力也会受到严重影响。

本文面向LEO卫星星群，提出了一种多星在轨组阵压缩感知方法。各卫星节点通过宽带压缩采样技术，有效降低了在轨采样速率和星间链路的传输开销。以此为基础，所提算法通过顺序逐个激活卫星节点，将原本集中在中心卫星的处理任务分散于多个卫星节点上，以递增的方式进行协作迭代更新。因此，相较于传统的集中式协作优化算法，所提算法有效解决了星间链路的拥塞问题，并通过多星在轨协作优



（a）仿真覆盖区域（N35°~N45°，E75°~E110°）



（b）仿真区域一天时间内可视卫星数量

▲图1　Starlink GEN2星座可视卫星数量仿真分析

化提高了低信噪比下的频谱感知性能。

2 系统模型

为提升天基电磁频谱监测性能，宽带信号的高效采集与处理至关重要。然而，传统的奈奎斯特采样技术会产生海量的测量数据，极大增加了数据的存储与传输开销，由于卫星载荷性能与功率受限，其在卫星上难以实现。为此，本文采用如图2所示的多陪集压缩采样技术，通过多通道并行低速模数转换器（ADC）采样架构实现了宽带模拟信号的压缩采样，有效降低了降低星上宽带信号采集的硬件成本，减少了采集与传输开销。

基于多陪集压缩采样技术，第l颗卫星的观测信号可表示为：

$$\boldsymbol{y}_l = \mathbf{A}\underbrace{(\boldsymbol{H}_l\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_l)}_{\boldsymbol{x}},\quad l \in \{1,2,\cdots L\}, \tag{1}$$

其中，$\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M\times N}$表示卫星的在轨宽带压缩测量矩阵，$\boldsymbol{H}_l \triangleq \mathrm{diag}(\boldsymbol{h}_l)$表示地面终端与第$l$颗卫星间的信道矩阵[21]，$\boldsymbol{x} \in \mathbb{C}^{N\times 1}$表示地面原始用户信号，$N$表示信号长度，$\boldsymbol{n}_l \sim \mathcal{CN}(0,\sigma_l^2)$表示第$l$颗卫星的接收噪声，$\boldsymbol{x} \triangleq \boldsymbol{H}_l\boldsymbol{x} + \boldsymbol{n}_l$是卫星未经压缩采样前的信号。

如图3所示，各卫星完成空间宽带电磁信号的在轨压缩采样后，将采集到的信号转发给中心卫星。考虑卫星编队到地面的距离远大于其星间距离，因此同一辐射源所发信号到达不同编队卫星的时延和多普勒频移大致相同。假设第L颗卫星是融合中心，负责汇聚并处理编队中所有卫星节点的数据。定义中心卫星的接收信号$\mathbf{z}_L = \left[\boldsymbol{y}_1^{\mathrm{H}},\boldsymbol{y}_2^{\mathrm{H}},\cdots,\boldsymbol{y}_L^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}} \in \mathbb{C}^{LM\times 1}$，其可表示为：

$$\mathbf{z}_L = \mathbf{G}_L\boldsymbol{x} + \mathbf{W}_L, \tag{2}$$

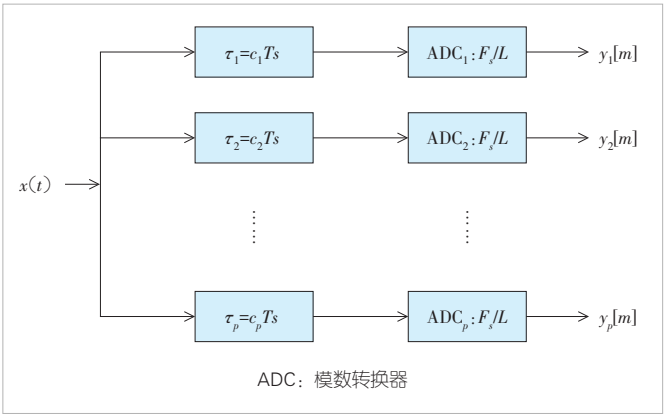
其中，$\mathbf{G}_L = \left[(\mathbf{A}\boldsymbol{H}_1)^{\mathrm{H}},(\mathbf{A}\boldsymbol{H}_2)^{\mathrm{H}},\cdots,(\mathbf{A}\boldsymbol{H}_L)^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}} \in \mathbb{C}^{LM\times N}$表示增广信道矩阵，$\mathbf{W}_L = \left[(\mathbf{A}\boldsymbol{n}_1)^{\mathrm{H}},(\mathbf{A}\boldsymbol{n}_2)^{\mathrm{H}},\cdots,(\mathbf{A}\boldsymbol{n}_L)^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}}$表示增广噪声矩阵。在此基础上，融合中心卫星通过$l_1$范数最小化的稀疏重构优化求解感知信号$\boldsymbol{x}$，即可表示为：

$$\underset{\boldsymbol{x}}{\mathrm{minimize}}\ \frac{1}{2}\left\|\mathbf{A}\boldsymbol{x} - \mathbf{V}_L\mathbf{z}_L\right\|^2 + \mu\left\|\boldsymbol{x}\right\|_1, \tag{3}$$

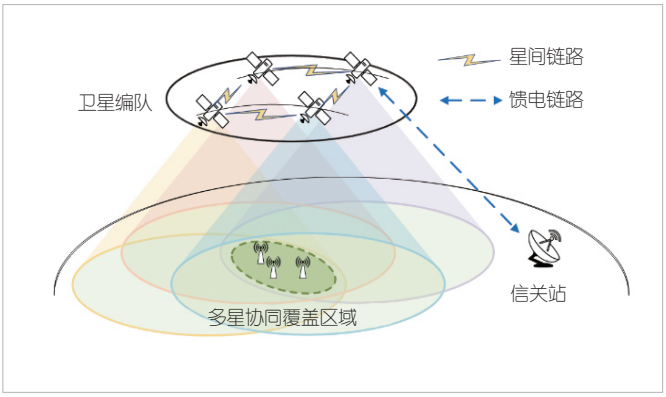
其中，$\mathbf{V}_L \in \mathbb{C}^{M\times LM}$表示对$L$颗卫星采样数据的接收组合矩阵，用于对不同卫星的数据进行加权融合。为进一步提高在轨组阵感知性能，本文根据不同卫星的接收信号优化接收组合矩阵$\mathbf{V}_L$，以进一步提高天基频谱系统的监测性能。

在传统的如图4所示的集中式卫星网络架构中，各边缘卫星完成空间在轨压缩采样后，将压缩采样数据和本地信道状态信息转发给中心卫星。定义中心卫星上的融合信号为：

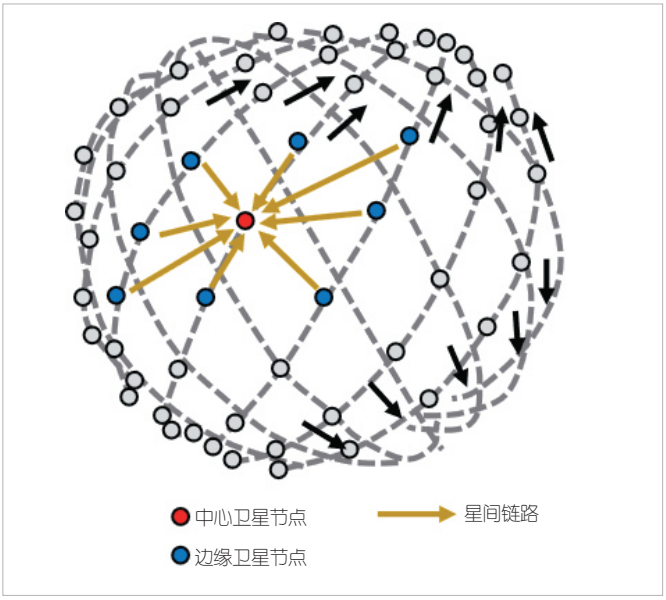
$$\mathbf{s}_L^c \triangleq \mathbf{V}_L^c\mathbf{z}_L, \tag{4}$$



▲图2　多陪集压缩采样架构



▲图3　多星在轨组阵感知系统模型.



▲图4　集中式协作卫星网络

其中，c表示集中式的感知方案。针对多星低维观测的稀疏汇聚网络，基于最小线性均方误差（LMMSE）准则[22]，可以得到最优接收组合矩阵$\mathbf{V}_L^c$为：

$$\mathbf{V}_L^c = \mathbf{A}\mathbf{R}_{\boldsymbol{x}}\mathbf{G}_L^{\mathrm{H}}\mathbf{R}_{\mathbf{z}_L}^{-1}, \tag{5}$$

其中，$\mathbf{R}_{\mathbf{Z}_L} \triangleq \mathbb{E}[\mathbf{z}_L\mathbf{z}_L^{\mathrm{H}}] = \mathbf{G}_L\mathbf{R}_{\boldsymbol{x}}\mathbf{G}_L^{\mathrm{H}} + \mathbf{K}$表示接收信号的自相关矩阵，$\mathbf{K} = \mathrm{diag}(\sigma_1^2\mathbf{I}_M,\sigma_2^2\mathbf{I}_M,\cdots,\sigma_L^2\mathbf{I}_M)$。若仅考虑自由空间路径损耗则$\boldsymbol{H}_l = h_l\boldsymbol{I}_N$，$h_l$为基于自由空间损耗的信道系数，根据$\mathbf{R}_{\mathbf{Z}_L}$和$\mathbf{R}_{\boldsymbol{x}}$之间的关系，公式（5）可进一步表示为：

$$\mathbf{V}_L^c = \mathbf{F}_L^{\dagger}\left(\mathbf{R}_{\mathbf{z}_L} - \mathbf{K}\right)\mathbf{R}_{\mathbf{z}_L}^{-1}, \tag{6}$$

其中，$\mathbf{F}_L = \left[\left(h_1\mathbf{I}_M\right)^{\mathrm{H}},\left(h_2\mathbf{I}_M\right)^{\mathrm{H}},\cdots,\left(h_L\mathbf{I}_M\right)^{\mathrm{H}}\right]^{\mathrm{H}} \in \mathbb{C}^{LM\times M}$。中心卫星在计算出接收组合矩阵后，基于公式（3）进行原始信号重构。然而，集中式协作网络面临星间链路拥塞、星上计算资源受限以及中心节点故障等问题。为此，在下一节中，本文提出了一种基于增量游走策略的多星在轨组阵感知算法。

3 基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知算法

针对集中式协作星间传输负载高、中心节点故障对天基电磁频谱监测的影响，本节提出了一种在轨组阵压缩感知算法。该算法顺序激活各个卫星节点以递增的方式进行协作迭代更新。基于LMMSE估计的正交性原理，每次迭代更新的卫星节点能够有效地利用前一节点传递的融合信号和误差矩阵，来进一步修正和优化感知结果，从而逐渐提升系统的感知精度。图5展示了卫星按顺序(1,5,2,3,6,9,8,7,4)的更新过程。由于每次更新仅激活一颗卫星和一条星间链路，有效避免了集中性并发数据流造成的链路拥塞问题。

具体来说，在一个由L颗低轨卫星构成的编队中，首先从卫星l_0开始计算融合信号，因此该初始卫星节点的融合信号可表示为：

$$\mathbf{s}_{l_0}^{(0)} = \mathbf{B}_{l_0}^{(0)}\boldsymbol{y}_{l_0}, \quad l_0 = Seq(1), \tag{7}$$

其中，$\mathbf{B}_{l_0}^{(0)} \in \mathbb{C}^{M\times M}$表示起始卫星处的接收组合矩阵，$Seq \in \mathbb{Z}^{L\times 1}$表示卫星更新顺序集，$Seq(1)$表示该集合中的第一个元素。随后，卫星$l_0$将公式（7）中的融合信号和本地均方误差矩阵依次转发给后继卫星节点l_k，$k = 1,2,\cdots$。后继卫星节点l_k利用接收的信息进行融合，具体融合结果可表示为：

$$\mathbf{s}_{l_k}^{(k)} = \mathbf{C}_{l_k}^{(k)}\mathbf{s}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)} + \mathbf{B}_{l_k}^{(k)}\boldsymbol{y}_{l_k}, \quad l_k = Seq\left(\mathrm{mod}_L(k)+1\right), \tag{8}$$

其中，$\mathbf{C}_{l_k}^{(k)}$和$\mathbf{B}_{l_k}^{(k)}$是根据前一颗卫星传递的信息计算得到的权重矩阵，k表示更新次数。公式(8)可等价写成公式（4）的形式：

$$\mathbf{s}_{l_k}^{(k)} = \mathbf{V}_{l_k}^{(k)}\mathbf{Z}_k, \tag{9}$$

其中，

$$\mathbf{V}_{l_k}^{(k)} = \begin{cases}\left[\mathbf{C}_{l_k}^{(k)}\mathbf{V}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}, \mathbf{B}_{l_k}^{(k)}\right], & k > 0,\\ \mathbf{B}_{l_k}^{k}, & k = 0,\end{cases}$$

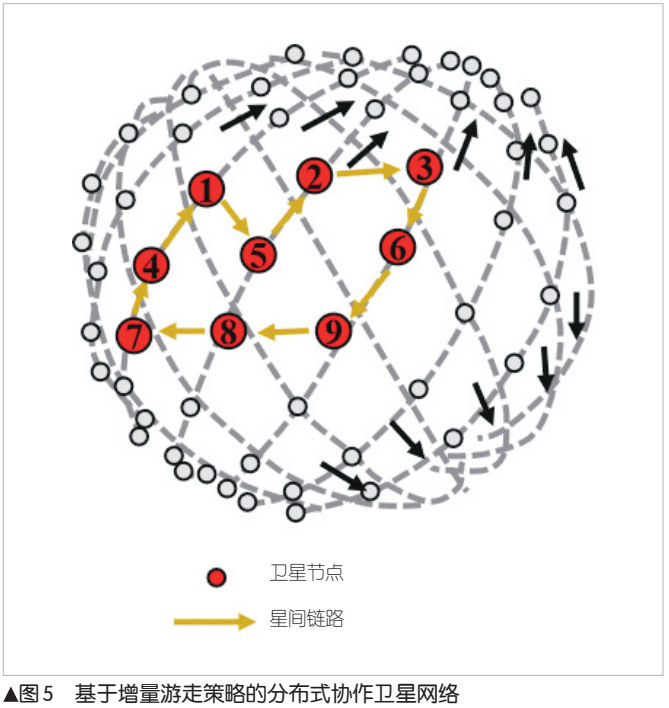
$$\mathbf{Z}_k = \left[\mathbf{z}_0, \mathbf{z}_1, \cdots, \mathbf{z}_k\right]^T, \quad \mathbf{z}_k = \boldsymbol{y}_{l_k}^T. \quad 。 \tag{10}$$

接下来，我们以前两次更新为例，给出权重矩阵$\mathbf{C}_{l_k}^{(k)}$和$\mathbf{B}_{l_k}^{(k)}$的具体形式，并将其推广至$k \in \{0,1,2,\cdots\}$的一般形式。首先从$k = 0$开始，卫星l_0利用本地观测信号和信道状态信息，得到基于LMMSE 准则的融合信号为：

$$\mathbf{s}_{l_0}^{(0)} = \mathbf{R}_{\mathbf{s}\boldsymbol{y}_{l_0}}\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}^{-1}\boldsymbol{y}_{l_0}, \quad l_0 = Seq(1), \tag{11}$$

其中，$\mathbf{R}_{\boldsymbol{xy}} \triangleq \mathbb{E}\left[\boldsymbol{x}\boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}\right]$为随机向量$\boldsymbol{x}$和$\boldsymbol{y}$的互相关矩阵，$\mathbf{s} = \mathbf{A}\boldsymbol{x}$。由此可知，权重矩阵$\mathbf{C}_{l_0}^{(0)} = 0$，$\mathbf{B}_{l_0}^{(0)} = h_{l_0}\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}^{-1}$，其中，$\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{\boldsymbol{x}}\mathbf{A}^{\mathrm{H}} = \left(\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}} - \sigma_{l_0}^2\mathbf{I}_M\right)/h_{l_0}^2$。此时融合信号的误差为$\Delta_{l_0}^{(0)}$，其表示未能通过当前节点信息获取的内容。

由于LMMSE的估计误差向量与观测数据通常是正交的，利用这一性质可以基于卫星l_1的观测数据对$\Delta_{l_0}^{(0)}$进行估计，并进一步得到卫星l_1的本地权重矩阵$\mathbf{C}_{l_1}^{(1)}$和$\mathbf{B}_{l_1}^{(1)}$。这个过程



▲图5　基于增量游走策略的分布式协作卫星网络

将分两步得到：

1）在给定 $\boldsymbol{y}_{l_0}$ 的情况下得到 $\boldsymbol{y}_{l_1}$ 的LMMSE估计值：

$$\hat{\boldsymbol{y}}_{l_1}=\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_1}\boldsymbol{y}_{l_0}}\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}^{-1}\boldsymbol{y}_{l_0}=h_{l_1}\mathbf{R}_{\mathbf{s}\boldsymbol{y}_{l_0}}\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}^{-1}\boldsymbol{y}_{l_0}=h_{l_1}\hat{\mathbf{s}}_{l_0}^{(0)}。\tag{12}$$

2）根据与 $\boldsymbol{y}_{l_0}$ 正交的估计误差 $\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}=\boldsymbol{y}_{l_1}-\hat{\boldsymbol{y}}_{l_1}$ 得到 $\Delta_{l_0}^{(0)}$ 的LMMSE估计值：

$$\hat{\mathbf{s}}_{l_1}^{(1)}=\underbrace{h_{l_1}\underbrace{\left(\mathbf{I}_M-\mathbf{T}_{l_0}^{(0)}h_{l_0}^{*}\right)\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}}_{\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}}}_{\mathbf{R}_{\mathbf{s}\boldsymbol{y}_{l_1}}}\underbrace{\left(\sigma_{l_1}^2\mathbf{I}_M+h_{l_1}\left(\underbrace{\left(\mathbf{I}_M-\mathbf{T}_{l_0}^{(0)}h_{l_0}^{*}\right)\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}}_{\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}}\right)h_{l_1}^{*}\right)^{-1}}_{\mathbf{R}_{\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}}^{-1}}\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}=$$

$$h_{l_1}\mathbf{P}_{l_0}\left(\sigma_{l_1}^2\mathbf{I}_M+h_{l_1}\mathbf{P}_{l_0}h_{l_1}^{*}\right)^{-1}\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}。\tag{13}$$

其中，$\mathbf{T}_{l_0}^{(0)}=\mathbf{B}_{l_0}^{(0)}=h_{l_0}\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}^{-1}$ 表示卫星 l_0 处的接收组合矩阵，$\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}$ 是卫星 l_0 处的最小均方误差（MSE）矩阵。令 $\mathbf{T}_{l_1}^{(1)}=h_{l_1}\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}\left(\sigma_{l_1}^2\mathbf{I}_M+h_{l_1}\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}h_{l_1}^{*}\right)^{-1}=h_{l_1}\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}\mathbf{R}_{\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}}^{-1}$，其中，$\mathbf{R}_{\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}}^{-1}$ 为卫星 l_1 中估计误差向量 $\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_1}$ 的自相关矩阵。则卫星 l_1 处的融合信号可表示为：

$$\mathbf{s}_{l_1}^{(1)}=\mathbf{s}_{l_0}^{(0)}+\mathbf{T}_{l_1}^{(1)}\left(\boldsymbol{y}_{l_1}-h_{l_1}\mathbf{s}_{l_0}^{(0)}\right)=\underbrace{\left(\mathbf{I}_M-h_{l_1}\mathbf{T}_{l_1}^{(1)}\right)}_{\mathbf{C}_{l_1}^{(1)}}\mathbf{s}_{l_0}^{(0)}+\underbrace{\mathbf{T}_{l_1}^{(1)}}_{\mathbf{B}_{l_1}^{(1)}}\boldsymbol{y}_{l_1}。\tag{14}$$

从公式（14）可以发现，卫星 l_1 进行信号融合所需最少的辅助信息为 $\mathbf{P}_{l_0}^{(0)}$。这个想法可以推广至任意更新次数的情况，具体的权重矩阵 $\mathbf{C}_{l_k}^{(k)}$ 和 $\mathbf{B}_{l_k}^{(k)}$ 可以表示为：

$$\begin{aligned}&\mathbf{C}_{l_k}^{(k)}=\mathbf{I}_M-h_{l_k}\mathbf{T}_{l_k}^{(1)},\\&\mathbf{B}_{l_k}^{(k)}=\mathbf{T}_{l_k}^{(k)},\qquad l_k=Seq\left(\mathrm{mod}_L(k)+1\right),\end{aligned}\tag{15}$$

其中，

$$\mathbf{T}_{l_k}^{(k)}=h_{l_k}\mathbf{P}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}\left(\sigma_{l_k}^2\mathbf{I}_M+h_{l_k}\mathbf{P}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}h_{l_k}^{*}\right)^{-1}=h_{l_k}\mathbf{P}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}\mathbf{R}_{\tilde{\boldsymbol{y}}_{l_k}}^{-1},\tag{16}$$

$$\mathbf{P}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}=(\mathbf{I}_M-h_{l_{(k-1)}}\mathbf{T}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)})\mathbf{P}_{l_{(k-2)}}^{(k-2)},\ \mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}=\mathbf{A}\mathbf{R}_{\boldsymbol{x}}\mathbf{A}^{\mathrm{H}}。\tag{17}$$

因此，将公式（15）代入公式（8）中，可以得到第 k 次更新时对应卫星 l_k 的融合信号：

$$\mathbf{s}_{l_k}^{(k)}=\mathbf{s}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}+\mathbf{T}_{l_k}^{(k)}\left(\boldsymbol{y}_{l_k}-h_{l_k}\mathbf{s}_{l_{(k-1)}}^{(k-1)}\right)。\tag{18}$$

所提算法的伪代码如算法1所示。在第 k 次更新判定收敛后，卫星 l_k 将基于本地融合信号 $\mathbf{s}_{l_k}^{(k)}$ 和在轨宽带压缩测量矩阵 $\mathbf{A}$，利用压缩感知重构算法实现宽带电磁频谱监测的目标。该算法不仅传输融合信号，还在卫星之间传递MSE矩阵 $\boldsymbol{P}_{l_k}^{(k)}$。通过这种方式，所提算法确保了每颗卫星都能够充分利用前一个卫星节点的融合信号和MSE矩阵，逐步提高整体信号感知的精度，从而实现更高效的频谱监测。

算法 1：基于增量游走策略的多星在轨组阵压缩感知算法

1 初始化：$\mathbf{P}_{l_{-1}}^{(-1)}=\left(\mathbf{R}_{\boldsymbol{y}_{l_0}}-\sigma_{l_0}^2\mathbf{I}_M\right)/h_{l_0}^2$

2 重复：**for** $k=0,1,2,\cdots,$ **do**

3　卫星 $l_k=Seq\left(\mathrm{mod}_L(k)+1\right)$, **do**

4　更新 $\mathbf{T}_{l_k}^{(k)}$ 利用公式(16)；

5　更新 $\mathbf{P}_{l_k}^{(k)}$ 利用公式(17)；

6　更新 $\mathbf{s}_{l_k}^{(k)}$ 利用公式(18)；

7　发送 $\mathbf{P}_{l_k}^{(k)}$ 和 $\mathbf{s}_{l_k}^{(k)}$ 至卫星 $l_{(k+1)}$；

8 end

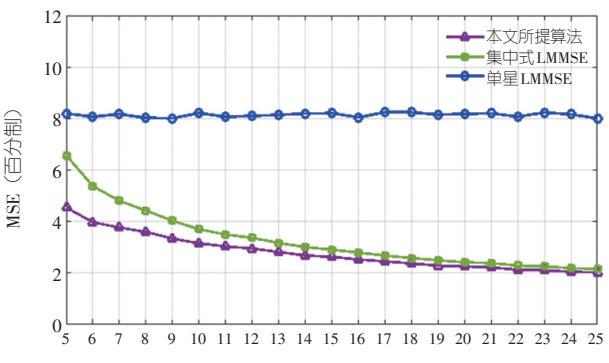
4 仿真与评估

本节仿真中假设在 t 时刻，卫星 l 上所接收到的来自地面 κ 个辐射源的信号可表示为：

$$x(t)=h_l(t)\sum_{i=1}^{\kappa}\sqrt{E_iB}\,\mathrm{sinc}\left(B\left(t-t_i\right)\right)e^{j2\pi f_it}+n_l(t),\tag{19}$$

其中 $\mathrm{sinc}(x)=\sin(x)/x$，$E_i$、$t_i$、$f_i$ 分别表示不同用频设备发送信号的能量、时延和对应载波频率，$n_l(t)$ 为加性高斯白噪声。

接下来，我们将重构信号的归一化均方误差（MSE）作为算法的评价性能指标。图6展示了当所有卫星节点接收信噪比为20 dB时，不同算法的感知性能随卫星数量变化的关系。可以观察到，所提算法在不同卫星数量下优于基于



LMMSE：最小线性均方误差　MSE：均方误差

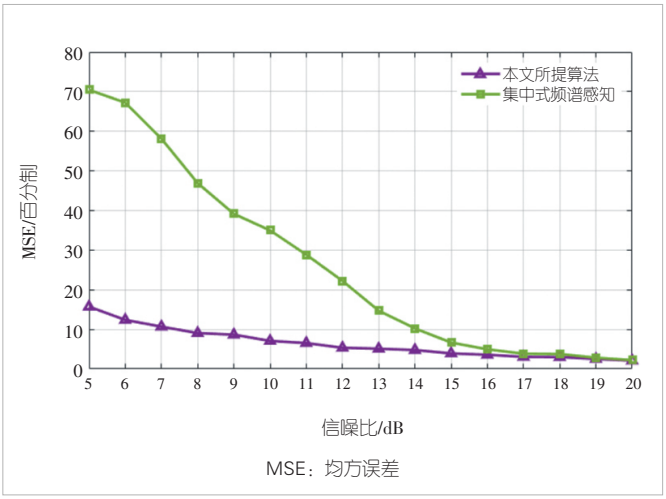
▲图6　相同信噪比条件下卫星编队规模与感知性能的关系

LMMSE准则的集中式方案，尤其是在卫星编队规模较小时，与其他两种感知方案相比，所提算法表现出更为突出的性能优势。随着卫星节点数量的增加，集中式算法与本文算法的性能基本趋于一致。然而，需要注意的是，在高密度卫星网络中，集中式算法可能会面临大量并发数据导致的星间链路拥塞问题。此外，目前常见的低轨卫星星座，例如Starlink，其单颗卫星通常只配备4个星间通信终端，远少于其可视范围内的卫星数量，这将进一步限制集中式协作优化算法在实际中的应用。

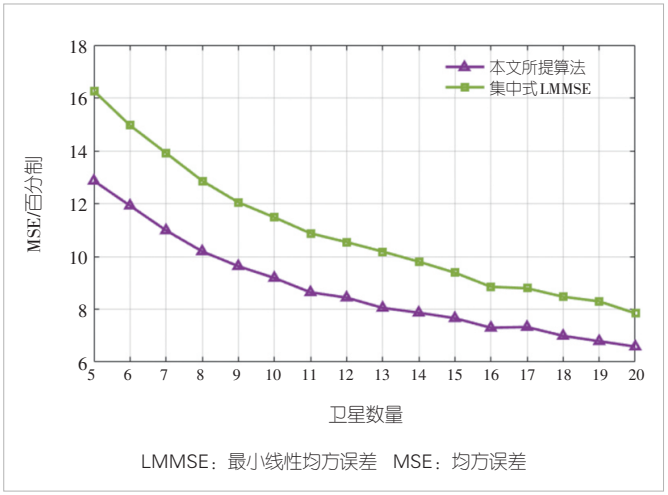
当固定卫星数量$L = 25$时，假设所有卫星节点具有相同的接收信噪比，本文算法与集中式方案的感知性能与接收信号信噪比的关系如图7所示，可以发现本文所提算法在低信噪比条件下具有较好的感知性能。

由于空间电磁环境复杂多变，实际卫星编队中各卫星间接收信号的信噪比可能存在较大差异，因此我们在仿真中设定每颗卫星接收到的信噪比取0～15 dB之间的随机值。在已有卫星编队的基础上，通过逐个增加新卫星，来扩大卫星编队规模。如图8所示，经过多次仿真实验，我们发现所提算法在不同信噪比条件下的感知性能也优于集中式协作方案。

在传统的集中式算法中，由于中心卫星需汇聚L颗卫星数据进行加权融合，所以需要对公式（6）中维度为$L \times M$的接收信号自相关矩阵进行求逆，其复杂度约为$\mathcal{O}(L^3M^3)$，其中M表示每颗卫星的采样数据量。由于其复杂度随着卫星数量L的增加呈立方级增长，因此限制了该方法在大规模卫星编队场景中的应用。相比之下，本文所提的增量式策略采用分布式处理架构，每次迭代仅需对公式（16）中维度为$M \times M$的误差自相关矩阵进行求逆，算法复杂度约为



▲图7　卫星接收信号信噪比与感知性能的关系.



▲图8　不同信噪比条件下卫星编队规模与感知性能的关系

$\mathcal{O}(M^3)$，这种分布式计算方式有效降低了多星协作方案的复杂度。

5 结束语

随着低轨卫星星座规模的不断扩大，多星协作感知能有效提高天基电磁频谱监测的感知性能。本文提出的多星在轨组阵压缩感知方案，首先通过宽带在轨压缩采样，降低采集与星间传输开销；之后通过增量游走策略顺序激活各卫星节点，以递增的方式进行协作迭代更新，有效解决了目前集中式协作中所存在高传输负载和中心节点故障的问题。基于低轨星座多重覆盖观测的互补性优势，提高了低信噪比下的频谱感知性能。仿真分析表明，所提方案相较集中式协作感知架构，在有效降低计算复杂度的同时提高了频谱感知精度。

参考文献

[1] CHU J H, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(3): 1959-1970. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3015995
[2] HUANG Y, CUI H Y, HOU Y Q, et al. Space-based electromagnetic spectrum sensing and situation awareness [J]. Space: science and technology, 2024, 4: 109. DOI: 10.34133/space.0109
[3] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1851-1865. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000803
[4] KLIMENKO N N, ZANIN K A. A new generation of spacecraft for maritime surveillance [J]. Air and space sphere, 2019(2): 72-82. DOI: 10.30981/2587-7992-2019-100-3-82-93
[5] Unseenlabs. Unseenlabs announces next-generation satellite constellation for 2026 to monitor sea, land, and space environments from space [EB/OL]. [2024-08-15]. https://unseenlabs. space/wp-content/uploads/2024/04/Press-Release-

UNSEENLABS-_-Next-Gen-Constellation_compressed.pdf
[6] Via Satellite. HawkEye 360 plans to have 60 satellites on orbit by 2025 [EB/OL]. [2024-08-15]. https://www. satellitetoday. com/imagery-and-sensing/2022/10/05/hawkeye-360-plans-to-have-60-satellites-on-orbit-by-2025
[7] 蒋忠元, 王森, 王启舟, 等. 低轨卫星多星协同及星地协同遥通算一体化技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 60-75. DOI: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024007
[8] 许文嘉, 王一旭, 彭木根. 卫星遥感与 6G 通信遥感一体化 [J]. 电信科学, 2023, 39(4): 60-70. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023089
[9] 夏瑞, 王敬超, 邓博于, 等. 低轨电磁监测智能处理框架与关键技术综述 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(5): 807-818. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.03.23.001
[10] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(2): 489-509. DOI: 10.1109/TIT.2005.862083
[11] FANG J, WANG B, LI H B, et al. Recent advances on sub-nyquist sampling-based wideband spectrum sensing [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(3): 115-121. DOI: 10.1109/MWC.001.2000353
[12] SHEN F, WANG Z, DING G R, et al. 3D compressed spectrum mapping with sampling locations optimization in spectrum-heterogeneous environment [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(1): 326-338. DOI: 10.1109/TWC.2021.3095342
[13] ISAAC-CHASSANDE V, EVANS A, DURAND Y, et al. Dedicated hardware accelerators for processing of sparse matrices and vectors: a survey [J]. ACM transactions on architecture and code optimization, 2024, 21(2): 1-26. DOI: 10.1145/3640542
[14] MA Y, GAO Y, LIANG Y C, et al. Reliable and efficient sub-nyquist wideband spectrum sensing in cooperative cognitive radio networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2016, 34(10): 2750-2762. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2605998
[15] TROPP J A, LASKA J N, DUARTE M F, et al. Beyond nyquist: efficient sampling of sparse bandlimited signals [J]. IEEE transactions on information theory, 2010, 56(1): 520-544. DOI: 10.1109/TIT.2009.2034811
[16] MISHALI M, ELDAR Y C. From theory to practice: sub-nyquist sampling of sparse wideband analog signals [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2010, 4(2): 375-391. DOI: 10.1109/JSTSP.2010.2042414
[17] 王运峰. 面向低轨卫星的协同频谱感知与共享技术研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2022. DOI: 10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.001798
[18] SHAIK Z H, BJÖRNSON E, LARSSON E G. MMSE-optimal sequential processing for cell-free massive MIMO with radio stripes [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7775-7789. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3100619
[19] ABDELSADEK M Y, KURT G K, YANIKOMEROGLU H. Distributed massive MIMO for LEO satellite networks [J]. IEEE open journal of the communications society, 2022, 3: 2162-2177. DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3219419
[20] 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
[21] SCHWARZ R T, KNOPP A, LANKL B, et al. Optimum-capacity MIMO satellite broadcast system: conceptual design for LOS channels [C]//Proceedings of 4th Advanced Satellite Mobile Systems. IEEE, 2008: 66-71. DOI: 10.1109/ASMS.2008.19
[22] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 77-90. DOI: 10.1109/TWC.2019.2941478

作 者 简 介



侯彦鹏，深圳大学电子与信息工程学院在读硕士研究生；主要研究领域为天基电磁频谱感知、分布式优化算法、稀疏信号处理等。



马嫄（通信作者），深圳大学电子与信息工程学院副教授、博士生导师；主要研究领域为空天地一体化智能信息网络、电磁频谱感知、稀疏信号处理等。



张行健，哈尔滨工业大学（深圳）电子与信息工程学院副教授、博士生导师；主要研究领域包括空天信息智能感知、电磁信号识别、卫星路由设计等。

一种基于OTFS调制的卫星车联网系统与性能评估

A Satellite-Based IoV System and Performance Evaluation with OTFS Modulation

马瞻希/MA Zhanxi，薛鉴哲/XUE Jianzhe，
周海波/ZHOU Haibo

（南京大学，中国 南京 210023）
(Nanjing University, Nanjing 210023, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405008
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241024.1226.004.html
网络出版日期：2024-10-24
收稿日期：2024-08-15

摘要：分析了卫星车联网（SIoV）场景的现状及星地信号传播所遇到的问题，研究利用正交时频空（OTFS）调制技术，设计并评估了基于SIoV传播信道的系统性能。此外，深入探讨了该信道在时间-频率域和时延-多普勒域的特性，并指出了OTFS调制的优势。仿真结果表明，OTFS调制在应对具有SIoV特性的信道时展现出卓越的性能稳健性。未来将进一步重点优化基于OTFS调制的系统设计，以便更好地提升SIoV中的高质量通信服务。

关键词：卫星车联网；信道分析；正交时频空；时延-多普勒域

Abstract: The current situation of satellite-based Internet of vehicles (SIoV) scenarios and the problems encountered in signal propagation are analyzed, the use of orthogonal time frequency space (OTFS) modulation technology to design is studied and the system performance based on the SIoV propagation channel is evaluated. Besides, we deeply explore the characteristics of the channel in the time-frequency domain and delay-Doppler domain, and point out the advantages of OTFS modulation. The simulation results show that OTFS modulation exhibits excellent robustness when dealing with channels with SIoV characteristics. Future work will focus on optimizing the system design based on OTFS modulation to further improve high-quality communication services in SIoV.

Keywords: satellite-based IoV; channel analysis; orthogonal time-frequency space division multiplexing; delay-Doppler domain

引用格式：马瞻希, 薛鉴哲, 周海波. 一种基于OTFS调制的卫星车联网系统与性能评估 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405008

Citation: MA Z X, XUE J Z, ZHOU H B. A satellite-based IoV system and performance evaluation with OTFS modulation [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 48-54. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405008

传统卫星通信常常因为其较高的延迟和较低的带宽，难以满足高速数据传输和车联网应用的需求。随着技术的进步，在第6代移动通信技术愿景中，以低地球轨道（LEO）卫星为代表的卫星网络逐渐与地面网络融合，为各个场景下的移动车联网终端提供无缝的通信服务[1-2]。在一个综合的卫星车联网（SIoV）通信系统中，终端之间的信号传播与地面网络中的信号传播显著不同[3]，这具体体现在：

1）卫星信道与地面信道的传播特性差异：卫星通信的空口时延和传播时延相对较高，并且大气衰减导致更大的路径损耗。此外，卫星信道在大多数通信频段下还具有较强的天气敏感性，会由于云雨衰落产生更复杂的衰落特性。

2）LEO卫星的动态特性：不同于地球同步轨道卫星，LEO卫星由于其高速移动，导致卫星过顶速度快，地面用户与卫星之间的高速相对运动会引发显著的多普勒频移。

为了克服这些挑战，SIoV通信需要在地面车联网系统的基础上进行适应性优化。目前的无线通信系统大多采用正交频分复用（OFDM）作为基础波形，其优势在于频谱效率高，能够有效抵抗多径效应，但在面对SIoV环境下由终端高速移动带来的多普勒频移时，载波间干扰（ICI）会破坏OFDM子载波之间的正交性，符号的设计变得更加困难，从而不可避免地引入额外信道开销并造成性能损失。

一个有效的应对措施是利用正交时频空分复用（OTFS）调制技术[4-5]，通过将信号映射到时延-多普勒（DD）平面，再通过DD域的信道估计和均衡等技术，更精确地估计信道

的失真影响并恢复发射信号，减少ICI的影响，为SIoV场景提供更加可靠的通信性能。近些年来，越来越多的学者开始在LEO场景中，对基于OTFS调制技术的系统进行性能分析。例如，文献[6]中在LEO通信中，利用了每个时延–多普勒路径的单一多普勒频移特性，使用一种参数化的方法细化信道估计性能，并提出一种基于最小二乘法的时间域信号检测方法。仿真结果表明，这一设计所能达到的性能能够接近完全已知信道条件下的性能。也有一些研究考虑了基于多输入多输出（MIMO）的OTFS系统性能。文献[7]中提出采用大规模MIMO可以提高频谱效率和分集性能。文献[8]在此基础上研究了在LEO系统中收发端空间相关的MIMO–OTFS系统并改善了LEO通信的误码率性能。有研究也证明了OTFS系统的优越性，例如文献[9]通过对比传统的OFDM调制，探讨了OTFS调制与卫星分集技术结合用于非地面网络的潜力。这些工作都验证了OTFS可以应用于卫星与地面用户的通信并带来性能提升，但他们大都采用统计信道模型，缺乏对具体时变信道衰减与高多普勒效应的建模，而这在验证实际的SIoV可靠传输过程中是不可或缺的。

总的来说，本文旨在分析低轨卫星车联网场景下，OTFS技术在面对高多普勒信道时的性能及现实应用前景。我们首先针对SIoV传播特性搭建了一个真实的信道仿真模型，在此基础上讨论了OTFS的基本原理和DD域上的信道特性，仿真对比了OTFS与OFDM在贴近真实信道条件下的可靠传输性能，最终验证说明了OTFS在面对具有高多普勒频移特性的SIoV信道条件时具有更好的可靠性和稳定性，能够显著提高系统的通信质量。

1 系统模型

1.1 SIoV信道模型

图1展示了一个LEO网络与地面车联网用户相结合的应用场景。卫星链路可以作为地面站覆盖不充分的补充覆盖链路，如在偏远地区，也可以当城市场景中地面站负载过高，带宽利用率降低时，作为协作链路，通过任务卸载的方式优化通信服务。

常见的仿真信道模型中，有统计信道仿真[10]和确定性信道仿真[11]。前者能够支持各种环境下的大规模信道建模，适应不同仿真场景的需求，但无法反映信道的具体物理环境特性，对动态场景的细节模拟有限；后者能够反映信道的具体物理环境特性，对动态变化的信道特性模拟精确，但仿真计算复杂度高，对大规模网络系统的整体性能评估能力有限。

对于SIoV这样的线性时变（LTV）信道系统来说，给定信号的载波频率f_c，我们重点关注的信道特性包括在该频率下的云雨衰落和大气衰落，以及高多普勒频移。为了反映出信道的具体物理环境特性并模拟出动态的大规模系统场景，我们参考了半确定性信道模型[12]中产生信道特性的方式。

受到云雨衰落和大气衰落变化影响的主要是信道的大尺度衰落参数，包括路径损耗，阴影衰落等。在SIoV通信里面中，除了载波频率f_c、收发端的三维距离d_{3D}之外，卫星与地面仰角α_{sat}、降雨强度R和大气吸收系数γ_o均被作为衰落变化的依赖变量。当依赖变量都取标准值时可以定义参考期望值μ和参考标准偏差σ。以阴影衰落为例，SF_μ和SF_σ分别是阴影衰落的参考期望值和参考标准偏差，SF_μ的计算可以表示如下：

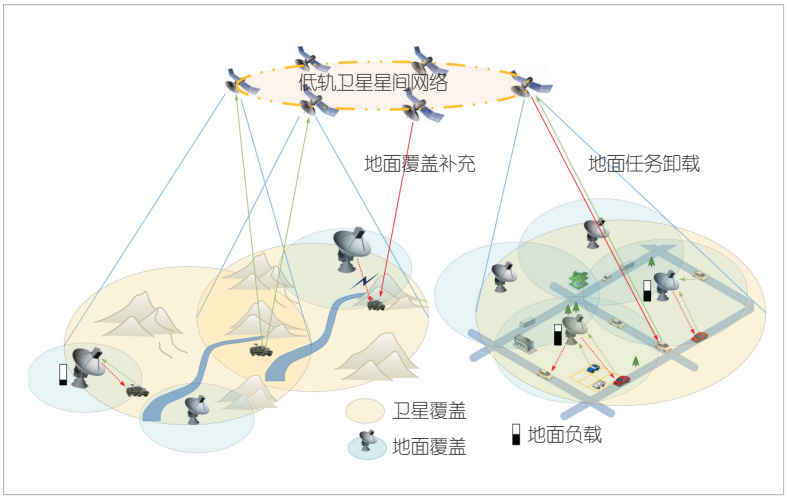
$$SF_\mu = SF_0 + SF_f \log\left(10 \times f_c\right) + SF_d \log\left(10 \times d_{3D}\right) + SF_\alpha \log\left(10 \times \alpha_{sat}\right) - rR - SF_L \gamma_o , \quad (1)$$

其中SF_f、SF_d、SF_α、r、SF_L分别是频率、距离、仰角、降雨和大气对阴影衰落影响的系数，这也最终反映了信号在较长距离上的衰落变化过程。

对于多普勒频移，视距（LOS）信道的多普勒频移可以通过相对运动来简单表示，如式（2）所示：

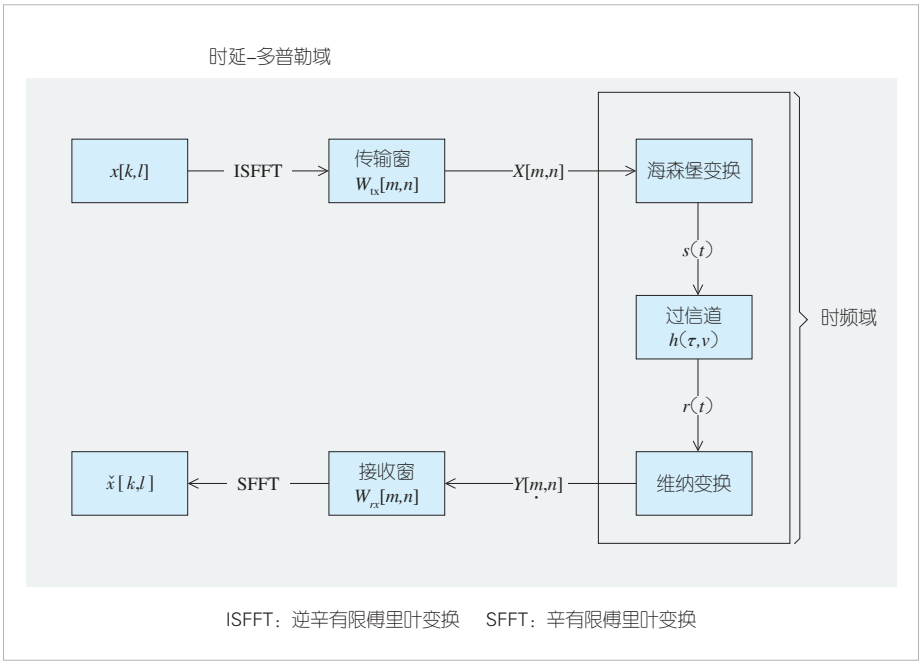
$$f_{\text{shift}} = \left(\frac{c - \vec{V}_{\text{Tx, dir}}}{c - \vec{V}_{\text{Rx, dir}}}\right) \times f_c - f_c , \quad (2)$$

其中$\vec{V}_{\text{Tx,dir}}$和$\vec{V}_{\text{Rx,dir}}$分别表示终端的移动速度与方向。尽管星地通信场景中以LOS信道为主，但仍然存在可能的多径传



▲图1　卫星车联网(SIoV)网络应用场景

输。3GPP TR 38.811[13]中统计了在不同的环境与仰角下，卫星与地面用户产生非视距（NLOS）信道的概率。NLOS信道为每个子路径引入了一个由多普勒频移变化引起的相位变化$e^{j\theta_i}$，并通过乘上每个子径对应的相位变化，得到最终的复数形式信道系数g和时延矩阵τ，记录了信道的衰落、相位的变化信息以及NLOS多径分量。



▲图2　正交时频空(OTFS)系统框架

1.2 OTFS调制技术

在图2所示的OTFS调制系统模型中，整体流程可以视作在传统OFDM系统收发端分别增加了一步处理过程，在保持信号结构的前提下，调制信号所经历的时变衰落信道转换为准时不变信道。因此相对于地面通信系统来说，基于OTFS的SIoV系统不需要调整复杂的系统架构以及基本波形。

但是对于SIoV场景模型而言，由于较高的多径–多普勒效应存在，在调制信号之前需要确定合适的DD域分辨率，确保更好地检测分离信号和估计信道，提高接收端数据恢复的性能。指定M为DD域的时延方向单位数，即子载波数量；N为多普勒方向单位数，即时隙数量。令T表示符号持续时间，$\Delta f = 1/T$表示子载波频率间隔。延迟分辨率$1/M\Delta f$定义了系统区分不同延迟信号的能力，即子载波数越大，延迟分辨率越小，系统能够区分的延迟差异就越细微。多普勒分辨率$1/NT$定义了系统区分不同多普勒频移信号的能力，主要受每帧的时隙数影响。在一个通信系统中，子载波间隔与符号持续时间一般是默认的。比如LTE系统中子载波间隔通常为15 kHz，而子载波数则会因不同编码方式对频谱利用效率的影响而产生变化。文献[14]对比了经过恰当设计的编码OTFS系统与未编码的OTFS系统在高移动性信道中的分集增益，阐释了信道编码对DD域分辨率的影响。

根据确定好的DD域分辨率，初始化一个在$M \times N$二维网格上排列的正交幅度调制星座图，并将发射信号比特映射为网格上的数据符号$x[k,l]$，其中$k = 0,\cdots,M-1$；$l = 0,\cdots,N-1$。经过逆辛有限傅里叶变换（ISFFT）和传输窗后，得到时间–频率（TF）域矩阵$X[m,n]$，其中$m = 0,\cdots,M-1$；$n = 0,\cdots,N-1$。由DD域到TF域的ISFFT可以表示如下：

$$X[m,n] = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} x[k,l] e^{j2\pi\left(\frac{nl}{N} - \frac{mk}{M}\right)}。 \tag{3}$$

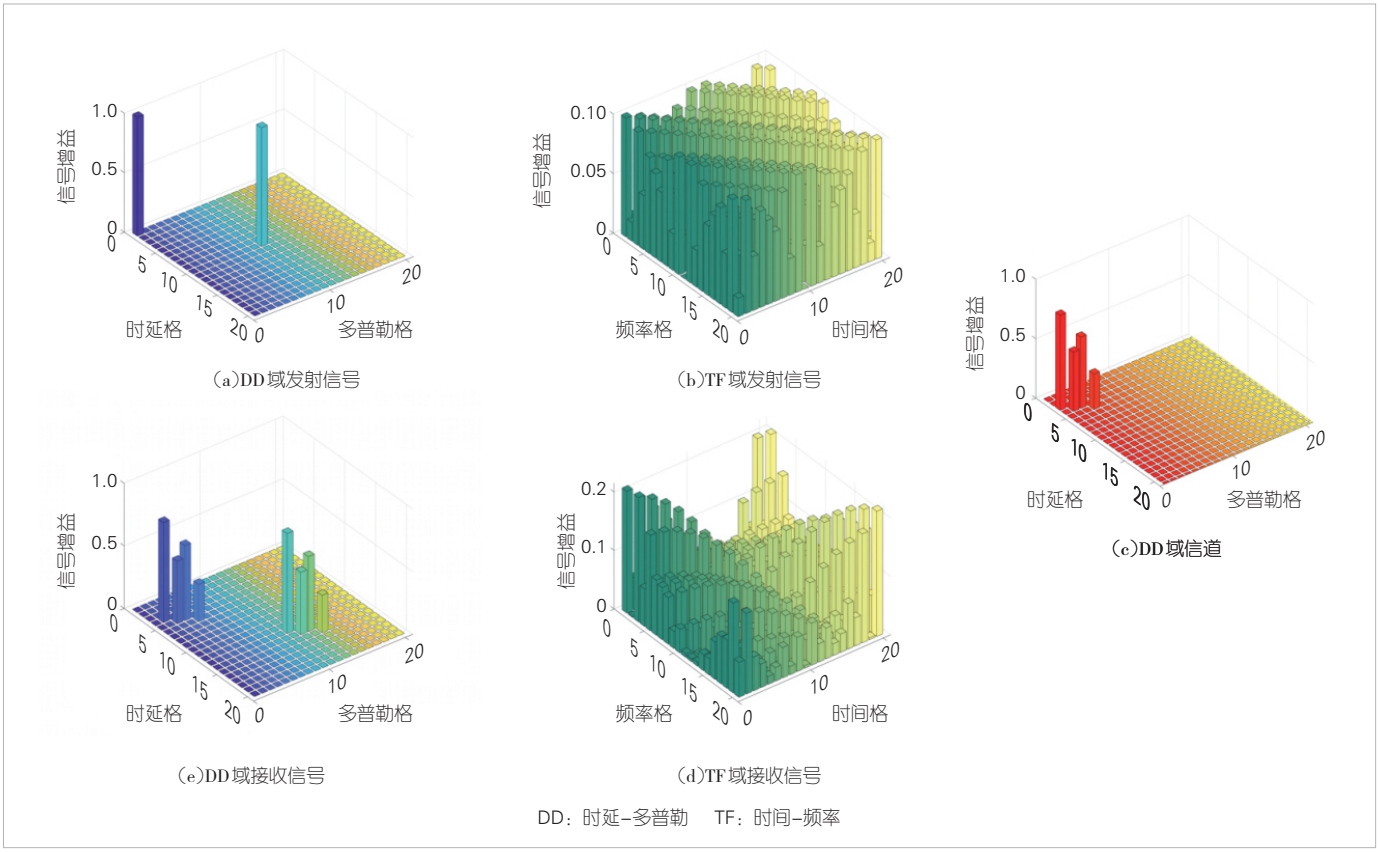
DD域平面的$x[k,l]$与TF域平面的$X[m,n]$中元素本质上是傅里叶变换下的映射关系，这保证了转换过程中的信息完整性和准确性。在这之后，海森堡变换作为OFDM变换的泛化模型，可以视作逆离散傅里叶变换的扩展，将TF域信号$X[m,n]$转换为时域信号$s(t)$：

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} X[m,n] g_{tx}(t - nT) e^{j2\pi m\Delta f(t-nT)}, \tag{4}$$

其中，$g_{tx}(t)$是脉冲成形函数或基函数，用于定义子载波的时域形状。信号在时域上通过信道传输的过程可以由如下的公式等效表示：

$$r(t) = \sum_{p=1}^{P} h(\tau,\nu) s\left(t - \tau_p\right) e^{j2\pi\nu_p(t-\tau_p)} + w(t), \tag{5}$$

其中，$r(t)$和$w(t)$分别表示时域接收信号波形以及加性高斯白噪声，p表示不同路径，$h(\tau,\nu)$表示具有时间和频率衰落的通用信道模型。接收端的变换可以视为发射端的逆过程，在通过信道后，信号引入了SIoV场景下的衰减和干扰，维纳变换将接收信号$r(t)$转换回TF域，再通过辛有限傅里叶变换（SFFT）转换回DD域，得到最终的接收信号$\hat{x}[k,l]$。图3的OTFS系统信号传输可视化展示了上述的完整过程。



▲图3　正交时频空复用(OTFS)信号变换示例

2 OTFS系统设计

2.1 TF/DD域信道特征

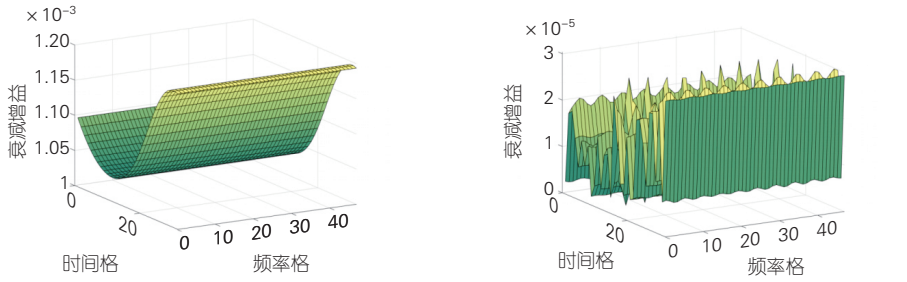
为验证OTFS系统对SIoV场景的优越性，我们在前文的信道模型基础上，参考了3GPP TR 38.811中定义仰角–LOS统计概率，确定了卫星–车辆的LOS或NLOS状态，构建了一个卫星与车联网通信环境。卫星的仰角由默认历元时间下的轨道6元素决定，包括半长轴、轨道偏心率、轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角和真近地点。为了综合验证信道特征，我们假设车辆的移动是单向的线性运动，卫星下行传输，载波频率f_c位于Ka波段。在我们的信道模型中，最终得到的是信道系数矩阵g和时延矩阵τ，这样的表达方式与式（5）中OTFS系统的信道$h(\tau,\nu)$有所不同。为了进行后续的信道分析，需要提取出矩阵g和τ中的多径–多普勒特征。式（6）是一个计算信道TF域响应的公式：

$$H(t,f)=\sum_{p}^{P}\sum_{\text{samples}}^{t} g_{ssfp}\cdot e^{-j2\pi k\Delta f\tau_p}, \tag{6}$$

其中，samples表示信道采样点，k是子载波索引。这个过程参考了短时傅里叶变换的思想，将多个采样点视作一个时隙，对时隙进行信道系数和时延的傅里叶变换，以及响应在多径分量上的叠加。但是当一个时隙内的信道采样点发生了剧烈波动时，子载波之间的正交性会被破坏，$H(t,f)$的估计和均衡会变得非常具有挑战性。传统的处理方法中考虑了提高OFDM系统的子载波间隔，也就是缩短符号持续时间，但这同时也会带来频谱管理以及带宽资源等一系列问题。在OTFS调制技术中，我们可以通过SFFT将信道转换到DD域分析，得到$\hat{H}(\nu,\tau)$，这使得信道的延迟和多普勒频移特性被更清晰地分离和表征：

$$\hat{H}(\nu,\tau)=\frac{1}{\sqrt{MN}}\sum_{t=0}^{N-1}\sum_{f=0}^{M-1}H(t,f)e^{-j2\pi\left(\frac{t\nu}{N}-\frac{f\tau}{M}\right)}。 \tag{7}$$

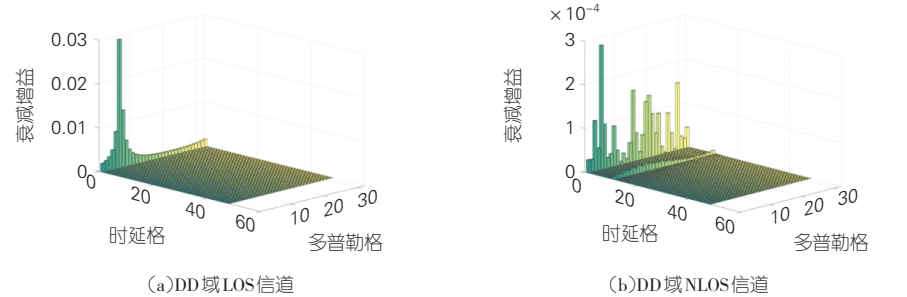
图4和图5展示了在LOS和NLOS条件下，均存在由多普勒频移引起的时间选择性衰落时，TF域和DD域的信道可视化结果。在图4（a）中，幅度随时间平滑变化，但在子载波之间保持一致。这表明没有频率选择性衰落，仅存在时间选择性衰落，符合单径移动信道特点。与之对应，在图4（b）中，两个维度上的波动意味着综合的多径–多普勒效应引起了时频选择性衰落。在图5中，信道响应集中在一些延迟多普勒单元上，这反映了信道稀疏性。对比图5（a）和



（a）TF域LOS信道　　（b）TF域NLOS信道

TF：时间–频率　LOS：视距　NLOS：非视距

▲图4　TF域中的LOS/NLOS信道



（a）DD域LOS信道　　（b）DD域NLOS信道

DD：时延–多普勒　LOS：视距　NLOS：非视距

▲图5　DD域中的LOS/NLOS信道

图5（b），单径条件下的多普勒维度有一个最高峰值，并向两边平滑变化。多径效应的影响包括两个方面：一方面在多个时延维度上产生了数据，另一方面则造成了叠加路径后的多普勒响应的不规则性。这是由于不同路径可能涉及不同方向和不同速度的散射体移动，产生不规则的正负多普勒频移分量，从而导致叠加后多普勒效应的不平滑变化。与TF域相比，DD域产生的结果更加直观，在已知DD域分辨率的情况下，可以很轻易地分辨并提取出信道的特性。

2.2 DD域系统化挑战

尽管前文的对比中展示了DD域在有多径分量的高多普勒场景信道上的优势，但从系统角度来说，整体场景较为理想化，实际的场景中还存在一些具体的挑战。

图4和图5中的结果保留了分数多普勒的形式。在大多数OFDM/OTFS系统的研究中，为了简化系统的实现和分析，常常将分数多普勒频移量化为整数多普勒值。尽管这个操作会使同步和信道估计更容易实现，但是很大程度上牺牲了多普勒频移的精度，对多普勒效应的保留不够完整。完整保留的分数多普勒频移会导致载波频率的偏移，从而对系统的性能产生显著影响。因此，我们在系统设计上应该引入更完善的同步机制或相位补偿技术，对完整的多普勒效应进行处理。

前文已经论证了DD域分辨率的重要性，图5的可视化也是基于足够精细的DD域分辨率而得到的信道特性。在OTFS系统中，物理路径本身由于信号传播过程中固有的时延和多普勒频移的连续性，并不会完全一一对应于DD域的格点，而传输–接收窗的选择和应用可能会进一步影响DD域的分辨率和系统性能。窗函数本身是通过对信号进行加窗处理来确保信号能量尽可能集中在目标格点上，减少对其他格点的干扰，优化DD域的分辨率。但是在实际的系统中，窗函数并不能在消除符号间干扰的同时满足无线通信所需的带限特性，这在文献[15]中进行了推导。文献基于不同滤波下的OTFS等效信道模型，分析了非理想滤波器引入的符号间干扰和消除方法，指出OTFS的窗函数设计需要考虑性能和带限特性之间的折中关系。因此，我们在系统设计上应该考虑对合适窗函数的选择与设计，尽可能地减小DD域格点间干扰。

总的来说，尽管图5的结果确实展现了DD域信道的稀疏性和相较于TF域的优势，但实际的物理路径通常不会准确对应延迟–多普勒平面上的格点，对分数和整数多普勒形式的处理以及窗函数的选择都可能导致DD域信道的等效形式复杂化。因此，在未来实际系统的设计和评估中，如何平衡分辨率、窗函数特性和系统复杂性之间的关系，是一个需要深入研究和优化的问题。

3 可靠传输性能分析

在本节中，我们在包含高多普勒频移特性和大气衰减SIoV信道模型基础上，完善了一组具有普适性的OFDM和OTFS的通信系统框架，并进行可靠传输性能分析。

3.1 信道估计

接收端想要通过信号检测恢复原始信号，离不开信道估

计获得的信道状态信息（CSI）。传统的OFDM系统针对基于导频的信道估计提出了多种方案，比如块状导频、梳状导频。这些方案都能一定程度上在时频域对信道的波动进行追踪，但是在SIoV这样的高多普勒频移场景中，信道估计结果很难完全抵消ICI。

在OTFS调制解调框架下，将导频符号与DD域二维网格结构结合，能够提高信道估计算法精确性。OTFS数据帧由导频符号x_{pt}、时延方向的M_d行数据符号x_d以及$M-M_d$行保护间隔组成。在时延方向上通过零填充设置保护间隔，并在其中放置导频符号$x_{pt}\left[k_{pt},l_{pt}\right]$，以便排除数据符号在延迟方向和多普勒方向对导频符号的干扰。因此，对于该已知的不受数据符号干扰的导频符号，接收端信道估计区域内接收到的导频符号一定是按照DD域信道参数经过循环位移和衰减后的结果。这个过程充分利用了OTFS中DD域信道的稀疏性，在理想情况下能够大幅度降低信道估计的开销和复杂度。在基于导频的框架中，我们通过线性最小均方误差（LMMSE）方式来对OTFS系统进行信道估计：

$$\hat{h}=\frac{\hat{Y}\cdot P^{*}}{|P|^{2}+w^{2}}, \tag{8}$$

其中，P^{*}是导频符号的共轭转置，$\hat{Y}$是根据导频接收的信号，w^{2}是噪声的方差。这种形式下的信道估计旨在平衡观测信号和噪声方差，能够在信道条件较差的情况下提取出导频符号的线性相关部分，降低噪声对信道估计的影响。

3.2 可靠通信性能对比

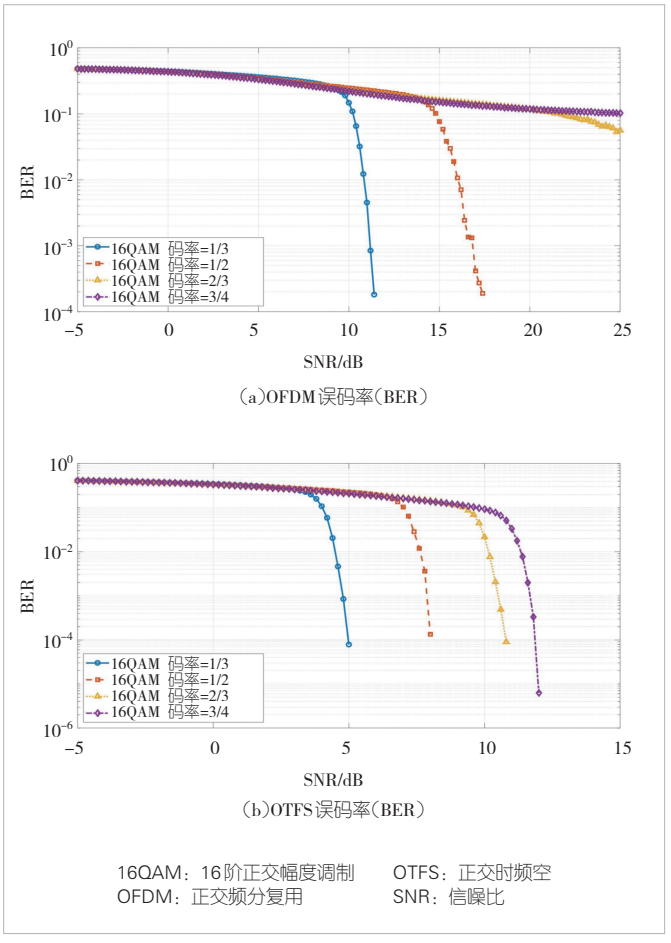
我们通过仿真对比了不同码率下OTFS和OFDM的误码率（BER）来获取可靠通信性能。在前文的信道模型与信道估计基础上，发送1 000帧，每一帧取800 bit的码长。此外，我们部署了Turbo码作为一个通用的信道编码方式，并比较了4种码率。输入符号的调制方式采用16阶正交幅度调制（16QAM）。对于OFDM系统，为了完整估计信道的波动性，我们采用全值导频的方法，同样基于LMMSE进行信道估计。

高码率编码可以通过更少的冗余位提高传输效率，而低码率虽然降低了带宽利用率，但增强了纠错能力并更好地处理复杂的信道条件。图6的结果显然验证了这一点。图6（a）的OFDM系统中1/3码率的16QAM调制在较高信噪比（SNR）水平下成功降低了误码率。但是随着码率的增加，误码率仍然维持在一个较高的差异值。图6（b）中，尽管码率的增加同样会导致误码率差异值的升高，但是相比于OFDM，OTFS传输并不需要较高的信噪比水平也能将误码率降低到10^{-5}数量级。这表明了当面对高多普勒频移引入的ICI时，OFDM调制由于TF域的局限性，对复杂的SIoV信道展现出较差的抵抗力。在相同条件下，OTFS调制则通过将多普勒效应转化到DD域，表现出更好的抗干扰能力。因此，这些结果验证了在高多普勒频移环境中，OTFS技术相比传统的OFDM，展现出了卓越的抗干扰能力，使其能够在未来SIoV通信领域中提供更为稳健和可靠的通信服务。

4 结束语

在本文中，我们通过分析SIoV场景信号传播特性，介绍了一种可以模拟SIoV中的高多普勒频移和大气衰落特性的信道模型，并利用OTFS调制来实现此类信道上的可靠传输。我们提取并讨论了TF和DD域下的信道特征，相应地指出了OTFS调制的基本优点。仿真结果证明了OTFS能够显著增强现有OFDM调制方案在高移动性场景下通信的可靠性，对全面支持SIoV通信需求具有重要意义。

但是在SIoV的未来演进中，OTFS仍然存在很多局限性，需要进一步探讨在非理想条件下的约束，包括DD域中



▲图6 OFDM/OTFS误码率曲线

对系统要求更高的相位补偿和窗函数支持，以及在实际传输过程中处理信道估计复杂度的问题。为此，继续深入研究实测场景下的多普勒频移效应，并结合适当的符号调制技术，将是保障SIoV能够提供高质量通信服务的关键方向。未来的研究将致力于优化OTFS系统，以应对实际应用中的挑战，从而更好地满足卫星与车联网通信的需求。

参考文献

[1] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议 [J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1–13

[2] 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

[3] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. China communications, 2020, 17(12): 156–171. DOI: 10.23919/JCC.2020.12.011

[4] HADANI R, MONK A. OTFS: a new generation of modulation addressing the challenges of 5G [EB/OL]. (2019–02–07) [2024–08–10]. http://arxiv.org/abs/1802.02623

[5] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925924

[6] ZHOU X Y, YING K K, GAO Z, et al. Active terminal identification, channel estimation, and signal detection for grant–free NOMA–OTFS in LEO satellite internet–of–things [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(4): 2847–2866. DOI: 10.1109/TWC.2022.3214862

[7] THAJ T, VITERBO E. Low–complexity linear diversity–combining detector for MIMO–OTFS [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(2): 288–292. DOI: 10.1109/LWC.2021.3125986

[8] BORA A S, PHAN K T, HONG Y. Spatially correlated MIMO–OTFS for LEO satellite communication systems [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2022: 723–728. DOI: 10.1109/ICCWorkshops53468.2022.9814666

[9] BUZZI S, CAIRE G, COLAVOLPE G, et al. LEO satellite diversity in 6G non–terrestrial networks: OFDM vs. OTFS [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(11): 3013–3017. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3320793

[10] HE R S, AI B, STÜBER G L, et al. Geometrical–based statistical modeling for polarized MIMO mobile–to–mobile channels [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2018, 66(8): 4213–4227. DOI: 10.1109/TAP.2018.2839758

[11] LI S D, LIU Y J, YAO L, et al. Improved channel model and analysis of the effect of bodies in curved tunnel using ray tracing [J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2020, 19(7): 1162–1166. DOI: 10.1109/LAWP.2020.2993469

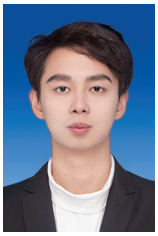
[12] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BÖRNER K, et al. QuaDRiGa: a 3–D multi–cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(6): 3242–3256. DOI: 10.1109/TAP.2014.2310220

[13] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non–terrestrial networks (Release 15): 3GPP TR 38.811 v15.1.0 [S]. 2019

[14] LI S Y, YUAN J H, YUAN W J, et al. Performance analysis of coded OTFS systems over high–mobility channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 6033–6048. DOI: 10.1109/TWC.2021.3071493

[15] RAVITEJA P, HONG Y, VITERBO E, et al. Practical pulse–shaping waveforms for reduced–cyclic–prefix OTFS [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(1): 957–961. DOI: 10.1109/TVT.2018.2878891

作 者 简 介



马瞻希，南京大学在读博士研究生；主要研究领域为星地融合网络。



薛鉴哲，南京大学在读博士研究生；主要研究领域为高移动性场景中的可靠通信。



周海波，南京大学教授、博士生导师；主要研究领域包括B5G/6G网络、车载自组织网络、空天地一体化网络中的资源管理和协议设计；主持国家自然科学基金首批原创探索计划项目、科技部重点研发项目、国家自然科学基金面上项目、华为创新重点研究项目等。

卫星隐蔽通信技术综述

A Review of Satellite Covert Communication Technologies

邓娜/DENG Na[1]，邢成文/XING Chengwen[2]，
赵楠/ZHAO Nan[1]
（1. 大连理工大学，中国 大连 116024；
2. 北京理工大学，中国 北京 100081）
(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405009
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1325.002.html
网络出版日期：2024-10-17
收稿日期：2024-08-06

摘要：卫星网络中隐蔽通信技术能够为泛在信息传输提供高层级的通信安全保障。基于此，对卫星通信网络的隐蔽通信技术进行系统综述，首先，简要介绍了卫星通信网络架构、卫星隐蔽通信典型场景、隐蔽通信的基本模型，以及卫星通信网络模型和性能指标；然后，分别从信息编码、波形设计和传输策略等方面回顾了现有隐蔽通信技术研究的最新进展；最后，展望了卫星隐蔽通信技术的若干未来研究方向。

关键词：卫星通信；隐蔽通信；信息编码；波形设计；传输策略

Abstract: In satellite networks, covert communication technology can provide high-level communication security for ubiquitous information transmission. To this end, this paper provides a systematic overview of covert communications in satellite communication networks. Firstly, this paper briefly introduces the satellite communication network architecture, typical satellite covert communication scenarios, fundamental covert communication model as well as satellite communication network model and covert performance metrics. Then, the latest progress in existing covert communication research is reviewed from different aspects of information encoding, waveform design, and transmission strategies. Finally, several future research directions are provided for satellite covert communications.

Keywords: satellite communication; covert communication; information encoding; waveform design; transmission strategy

引用格式：邓娜, 邢成文, 赵楠. 卫星隐蔽通信技术综述 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 55-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405009
Citation: DENG N, XING C W, ZHAO N. A review of satellite covert communication technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 55-67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405009

作为未来全球通信网络的重要组成部分，卫星通信网络是实现信息网络的全域连续覆盖和普惠共享的有效补充，可应用于偏远地区通信、海洋作业及科考宽带、航空飞机宽带和应急救灾通信等民用领域，以及军事通信中继、情报侦查、打击引导和预警探测等军事领域[1]。第3代合作伙伴计划（3GPP）已针对卫星通信网络与地面5G网络融合开展了相关研究，并认为超高密度的低轨星座网络将成为6G网络的一部分，将在全球通信服务上发挥关键作用。近年来，以星链、一网、超低轨通遥一体卫星星座等代表性的庞大星座计划，推动了新一轮的卫星通信网络发展浪潮，充分体现了卫星网络的发展前景和重要地位[2]。然而，随着通信业务的快速发展，无线通信过程中的各类保密和敏感数据呈现海量增长，无线通信安全问题也愈发受到用户重视。与地面移动通信网络相比，卫星通信网络的电磁波广播特性具有更远的传输距离和更广阔的无线覆盖，使得卫星通信链路更易受到监听、干扰和非法接入等恶意攻击。同时，卫星通信网络的三维广域覆盖特性使得恶意节点可以在空、天、地任意位置均能够实施非法手段，且被动监听模式导致难以发现恶意节点进行处置。此外，2019年世界无线电通信大会（WRC-19）第35号决议要求卫星运营商提交实际部署卫星系统的轨道特性参数，使得恶意节点可以预测卫星的轨道和位置，并提前做好攻击或窃听的准备。基于此，卫星通信网络面临着严峻的信息传输安全挑战。

为了保证信息传输的安全性，传统方法主要包括隐写术、加密技术和物理层安全通信技术。隐写术是将隐秘信息嵌入到图像或音频等数字媒介中，使得第三方无法察觉隐秘信息传输行为[3]，而加密技术采用密钥对隐秘信息进行加密/解密操作，在无密钥的情况下无法解码信息内容[4]。二者均

基金项目：国家自然科学基金项目（62371086、62325103）；辽宁省自然科学基金联合基金项目（2023-MSBA-015）；航空科学基金项目（2022Z001063001）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（DUT24MS015）

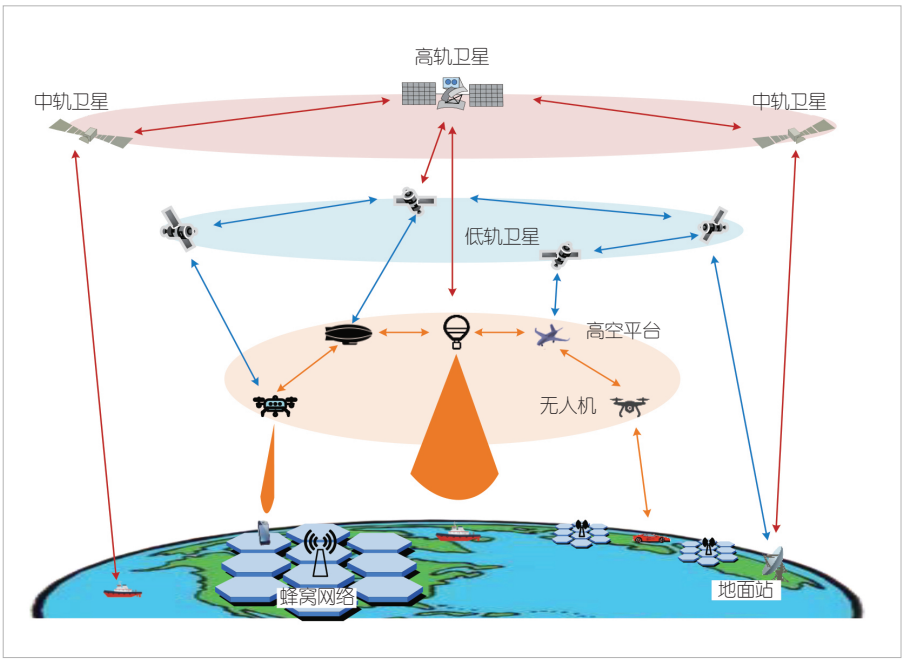
工作在网络层或应用层中，易于移植到卫星通信网络。然而，随着设备算力的增长和量子计算技术的发展，信息破译能力将会显著提升，隐写术或加密技术难以保证信息的安全传输。由此，需要将信息传输的安全保障机制下移至物理层，直接在物理信号实现更高级别的通信安全，这对具有广播特性的无线通信场景尤为重要。物理层安全通信技术利用合法信道和窃听信道之间的差异性在物理层信号传输上实现完全保密，有效防止第三方通过窃听信道截获信息[5]。现有的物理层安全传输策略主要有两类：一类是通过信息编码、波束成形、人工噪声和中继协作干扰等技术增大合法信道与窃听信道之间的速率差异性，即提升保密容量；另一类是利用无线信道的互易性、随机性及空间唯一性来生成具有天然随机性的密钥对传输数据进行物理层密钥加密，而信道信息的唯一性使得所传输数据不会因恶意节点的计算能力提高而被破译。由此可知，物理层安全通信技术可以使得恶意节点能够检测出物理信号，但无法解析信号的具体内容。虽然这能保护具体传输的信息不被破解，但仍无法保证足够的通信安全性。一旦恶意节点检测到通信行为，可以定位至辐射源位置并发动物理攻击，使合法节点受到安全威胁，这在军事领域中体现得尤为明显。例如，2023年初俄军士兵的通信行为使得临时驻点位置泄露遭到乌军突袭。因此，亟需在物理信号传输层面实现能够隐藏通信行为而不被第三方察觉的安全通信。

为实现更高层次的安全传输，隐蔽通信技术，又称为低截获通信，作为一种保证无线安全的新型物理层技术而备受关注。与现有的物理层安全通信技术不同，隐蔽通信技术通常通过模拟环境噪声或其他自然信号，来隐藏信息传输的行为，使所传输的信号看起来像是环境噪声的一部分，从而不引起监测者察觉。早期的隐蔽通信技术主要采用流星余迹通信技术和扩频通信技术来提高通信的隐蔽性。流星余迹通信的隐蔽性主要依赖于无线电波的方向性反射和间歇突发传输特性[6]，而扩频通信技术将高功率谱密度的窄带信号源扩展至低功率谱密度的宽带信号，使其淹没在背景噪声或者公用信号中[7]。然而，这两项技术主要偏向于工程应用实现，难以有效解析信息隐蔽性和传输性能的理论边界，无法指导隐蔽通信技术的进一步方向。2013年，BASH等学者从假设检验和信息传输理论角度对隐蔽通信理论进行了一项开创性研究[8]，揭示了加性白噪声信道的隐蔽通信容量，即著名的平方根定律：发送方在n次信道使用条件下能够可靠且隐蔽传输的最大信息比特与$\sqrt{n}$成比例。在此基础上，研究人员在不同信道假设下研究了隐蔽通信的理论边界性能[9-12]。然而，现有的研究工作大多集中在基于经典囚徒模型的三节点和噪声受限场景，难以直接应用于更复杂的卫星通信网络隐蔽通信场景。同时，卫星网络所体现的规模化、高动态、独特的信号传播特征和干扰受限等特性使得电磁频谱环境更加复杂，为通信的隐蔽性研究带来了诸多挑战，有待进一步研究与发展。为此，本文将对卫星网络的隐蔽通信理论与技术进行全面介绍。

1 卫星隐蔽通信基础

1.1 卫星通信网络架构

传统的卫星通信网络主要是地面通信设备和中轨/高轨通信卫星的直连通信，而近年来随着空中和小型卫星平台技术的进步，逐渐在传统网络中引入了低轨通信卫星、高空通信平台和低空通信平台。这些新平台的出现形成了一种新型大规模多层卫星互联网架构，具有多种层间/层内链路以及接入链路，能够为广域空间内的各类应用提供信息保障。根据各平台的高度，卫星互联网的架构可以分为天基网络、空基网络和地面网络3个部分，如图1所示。



▲图1 多层卫星通信网络架构

天基网络利用星间光通信链路和星地微波链路在全球范围内提供互联网接入服务，包括高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星。卫星的高度范围与其提供的服务直接相关，其中轨道高度越高，信号覆盖区域越大，通信延迟时间越长。高轨卫星因具有最广泛的信号覆盖区域而主要用于提供卫星电话和无线广播服务，中轨卫星通常用于全球定位系统，而低轨卫星则因其低时延、高吞吐量和低成本等优势主要应用于移动互联网。然而，卫星的广域覆盖特性和无线信道的开放性使得卫星通信系统面临着严峻的信息传输安全风险。此外，低轨卫星的低成本特性使得低轨卫星星座的大规模部署成为可能，在提供更稳定、更高效的信息服务的同时，也给网络安全管理带来了风险和挑战。

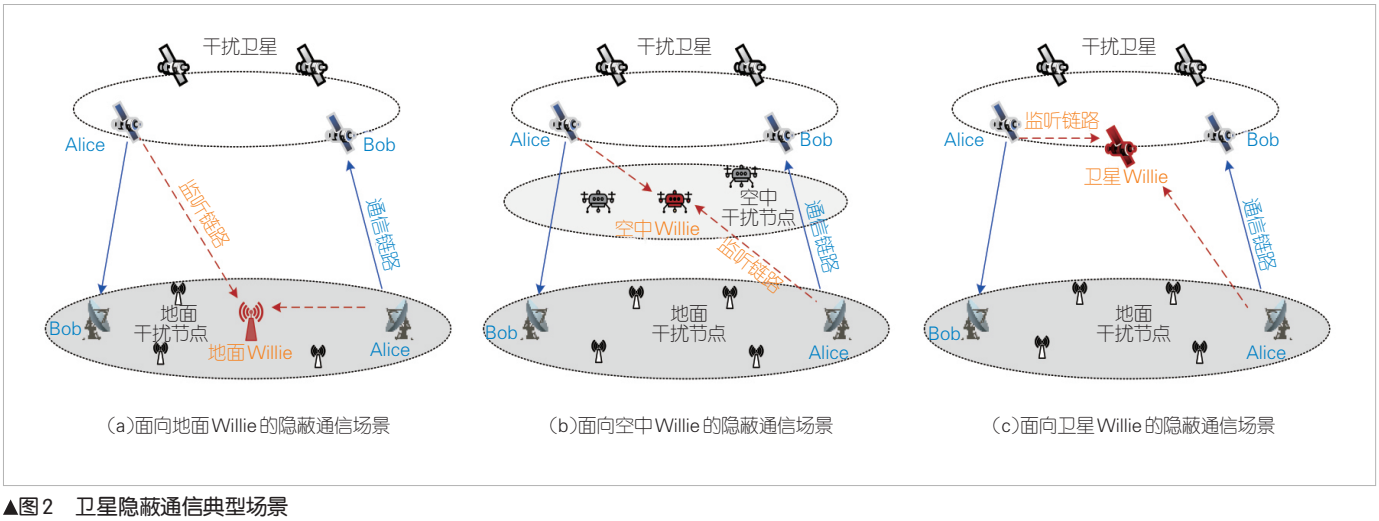
空基网络可以看作是天基网络的延伸，对地面用户具有更好的信道条件和更低的通信时延，主要包括高空平台和低空平台。高空平台由位于15~25 km之间的平流层中的飞艇、飞机和气球组成。高空平台具有区域级的信息服务潜力，可以作为天基网络和地面用户之间的中继转发器，在区域覆盖和接收信号强度之间取得了良好的折中。低空平台主要由飞行高度为0~4 km的无人机组成，其中无人机的优势与高空平台类似，但更接近地面网络，具有快速灵活部署的特征，强大的视距通信链路，以及额外的自主可控的设计自由度。此外，无人机基站可以为偏远、人口稠密和灾害地区的地面用户实时建立、增强和恢复蜂窝覆盖。然而，空基网络的视距传播条件也会给信息传输的安全性带来严峻的挑战，同时高空/低空平台因具有高机动性也常会被用作信息截获的平台。

地基网络是由宏蜂窝网络、微蜂窝网络和Wi-Fi网络等不同子网组成的异构无线接入网，服务于不同的行业，如工业物联网、智慧城市、自动驾驶等。地基网络需要提前部署固定的信息网络基础设施，因前期部署代价高昂而难以服务偏远、沙漠和海洋等区域。相较于天基网络和空基网络，地基网络所能提供的通信区域范围有限，但无线服务更为稳定和高效。然而，由于无线信号的广播特性，合法和非法接收器均能够接收到来自无线空中接口的数据信号，同样为地基网络的通信安全带来了风险。

1.2 卫星隐蔽通信典型场景

隐蔽通信的经典模型是SIMMONS提出的Alice-Bob-Willie三方囚徒模型，其中发送方Alice致力于可靠地将数据发送给接收机Bob，同时确保通信本身不被监听者Willie察觉。基于此，隐蔽通信与传统通信的最大差异在于存在第三方Willie对信号的检测特性。结合卫星通信网络的多层架构，监听者Willie在不同高度时所经历的电磁环境差异较大，信号检测特性也较为悬殊。因此，本文将基于Willie高度将卫星隐蔽通信典型场景分为3类，即地面Willie、空中Willie与卫星Willie，如图2所示。通过对不同典型场景、信号传输方向、监听者个数和功能进行组合可衍生出更多复杂的隐蔽通信场景。

图2（a）给出了面向地面Willie的卫星隐蔽通信场景，其中Willie位于地面，对来自地面Alice或卫星Alice的隐蔽信号进行检测。若Alice是卫星发射机，由于星地传播距离通常较远，距离较近的地面Willie和地面Bob可能会经历类似的信道特性，使得Willie和Bob对卫星所发的无线信号具有类似的检测特性，导致二者或都检测到信号，或都无法检测到信号，这对同时满足通信隐蔽性和可靠性的隐蔽通信技术提出了极大的挑战。若Alice是地面发射机，为了对抗卫



（a）面向地面Willie的隐蔽通信场景　（b）面向空中Willie的隐蔽通信场景　（c）面向卫星Willie的隐蔽通信场景

▲图2　卫星隐蔽通信典型场景

星接收机Bob所经历的长距离路损，Alice需要提升自身的信号功率，这同时也有利于地面Willie进行信号检测，从而使隐蔽通信变得更为艰难。

图2（b）给出了面向空中Willie的典型场景，其中空中飞行器位于地面和卫星轨道之间用来监听地面Alice或卫星Alice的通信行为。在该场景中，无论Alice是卫星发射机还是地面发射机，空中Willie因具有一定高度而使其监听链路的信号传播距离小于Alice–Bob通信链路的信号传播距离。同时，空中Willie所接收的信号传播环境往往是无遮挡的，显著优于近地传播环境。这些因素使得通过降低发射功率以增强通信隐蔽性的传统方法不再适用。此外，空中Willie的自主移动性使其能够灵活地调整检测位置，给卫星通信带来了极大安全威胁。

图2（c）给出了面向卫星Willie的典型场景，其中卫星作为监听者检测来自地面Alice或卫星Alice的信号。在该场景中，卫星的广域覆盖优势也有利于卫星Willie进行广域范围的监听，同时卫星的周期移动性使其可监听范围进一步扩展，且对地面的监视和监听活动难以及时被发现和干扰，这种天然的隐蔽性为卫星作为窃听者提供了优势。此外，世界主要国家和商业公司都在积极部署大规模的低轨卫星星座，抢占稀缺的轨道和频谱资源，导致太空敌我卫星混杂。在进行正常星地或星间通信时，卫星Willie可能会改变轨道到更近的位置或与合适位置的卫星协同进行窃听或监视。这将给卫星通信网络带来严峻的安全挑战。

1.3 隐蔽通信基本模型

在隐蔽通信中，Alice以一定概率传输信息并试图提高其传输性能，且躲避Willie监测，而Willie尽力正确地检测到Alice是否在发送信号。Willie根据其检测到的信号矢量执行决策行为，即通过二元假设检验来判断Alice是否发射信号。考虑卫星通信网络的大规模特性，信号会受到噪声和干扰的影响，卫星隐蔽通信的基本模型可以建模为公式（1）所示的假设检验问题：

$$\begin{aligned}&\mathcal{H}_0:\ y_{\mathrm{w}}[i]=\sum\nolimits_{k\in\Phi}\sqrt{\mu_k h_{k\mathrm{w}}}\,x_k[i]+n_{\mathrm{w}}[i],\\&\mathcal{H}_1:\ y_{\mathrm{w}}[i]=\sqrt{\mu_{\mathrm{a}} h_{\mathrm{aw}}}\,x_{\mathrm{a}}[i]+\sum\nolimits_{k\in\Phi}\sqrt{\mu_k h_{k\mathrm{w}}}\,x_k[i]+n_{\mathrm{w}}[i],\end{aligned}\quad(1)$$

其中i=1, 2,…, L为信道使用或采样索引。$y_{\mathrm{w}}[i]$和$x_{\mathrm{a}}[i]$分别为Willie的接收信号和Alice的发射信号，$x_k[i]$为干扰源的发射信号。$n_{\mathrm{w}}[i]$为接收端的加性高斯白噪声。μ_{a}和μ_k分别为Alice和干扰源的发射功率，h_{aw}和$h_{k\mathrm{w}}$分别表示Alice到Willie和干扰源到Willie之间的信道增益。$\mathcal{H}_0$和$\mathcal{H}_1$分别对应于Alice保持静默状态的零假设和Alice正在发送信号的备选假设。

在典型的隐蔽通信中，Willie根据其平均接收信号功率$\bar{P}_{\mathrm{w}}$和预先设置的功率检测门限ξ来决定Alice处于信息发送状态$\mathcal{D}_1$或保持静默状态$\mathcal{D}_0$，其中平均接收信号功率为：

$$\bar{P}_{\mathrm{w}}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}|y_{\mathrm{w}}[i]|^2\ 。\quad(2)$$

当$\bar{P}_{\mathrm{w}}\geqslant\xi$，Willie判断Alice进行了信号传输；反之，Alice保持静默。根据二元假设检验的判决准则，Willie可能出现虚警和漏检错误，则应的虚警概率表示为$\alpha=P_r(\mathcal{D}_1|\mathcal{H}_0)$以及漏检概率为$\beta=P_r(\mathcal{D}_0|\mathcal{H}_1)$。此时，Willie致力于恰当设置功率检测阈值来最小化总误检概率$\alpha+\beta$，而Alice通过编码波形设计、资源分配和干扰协同等来增强Willie的总误检概率。

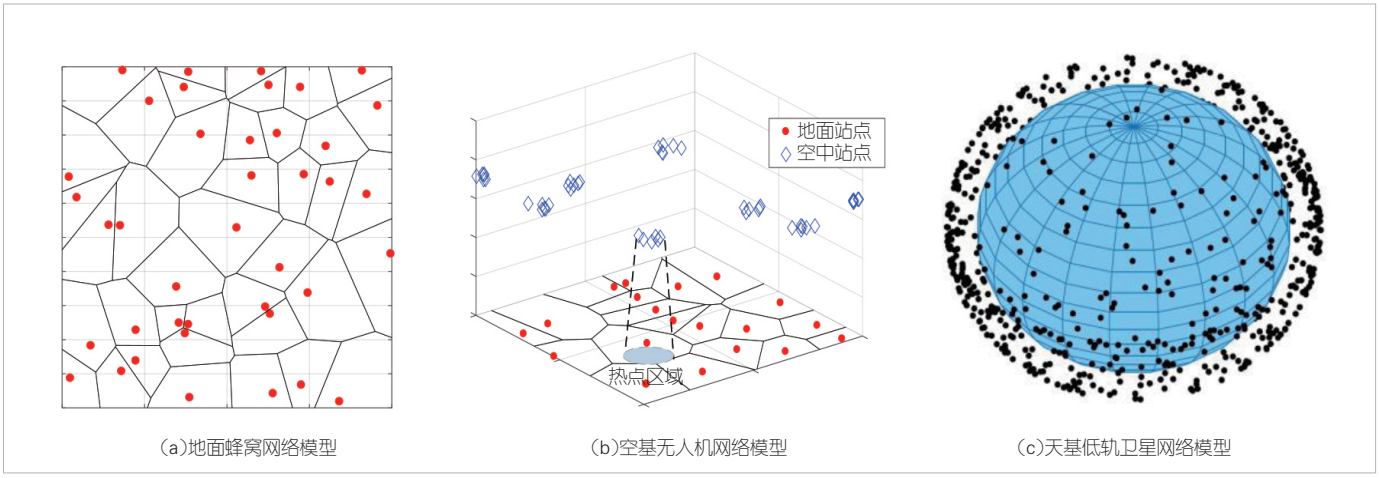
1.4 卫星通信网络模型

从隐蔽通信模型中可知，决定通信隐蔽性的是Willie在两种实践假设下所接收信号强度特性的差异，而决定通信性能的则是Bob的接收信号质量。这些因素均与卫星通信网络中各层无线节点的空间拓扑结构以及无线信道特性密切相关。

首先，关注空间拓扑结构的建模问题。对于地基网络，以地面蜂窝网络为例，地面基站的空间位置坐标虽然可以从各运营商处获取，但从位于不同位置的接收机的角度来看，绝对坐标相同的地面基站其相对位置也是可变的，因而呈现出随机网络拓扑特性。此外，确定性的网络拓扑只能依托系统级仿真方法对所关注的信号特性进行研究，需要消耗大量的算力、时间和存储资源。基于此，许多理论研究工作将地面蜂窝站点建模为一个二维的空间随机点过程以体现出网络拓扑的可变性和随机性[13]，如图3（a）所示，其中红色“·”为地面基站，黑色线条用以表征小区边界。

空基网络与地基网络的最大差异在于每个空中节点的位置属性多了一个高度维度，因此可采用标签空间随机点过程来建模空基网络的空间拓扑[14][15]，其中空间随机点过程表征了空中站点在地面上映射的水平位置，而标签则表征空中节点的高度，可以是一个固定值或者服从某个概率分布的随机变量。如图3（b）所示，针对无人机集群用于服务地面热点区域的场景，可建模为一个固定标签的泊松簇过程，其中无人机在地面投影的水平位置建模为一个泊松簇过程，高度为一个固定值。

对于天基网络，以低轨巨型星座网络为例，鉴于低轨卫星节点往往位于距离地球表面的一定海拔高度上，通常采用



(a)地面蜂窝网络模型 (b)空基无人机网络模型 (c)天基低轨卫星网络模型

▲图3 卫星通信网络空间拓扑模型

一个三维球面的二项式点过程建模低轨巨型星座网络节点的空间拓扑[16]，其中在每个时刻点上各卫星位置的集合可认为是一次随机空间点过程的实现。基于此，由卫星移动性导致的星座网络空间分布的可变性便可由空间点过程的随机性来体现。低轨巨型星座网络模型的示意图如图3（c）所示。

然后，关注无线信道的建模问题。无线信道建模通常分为大尺度衰落和小尺度衰落两部分。对于地基网络，地面收发机之间的无线信号传播大多经历各类散射体和遮挡物。因此，小尺度衰落通常建模为瑞利衰落或Nakagami衰落，而大尺度衰落则建模为与距离相关的幂率路损模型 $\ell(d)=\kappa d^{-\alpha}$，其中 α 和 κ 分别为路损指数和参考距离的路损偏置[13]。对于空基网络，主要涉及空–地链路和空–空链路两种信道。其中，空–地链路信道可能会受到建筑物或山脉等物体的遮挡，需要同时考虑视距和非视距传播特性，并且根据不同的环境设置不同的视距传播概率以及相应的信道模型参数[17]。空–空链路通常是无遮挡的传播环境，因而建模为视距传播信道。对于天基网络，主要涉及星地链路、星空链路和星间链路三类信道。其中，星间链路通常是无遮挡的传播环境，因而可直接建模为自由空间传播信道。相比于其他信道，星地/星空链路[18]的卫星信号通常要穿越较远的物理距离，且无线电信号会历经自由空间损耗以及降水、气体吸收、云层、对流层闪烁和信号去极化等引起的衰减。同时，由于卫星与地面设备（或机载设备）间的距离远大于天线间距，且卫星天线附近没有散射体，导致星地/星空链路信道存在着极强的空间相关性。而低轨卫星的高移动性导致其与地面节点间的相对移动而产生多普勒效应，使得卫星信道的建模变得极其复杂。常用的统计信道模型有瑞利信道、阴影–莱斯信道和Nakagami信道模型。此外，天基网络还存在地球遮挡问题，即并非所有卫星均能与地面/空中/卫星接收机进行信息交互，部分卫星信号则会受到地球遮挡。

1.5 隐蔽通信性能指标

与仅关注信息传输可靠性和效率问题的传统通信不同，隐蔽通信还需要关注第三方Willie的信号检测问题。以下介绍表征Alice–Bob链路隐蔽特性和传输特性的基本性能指标。

1） 监听性能

Willie的监听性能决定了Alice–Bob链路的隐蔽特性，可以采用虚警概率 $\alpha=P_r(\mathcal{D}_1|\mathcal{H}_0)$ 和漏检概率 $\beta=P_r(\mathcal{D}_0|\mathcal{H}_1)$ 进行衡量。假设Alice发送隐蔽信息和保持静默状态的先验概率分别为 π_0 和 π_1，Willie的错误检测概率可以表示为 $P_{\text{error}}=\pi_0\alpha+\pi_1\beta$。在等先验概率情况下，通常也采用总误检概率 $\alpha+\beta$ 直接表征Willie的错误检测特性。为了表征隐蔽边界特性，一般考虑Alice处于较恶劣的信息传输环境，即Willie预先知悉一些统计先验信息，包括Alice发送信息的先验概率和Willie在两种假设下检测样本的概率分布。假设 $\mathbb{P}_0$ 和 $\mathbb{P}_1$ 分别表示Willie在零假设 $\mathcal{H}_0$ 和备选假设 $\mathcal{H}_1$ 成立条件下所接收信号样本 $y_w[i], i=1,2,\cdots,L$ 的联合概率分布。在等先验概率情况下，Willie采用最优检测方法达到的最小总误检概率为：

$$\alpha+\beta=1-\mathcal{V}_T(\mathbb{P}_0,\mathbb{P}_1), \tag{3}$$

其中 $\mathcal{V}_T(\mathbb{P}_0,\mathbb{P}_1)$ 是关于两个概率分布 $\mathbb{P}_0$ 和 $\mathbb{P}_1$ 的总变分距离。然而，在复杂或高维信号的检测场景中，总变分距离通常难以直接计算。基于此，通过Pinsker不等式，可以得到最小总误检概率的下界：

$$\alpha+\beta\geqslant 1-\sqrt{0.5\mathcal{D}(\mathbb{P}_0\|\mathbb{P}_1)}, \tag{4}$$

其中 $\mathcal{D}(\mathbb{P}_0\|\mathbb{P}_1)$ 是相对熵或Kullback–Leibler散度，用于量化

两个概率分布之间差异程度。

Alice和Willie互不了解对方的先验信息，给隐蔽通信带来了可能性。具体地，Willie不清楚Alice的发送时间、信号频率、时长以及实时信道信息，同时Alice也不了解Willie的信号检测策略和实时信道信息。若保证严格的隐蔽通信，需要在给定任意小的隐蔽约束$\varepsilon > 0$，Alice的信息传输行为在Willie处的总错检概率超过$1-\varepsilon$，即$\alpha+\beta \geqslant 1-\varepsilon$。目前隐蔽通信的相关研究通常假设Willie采用基于最小错误检测准则的最优检测方法，并对Alice的传输策略进行设计优化，如发射功率、传输速率或预编码矢量等。因此，当Willie采用非最优检测方法时，Alice–Bob通信链路可以获得更高的隐蔽性。

2） 通信性能

隐蔽通信在满足隐蔽约束下需要提升Alice–Bob链路的传输速率和可靠性，因此Alice的通信策略设计需要兼顾Willie的检测能力和Bob的解码能力。这涉及隐蔽通信领域中信息隐蔽性与信息可靠性之间的矛盾。当Alice发送信号，Bob的接收信号表示为：

$$y_{\mathrm{b}} = \sqrt{\mu_{\mathrm{a}} h_{\mathrm{ab}}}\, x_{\mathrm{a}} + \sum_{k \in \Phi} \sqrt{\mu_k h_{k\mathrm{b}}}\, x_k + n_{\mathrm{b}}\ , \tag{5}$$

其中x_{a}和x_k为单位功率符号，h_{ab}和$h_{k\mathrm{b}}$分别为Alice–Bob链路和干扰源到Bob的信道增益，n_{b}是噪声。Alice–Bob链路信干噪比（SINR）为：

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{b}} = \frac{\mu_{\mathrm{a}} h_{\mathrm{ab}}}{\sum_{k \in \Phi} \mu_k h_{k\mathrm{b}} + \sigma^2}\ , \tag{6}$$

其中σ^2是噪声功率。若干扰节点集合是空集，则Alice–Bob链路的接收SINR将退化为信噪比（SNR）。基于SINR表达式，可以研究信息传输成功概率$P_r(\mathrm{SINR} > T)$作为衡量信息可靠性指标，以及依托于SINR的其它通信性能指标，如传输容量、传输时延等性能指标。在研究这些通信指标的同时还要考虑信息传输的隐蔽性约束，则定义Alice的隐蔽传输容量为在满足隐蔽约束$\alpha+\beta \geqslant 1-\varepsilon$条件下Alice与Bob之间的信道容量[10]，即：

$$C = \log(1 + \mathrm{SINR}_{\mathrm{b}}),\ \ \mathrm{s.t.}\ \alpha+\beta \geqslant 1-\varepsilon\ 。 \tag{7}$$

类似地，也可定义基于隐蔽约束的其它通信性能指标。为了有效降低隐蔽通信的截获率，往往考虑监听者Willie处于最佳工作条件并具有最优检测性能，所得结果则对应于Alice–Bob隐蔽通信所面临的最差情况。

2 隐蔽通信关键技术

隐蔽通信的核心思想是在信息传输过程中不断引入随机性和不确定性因素来混淆Willie的检测过程，从而达到隐藏信息传输行为的目的。本节从信息编码、波形设计和传输策略研究等方面回顾了隐蔽通信的解决方法，如表1所示，其

▼表1 隐蔽通信关键技术分类及特点

关键技术	文献	方法	特点
信息编码	[8–19]	随机编码方法	低功率或低码重的隐蔽约束 解码复杂度高
	[20–21] [22–24]	级联编码方案	满足低码重约束，达到隐蔽容量 解码复杂度较低
波形设计	[25–27]	传统扩频波形	低功率谱特性 先进信号检测技术破坏其隐蔽性
	[28–30]	混沌扩频波形	更好的非周期性、相关性 逼近高斯白噪声的统计特性
	[31–34]	WFRFT波形	星座图具有旋转和模糊特性 通信信号呈现类高斯特性
	[35–38]	变换域波形	基于环境感知设计信号基础波形伪噪声性质，规避干扰频段
非协同传输	[39–40]	噪声不确定性	
	[41–43]	信道不确定性	环境不确定性实现非零隐蔽速率
	[44]	时间不确定性	
	[45–47]	功率控制策略	增强Willie的不确定性
	[48–53]	多天线技术	增强Willie的不确定性 提升Bob的有用信号功率
协同传输	[54–57]	单干扰机辅助	结合人工噪声、全双工和非正交多址技术，充分利用干扰机的协同干扰提升Willie的总错检概率
	[58–61]	多干扰机辅助	利用多干扰机的协同机制，增强Willie的不确定性，降低Bob的干扰功率

WFRFT：加权类分数傅里叶变化

中根据是否需要干扰机协同辅助将传输策略研究分为非协同和协同两种类别。

2.1 隐蔽编码方法研究

为了满足通信系统中的隐蔽性约束，Alice需要在加性高斯白噪声信道下对所发送的消息进行低功率的高斯随机编码[8]或在二进制对称信道下进行低码重的二进制随机编码[19]，其中高斯随机码字的功率和二进制随机码字的码重与码字序列长度n呈现不大于$\sqrt{n}$的正比例关系。如果Alice的编码策略不满足上述约束，Willie对以上两种信道下所接收的信号分别进行功率检测或非零符号数统计可以轻易地得出Alice的信息传输状态；反之，Willie的接收信号可以近乎噪声序列，从而达到信息隐蔽的目的。虽然随机编码技术引入了不确定性，但它们在实际系统中难以实现，且隐蔽接收机的解码复杂度也较大。然而，传统的线性编码难以满足低功率或轻量级的隐蔽约束。针对该问题，LAMARCA等提出了将一种基于图的非线性编码与传统线性编码进行串接级联而构建的一种非线性编码，并将其用于二进制对称信道中隐蔽通信[20]，其中隐蔽性是通过Willie未知的加扰序列保证的，并采用仿真验证了所提编码策略的隐蔽有效性。文献[21]采用了类似的串接级联编码思路，提出了适用于二进制对称信道和离散无记忆信道的Reed–Solomon与随机编码级联方案，并理论证明了所提方案可以达到隐蔽且可靠传输的信道容量，同时编解码算法具有多项式的复杂度。通过将随机编码和脉冲位置调制进行级联，BLOCH等提出并证明了另一种在离散无记忆信道下能够达到极限隐蔽容量的编码方案[22]，其中脉冲位置调制的稀疏性保证了信息传输的隐蔽性，而通过码字长度的适当选取可以达到平方根律的信息容量。此外，BLOCH还结合了多层编码和脉冲位置调制技术设计了一种低复杂度的优化编码方案[23]，以在二进制输入离散无记忆信道上达到隐蔽通信的极限容量，并改进脉冲调制技术使得所提编码方案能够在加性高斯白噪声信道达到隐蔽通信的极限容量[24]。虽然文献[62–63]在卫星隐蔽通信中引入了极化码和低密度奇偶校验码，但所用编码方法主要用于增强信息传输的可靠性，而并非是隐蔽性。

2.2 隐蔽波形设计研究

为了降低Willie信号检测正确的可能性，Alice无线信号波形的优化设计是极其关键的一环，其中现有研究工作主要聚焦于扩频技术和变换域两类波形设计方法。

扩频技术是在两次世界大战期间为无线射频通信免受探测、干扰和窃听而设计的。该技术构成了最早且最持久的一种物理层安全方法。本质上，扩频方法是在宽带的调制波形上传输窄带的基带信源信号，使得所发送的信号波形可以淹没在背景噪声或者公用信号中，从而显著提高通信系统的隐蔽特性。典型的扩频技术包括跳频扩频（FHSS）、直接序列扩频（DSSS）及其组合，广泛应用于诸多卫星与军事通信系统。由于扩频系统的接收机需要根据扩频序列的先验知识进行同步解扩，因此该系统的隐蔽性能与扩频序列特性息息相关，序列周期越长以及随机性越高，则信息传输隐蔽性越好。BEAULIEU等基于Neyman–Pearson检测理论，提出了用于FHSS信号检测的相干和非相干截获接收机结构，并推导了检测概率与虚警概率的理论表达式[25]，用来表征传输隐蔽性能。为了提高DSSS信号的低截获性能，WIK和LINDBLAD在文献[26]中提出了一种新型高速率扩频码生成方法，并依托低通滤波器使扩频码具有多电平幅度，以去除DSSS信号的谱线，从而降低检测概率。NOWAK等利用ZINC波形作为扩频信号来提高DSSS系统的传输和隐蔽性能[27]，介绍了新型DSSS系统的时谱特征和传输信号的隐蔽性，验证了ZINC波形的隐蔽性优于典型的伪噪声信号波形。在卫星通信领域中，卫星重叠通信技术可以将扩频信号叠加至一般用户的通信信号中以隐藏通信行为[64–65]。随着通信侦察技术的发展，已出现大量有效检测和估计方法去截获扩频信号的关键参数，使得扩频通信的低截获性能大打折扣[66–67]。

针对上述问题，一种方法是采用混沌序列代替传统扩频序列为卫星隐蔽通信提供了一种新型序列选择，其中混沌序列具有更好的非周期性、相关性及逼近于高斯白噪声的统计特性[28]。文献[29]研究了混沌序列通信系统中同步/异步和相干/非相干截获接收器和能量检测器的截获概率性能，结果显示与传统扩频序列相比，混沌序列可以显著降低截获特性，体现了混沌序列通信系统在隐蔽性能上的优势。然而，在已知混沌序列概率特性的条件下，文献[30]设计了一种最佳截获接收机结构，其结果表明混沌扩频序列的隐蔽性并不优于传统扩频序列。另一种提升通信隐蔽性的方法是引入一种新型时频域分析工具，即加权分数阶傅里叶变换（WFRFT）。WFRFT处理后的调制信号比特能量均匀对称分布，星座图在不同参数下表现出旋转和模糊特性，导致通信信号呈现出类高斯的统计特性，使得WFRFT具有了隐蔽的传输能力，Willie更难准确地检测到Alice的通信行为[31]。为了提高卫星通信的隐蔽能力，文献[32]提出了一种基于多输入多输出系统的多层WFRFT方案，其中每个发射天线作为一层具有唯一WFRFT参数，使得WFRFT处理的信号能够有效地抵抗参数扫描的信息截获方法。文献[33]在卫星成对载

波多址中使用本地信号副本进行自干扰抵消，提出一种基于WFRFT的卫星信号掩盖方法。文献[34]结合WFRFT信号的类高斯化特性与混沌映射轨迹的抗截获特性，提出一种基于物理层安全的双极化卫星联合调制方案，以进一步提高卫星信号的隐蔽性能。

上述工作主要关注基于时频域变换的波形设计方法。与之不同的是，变换域通信系统不以某种信号特征为主进行波形设计，而是通过感知周边电磁环境，在收发两端设计出相同的基础调制波形。该波形具有伪噪声性质且规避了干扰频段，从而降低了信号被截获的概率，同时也有效地提高了通信抗干扰能力[35]。基于此，文献[36]的作者提出了一种基于变换域通信技术并重叠于卫星通信链路上的隐蔽通信系统，其中该系统将隐蔽信号叠加在卫星通信系统原业务信号上，通过透明转发器进行隐蔽信息转发。在文献[37]中，作者提出了一种基于频域加权的均方误差感知失真度量方法以评价变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性能。针对变换域通信系统中传统基函数设计未考虑隐蔽性的短板，文献[38]提出了一种双门限基函数设计方法，综合考虑误码率性能与隐蔽性能，给出最佳的判决门限，使得通信系统在隐蔽性能符合通信系统要求的前提下，实现误码率性能的提升。文献[68]基于变换域通信技术思想提出了一种基于多载波直接序列码分多址的智能卫星隐蔽通信技术，其中发射端根据感知的实际电磁环境对多载波直接序列码分多址的系统参数进行动态调整，将隐蔽信息主动与背景干扰信息在时频域重叠，从而达到隐蔽信息传输的目的。

2.3 非协同隐蔽传输方法研究

根据平方根律可知，随着编码的码字位数趋于无穷时，隐蔽速率趋于0。因此，如何打破平方根律的基本限制实现非零隐蔽传输速率成为隐蔽通信领域中一个关键问题。由平方根律证明过程可知增强隐蔽传输性能的关键点在于弱化Willie统计假设检验的检测能力，而其中涉及了一个理想假设，即Willie精确知悉背景噪声和Alice发送信号序列的统计特性。然而，在实际场景中，Willie仅能知悉有限或不确定的Alice信号特性信息和环境噪声信息。例如，背景噪声是各种噪声源的集合，如热噪声、信号泄露、非理想滤波器的量化噪声等，使得Willie无法精准估计噪声的真实统计特性，进而难以区分接收信号中的噪声和实际传输信号。因此，这些不确定性使得Willie难以依托最优统计假设检验方法进行信号检测，进而弱化了Willie统计假设检验的检测能力。

在信息传输过程中，Willie对环境感知的不确定性可以为Alice实现非零隐蔽速率带来机会。LEE等学者在2015年基于信息论证明了在Willie对背景噪声功率等级不确定的条件下Alice可以获得非零隐蔽速率，而且噪声不确定性使得Willie难以确定性地检测到Alice的信号传输[39]。同时，由于Willie对噪声功率等级的估计与实际不一致，这导致隐蔽通信系统存在一个信噪比临界值。当Bob的信噪比小于该临界值时，Willie即使检测了无穷多个信号样本也无法发现Alice的信号传输行为。随后，文献[40]研究了有界和无界两种类型的噪声不确定性模型，并使用贝叶斯统计和隐蔽中断概率作为关键指标来分析隐蔽性能。结果表明两种噪声不确定性模型均可以实现非零隐蔽速率。除了噪声不确定性，实际通信环境中的信道状态信息对于所有接收机均是不确定的，因此Alice可以有额外的维度来隐藏信息传输行为。文献[41]研究了块衰落信道上的隐蔽通信，给出了Willie的最优辐射计检测门限，以及结果表明信道状态信息的不确定性确实能够实现非零隐蔽速率。SHAHZAD等学者研究准静态块衰落信道上隐蔽通信的两种情况，即Willie知悉理想的信道状态信息或信道状态信息的统计分布。通过对比两种情况，研究结果表明在较大的检测误差范围内，即使Willie获知了较好的信道状态信息也并不能提高其检测性能[42]。TA和KIM研究了噪声和信道不确定性如何影响对瑞利衰落信道的隐蔽性能，其中结果表明噪声不确定性可以加剧信道不确定性对隐蔽性能的影响[43]。此外，平方根律中假设检验问题的建模暗示了一个关于Willie不合理假设，即若Alice试图发送信息，Willie知晓Alice具体的发送时间和信号时长，这显然与实际并不相符的。基于此，文献[44]研究了在加性高斯白噪声场景下当Willie并不知晓发送时间对隐蔽性能的影响，其中结果表明当Alice的发送时间对于Willie来说是未知的，且Willie需要始终监测所有时隙中信号的变化情况，此时Alice可以实现非零隐蔽传输速率。文献[69]研究了空天地一体化网络中的上行隐蔽通信问题，其中噪声不确定度用于分析Willie的最小错误检测概率以度量信息传输的隐蔽特性，并以此作为隐蔽约束，通过优化发送功率和非规则高斯信号因子以最小化隐蔽通信系统的中断概率。

由于不确定性有利于信息传输隐蔽性，Alice主动设计隐蔽增强的传输方案以加剧Willie接收信号功率的随机性，如多天线和功率控制等技术。对于功率控制技术，信息隐蔽传输的机理是增强发射功率的随机性或设计发射功率以降低被Willie发现的概率。YAN等在加性高斯白噪声信道下考虑一个基于有限块长的时延敏感隐蔽通信系统，提出了均匀随机分布的发射功率方案来提高信息传输的隐蔽性能，结果说明隐蔽传输的信息量与随机功率等级数呈现对数增长的规

律[45]。HU 等学者采用信道反转功率控制方案实现瑞利衰落信道模型下的隐蔽通信，其中所采用的功率控制策略可以保证接收机 Bob 的接收信号功率恒定，同时也防止 Willie 利用信道状态信息去准确估计噪声，进而增强了隐蔽通信性能[46]。类似地，MA 等研究了基于信道反转功率控制的隐蔽通信方案，其中考虑传统的和截断的信道反转功率控制方案，给出了最优检测阈值和最小总误差概率的表达式，并提出了优化发送端功率控制参数以最大化有效隐蔽吞吐量[47]。对于多天线技术，波束成型可以减少传输方向中的信号泄漏，从而提高无线信道的隐蔽性能。文献[48]研究了非理想信道状态信息场景下多输入单输出信道的隐蔽通信问题，其中 Alice 配置多天线而 Willie 和 Bob 的接收机均是单天线。结果表明，Alice 在获得 Willie 完整信道状态信息前提下可以通过多天线波束成型得到非零隐蔽速率，并在获得非理想信道状态信息的情况下通过优化波束成型矢量和发射功率以最大化隐蔽速率。文献[49]考虑了 Willie 配置多天线的隐蔽通信场景，分析了天线数对可达隐蔽通信速率的影响。结果表明与单天线场景对比，Willie 天线数的稍许增长会显著降低隐蔽速率。对于多输入多输出的隐蔽通信场景，其中 Alice、Bob 和 Willie 均配置多天线，文献[50]给出了不同系统配置下的最大隐蔽速率，如 Alice 对 Willie 信道状态信息的知悉情况，有无共享密钥码本以及发射天线的数量等。结果显示，在一定发射天线配置和加性高斯白噪声信道条件下，多输入多输出的隐蔽容量收敛于其信道容量。JAMALI 等考虑了多天线与毫米波相结合的隐蔽通信场景[51]，将 Alice 的天线阵列分为两个独立子阵列，其中一个子阵的定向波束对准 Bob 用于传输数据，而另一个子阵的定向波束对准 Willie 作为干扰信号，以增强数据传输的隐蔽性。文献[52]将多天线技术与中继相结合进一步解决低功率约束导致收发机传输性能差的问题，设计了直达中继协调传输策略，提出了一种基于半定松弛的线搜索方法来获得全局最优波束形成矢量，平衡了直连链路和中继链路，满足隐蔽性要求，同时实现了最大隐蔽率。文献[53]利用智能反射面对无线信道进行重构来解决传输的输隐蔽性和可靠性的折中问题，从而打破了传输隐蔽性、可靠性、延迟和吞吐量之间的基本限制。文献[70]将毫米波与大规模天线阵列技术迁移至卫星系统，推导了该系统的下行隐蔽容量，提出了一种度量指标来评估毫米波大规模多输入输出信道的内在稀疏性，研究了对卫星隐蔽通信容量的影响。

2.4 协同隐蔽传输方法研究

尽管 Alice 可以通过上述编码、波形设计、功率控制和多天线等技术自主增强信息传输隐蔽性，但在 Alice–bob–Willie 典型三节点场景中引入干扰机 Jammer 这类第四方辅助节点，则会更有利于隐蔽性能的显著提升。其中，干扰机的主要作用机理是通过发送干扰信号影响 Willie 的接收信号特性。根据辅助干扰机的个数，可以将相关工作分为两类：单干扰机辅助隐蔽传输方法和多干扰机辅助隐蔽传输方法。

对于单干扰机辅助场景，首先考虑存在一个额外的 Jammer 辅助信息隐蔽传输的场景。SOBERS 等考虑 Jammer 不了解 Alice 是否会发送信息和发送的时间的场景，其中 Jammer 将以随机功率始终在发送高斯白噪声信号[54]。研究结果表明干扰机辅助 Alice 可以隐蔽传输与使用信道次数成比例的信息比特，即可以达到非零的隐蔽速率。其次，结合非正交多址技术，Alice 本身就可以充当 Bob 的友好干扰机并且与非隐蔽接收机进行协同增强 Bob 的隐蔽传输性能，其中利用非隐蔽接收机需要强功率提升其通信性能作为掩护，将所传输的隐蔽信息隐藏在非隐蔽接收机的公开信号中[55–56]。进一步地，KANG 等将非正交多址技术引入到卫星物联网以增强信息的隐蔽传输[57]。此外，结合全双工技术，隐蔽接收机 Bob 采用全双工接收来实现同时接收 Alice 的隐蔽信息和产生对 Willie 的人工噪声，使得 Bob 本身就成为了友好干扰机。文献[71]研究了一种信道衰落条件下的全双工无线隐蔽通信系统，其中该系统的全双工隐蔽接收机 Bob 产生的人工噪声对 Willie 的接收信号的统计特性产生不确定性。结果表明，该技术虽然可以给隐蔽通信带来机会，但会在 Bob 处引起自干扰，因此需要仔细管理发射功率等级。该文献研究了如何选择最佳人工噪声功率范围，以及隐蔽信息的最佳传输概率，从而最大限度地增大 Willie 的检测误差。考虑实际场景中 Willie 位置难以预先知悉，文献[72]提出了一种针对 Willie 位置不确定的隐蔽通信方案，其中该方案在限制隐蔽中断概率的情况下，最大限度地提高了多天线发射机与全双工隐蔽接收机之间的连接吞吐量。文献[73]考虑了 Willie 仅能获取信道状态信息统计特性的场景，其中结果表明全双工隐蔽接收机所产生的人工噪声能够提高无限块长度的隐蔽通信性能，而且通过优化 Alice 发送功率与 Bob 的人工噪声功率，可以减少 Bob 中断通信的可能性。文献[74]基于干扰机增强隐蔽传输的思想研究了低轨卫星通信系统的隐蔽性能，其中无人机作为卫星隐蔽通信的干扰机，推导了隐蔽速率和窃听者的错误检测概率。在此基础上，作者提出了一个遗传算法，通过优化无人机的发射功率和轨迹方案来得到最优隐蔽速率。

对于多干扰机辅助场景，首先考虑实际场景中干扰机的位置不确定性。SOLTANI 等假设潜在友好干扰机集合服从

一个二维泊松点过程，提出了距离Willie最近的友好干扰节点产生人工噪声的隐蔽增强传输策略，并证明了在合适的点过程密度和路径损耗指数配置下Alice能够可靠且隐蔽地向Bob发送与信道使用数成线性比例的信息比特[58]。同时，该论文还考虑了多个Willie协作截获Alice信息的场景，并给出隐蔽传输信息比特的极限性能，且结果说明在路损指数大于2的场景是无法提供更高的隐蔽容量。在相同的无线网络拓扑假设的基础上，ZHENG等研究了多天线辅助隐蔽通信的性能，其中Alice的阵列部署模式考虑了集中式和分布式两种天线系统，并在随机几何理论框架下分析和优化了隐蔽通信的吞吐量性能，研究了小尺度信道衰落和大尺度路径损耗的共同影响[59]。结果表明，无论发射天线个数是多少，两种天线系统的隐蔽吞吐量与干扰源密度和干扰功率无关，其中集中式天线系统的隐蔽吞吐量要优于分布式天线系统，且性能差异会随着天线数的增长而变大。

然后，考虑多个干扰机之间的协同问题。文献[60]针对多个干扰机辅助隐蔽通信系统提出了一种非协调干扰机选择方案，其中该方案选择对隐蔽接收机的瞬时信道增益低于预设阈值的干扰机来生成人工噪声以增强Willie的不确定性。因此，所提策略会严重降低Willie的检测正确性，而对隐蔽接收机的通信质量影响较小。此外，在Willie检测错误概率大于给定值的隐蔽约束下，通过优化干扰机的选择预设阈值和信息传输速率去实现隐蔽吞吐量最大化。HE等同样研究了干扰机集合服从二维泊松点过程的隐蔽通信场景，但与文献[58]不同的是假设所有干扰机均发出相同功率的人工噪声[61]。作者分析了在给定Willie隐蔽性和Bob传输可靠性双重约束下Alice和Bob之间的隐蔽通信吞吐量。结果说明在干扰受限网络中干扰源的密度和发射功率均不影响隐蔽吞吐量，而当干扰足够小且与接收机噪声功率等级相当时，隐蔽吞吐量随着干扰机的密度或发射功率的增加而增加。FENG等采用类似的网络拓扑建模方法来研究大规模多层低轨卫星星座网络场景中的隐蔽通信问题[75]，通过功率控制策略将卫星隐蔽信号掩盖在卫星网络的同频干扰中，从而对抗窃听卫星通信信息的地面站点。

3 未来卫星隐蔽通信研究方向与挑战

近年来，虽然隐蔽通信研究已经做了大量工作，卫星隐蔽通信理论与技术研究也开始逐步推进，并具有非常广阔的应用前景，但仍有许多悬而未决的问题需要进一步研究。本节将结合卫星通信网络特征对其中涉及的技术挑战与未来发展方向展开论述。

3.1 实际隐蔽编码方案

诸多前期研究的结果表明常规的线性编码方案所得码字的码重无法满足隐蔽性约束，而基于随机化编码策略虽然能够达到隐蔽信息传输的极限性能，但在实际应用中存在计算效率低、解码复杂度高和可行性低等问题。当前有一些初步的研究工作通过线性与非线性编码的串接级联方案在特定信道模型下可以达到隐蔽通信的极限容量，但相关方案缺少严格的理论分析，对于卫星通信信道的适用性仍需要进一步研究和讨论。特别是，卫星通信具有高动态、长传播时延、信道条件变化快等特性，因此面向卫星隐蔽通信的中短编码方案是一个亟待解决的关键问题。

3.2 抗干扰的隐蔽波形设计

卫星通信网络的规模化发展和频谱的稀缺使得卫星隐蔽通信的三类场景中同频聚合干扰成为影响信息传输可靠性和隐蔽性的关键因素之一。同频聚合干扰作为一种新的不确定性因素为提升通信隐蔽性带来了新的契机，但对于隐蔽接收机的成功接收亦会产生重要影响。从复杂的电磁信号环境中，隐蔽接收机能够提取并识别出发射机的信号波形是信息传输的基础，同时该信号波形需要呈现出类环境噪声的非周期规律特性，从而避免被恶意节点所察觉。因此，基于WFRFT的变换域波形设计在干扰受限的卫星隐蔽通信领域还需要进一步深入研究。

3.3 非理想信道状态信息

为了便于方案设计和性能分析，现有的隐蔽通信研究工作往往假设可以获取理想的信道状态信息，用于波束成型和功率控制方案设计。然而，在实际场景中，卫星位置的高动态变化、背景噪声和同频干扰的存在，通常使发射端难以获取理想的信道状态信息，而所估计的信道状态信息通常都会存在误差项，严重影响信息传输的隐蔽性和可靠性。此外，传统基于导频的闭环反馈式信道估计方法也会有暴露通信行为的风险，而Willie通常是非主动响应式的接收机，Willie检测链路的信道状态信息更加难以获取。因此，如何设计隐蔽式的信道估计方法和利用非理想状态信息是未来卫星隐蔽通信研究领域中的难点问题。

3.4 主动攻击式Willie

在大多现有隐蔽通信研究中，通常假设恶意Willie处于静止且被动的状态。然而，在实际卫星通信场景中，卫星、航空器、无人机等各类通信载体均有主动移动的侦测能力，甚至具有电磁攻击能力。因此，Willie在检测过程中可以相应地改变自身的探测位置、检测决策规则，甚至发射恶意干

扰信号等方式。例如，无人机Willie在巡查过程不断被动式检测信号，同时可以根据接收信号强度动态改变检测位置和检测功率阈值。一旦发现Alice有一些可疑的行为，Willie可以逐步靠近并对检测决策规则予以调整进行深度检测和分析，从而更精确地判断Alice是否在发送信号。然而，目前有关隐蔽通信的研究很少考虑主动Willie，可以进一步探索研究，从而为隐蔽传输提供更彻底的保护。

3.5 干扰机协同方案设计

信号发射机之所以能够传输给隐蔽接收机而不被恶意节点发现，原因主要是将其发送信号隐藏在恶意节点对电磁环境感知的不确定性中，包括环境噪声、信道增益或人工噪声等不确定性因素，从而避免被恶意节点发现。其中，能够被隐蔽通信系统所主动掌控的不确定性因素是友好干扰机所产生的人工噪声，而卫星通信乃至空天地一体化网络中节点规模性使得基于干扰机的隐蔽通信极具应用前景。然而，针对节点的异构性、网络协议的差异性和卫星信号的独特传播特性，如何从众多网络节点中选取合适的干扰机以及多个干扰机如何高效协同进行隐蔽通信，仍是未来研究的一大挑战。

4 结束语

卫星网络中隐蔽通信技术能够为全域泛在信息传输提供有效的通信安全保障。为此，本文综述了从物理层信号层面提供安全保护的隐蔽通信技术。首先介绍了卫星通信网络的基本架构和卫星隐蔽通信的几个典型场景，讨论了隐蔽通信的基本模型和所涉及的卫星通信网络模型，以及简要总结了信息隐蔽和信息传输两方面的关键性能指标。随后，根据信息传输过程的不同阶段进行分类，分别介绍了面向隐蔽通信的信息编码、波形设计、传输策略等关键技术，其中传输策略根据是否需要友方发射机协同辅助又分为基于不确定性的非协同传输策略和基于干扰机协同的隐蔽传输策略。最后，对卫星隐蔽通信存在的技术挑战和未来研究方向进行了展望。

参考文献

[1] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23 (1): 70–109. DOI: 10.1109/COMST.2020.3028247

[2] 陈全, 杨磊, 郭剑鸣, 等. 低轨巨型星座网络: 组网技术与研究现状 [J]. 通信学报, 2022, 43(5): 177–189

[3] FRIDRICH J. Steganography in digital media: principles, algorithms, and applications [M]. New York: Cambridge University Press, . DOI: 10.5555/1721894

[4] DIFFIE W, HELLMAN M. New directions in cryptography [J]. IEEE transactions on information theory, 1976, 22(6): 644–654. DOI: 10.1109/TIT.1976.1055638

[5] LIU Y L, CHEN H H, WANG L M. Physical layer security for next generation wireless networks: theories, technologies, and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19 (1): 347–376. DOI: 10.1109/COMST.2016.2598968

[6] 李赞, 刘增基, 沈健. 流星余迹通信理论与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011

[7] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993

[8] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Limits of reliable communication with low probability of detection on AWGN channels [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(9): 1921–1930. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130923

[9] BLOCH M R. Covert communication over noisy channels: a resolvability perspective [J]. IEEE transactions on information theory, 2016, 62(5): 2334–2354. DOI: 10.1109/TIT.2016.2530089

[10] WANG L G, WORNELL G W, ZHENG L Z. Fundamental limits of communication with low probability of detection [J]. IEEE transactions on information theory, 2016, 62(6): 3493–3503. DOI: 10.1109/TIT.2016.2548471

[11] TAHMASBI M, BLOCH M R. First- and second-order asymptotics in covert communication [J]. IEEE transactions on information theory, 2019, 65(4): 2190–2212. DOI: 10.1109/TIT.2018.2878526

[12] ARUMUGAM K S K, BLOCH M R. Covert communication over a K-user multiple-access channel [J]. IEEE transactions on information theory, 2019, 65(11): 7020–7044. DOI: 10.1109/TIT.2019.2930484

[13] LU X, SALEHI M, HAENGGI M, et al. Stochastic geometry analysis of spatial-temporal performance in wireless networks: a tutorial [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2021, 23 (4): 2753–2801. DOI: 10.1109/COMST.2021.3104581

[14] SHI X M, DENG N. Modeling and analysis of mmWave UAV swarm networks: a stochastic geometry approach [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(11): 9447–9459. DOI: 10.1109/TWC.2022.3176906

[15] DENG N, WEI H C, HAENGGI M. Modeling and analysis of air-ground integrated networks with flexible beam coverage [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(11): 8170–8184. DOI: 10.1109/TWC.2023.3260470

[16] WANG X, DENG N, WEI H C. Coverage and rate analysis of LEO satellite-to-airplane communication networks in terahertz band [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(12): 9076–9090. DOI: 10.1109/TWC.2023.3268097

[17] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE wireless communications letters, 2014, 3(6): 569–572. DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736

[18] ARAPOGLOU P D, LIOLIS K, BERTINELLI M, et al. MIMO over satellite: a review [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2011, 13(1): 27–51. DOI: 10.1109/SURV.2011.033110.00072

[19] CHE P H, BAKSHI M, JAGGI S. Reliable deniable communication: hiding messages in noise [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory. IEEE, 2013: 2945–2949. DOI: 10.1109/ISIT.2013.6620765

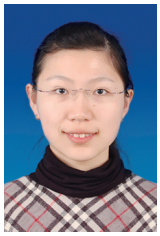
[20] LAMARCA M, MATAS D. A non-linear channel code for covert communications [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2019: 1–7. DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885672

[21] ZHANG Q S, BAKSHI M, JAGGI S. Covert communication with polynomial computational complexity [J]. IEEE transactions on information theory, 2020, 66(3): 1354–1384. DOI: 10.1109/TIT.2019.2955987

[22] BLOCH M R, GUHA S. Optimal covert communications using pulse-position modulation [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 2825-2829. DOI: 10.1109/ISIT.2017.8007045
[23] KADAMPOT I A, TAHMASBI M, BLOCH M R. Multilevel-coded pulse-position modulation for covert communications over binary-input discrete memoryless channels [J]. IEEE transactions on information theory, 2020, 66(10): 6001-6023. DOI: 10.1109/TIT.2020.3019996
[24] KADAMPOT I A, TAHMASBI M, BLOCH M R. Codes for covert communication over additive white Gaussian noise channels [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2019: 977-981. DOI: 10.1109/ISIT.2019.8849662
[25] BEAULIEU N C, HOPKINS W L, MCLANE P J. Interception of frequency-hopped spread-spectrum signals [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 1990, 8(5): 853-870. DOI: 10.1109/49.56391
[26] WIK A M, LINDBLAD A L. A novel LPI concept using filtered spreading codes [C]//Proceedings of MILCOM '96 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 1996: 90-94. DOI: 10.1109/MILCOM.1996.568590
[27] NOWAK M S, LOCICERO J L, UCCI D R. Bandlimited covert data communications using zinc waveforms [C]//Proceedings of MILCOM. IEEE, 2002: 1018-1023. DOI: 10.1109/MILCOM.2002.1179615
[28] KADDOUM G. Wireless chaos-based communication systems: a comprehensive survey [J]. IEEE access, 2016, 4: 2621-2648. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2572730
[29] YU J, YAO Y D. Detection performance of chaotic spreading LPI waveforms [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2005, 4(2): 390-396. DOI: 10.1109/TWC.2004.842948
[30] SEDAGHATNEJAD S, FARHANG M. Detectability of chaotic direct-sequence spread-spectrum signals [J]. IEEE wireless communications letters, 2015, 4(6): 589-592. DOI: 10.1109/LWC.2015.2469776
[31] 梅林, 房宵杰, 沙学军. 基于加权类分数傅叶变换的变换域通信系统 [J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3): 38-44. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.03.009
[32] ZHAI D, DA X Y, HU H, et al. Satellite anti-interception communication system based on WFRFT and MIMO [C]// Proceedings of 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). IEEE, 2018: 305-310. DOI: 10.1109/ICCSN.2018.8488243
[33] 桑之昂, 刘亚南, 刘子威, 等. 基于WFRFT的卫星信号掩盖方法研究 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(1): 339-345
[34] 倪磊, 达新宇, 胡航, 等. 基于MP-WFRFT的多维联合调制卫星隐蔽通信研究 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45(4): 1183-1191
[35] 侯文达, 付天晖, 隋晓杰, 等. 变换域通信系统研究现状与问题分析 [J]. 信息技术, 2024, 48(1): 24-29, 36. DOI: 10.13274/j.cnki.hdzj.2024.01.004
[36] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 一种基于变换域通信系统的卫星隐蔽通信系统 [J]. 信息与控制, 2014, 43(5): 524-528. DOI: 10.13976/j.cnki.xk.2014.0524
[37] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 变换域重叠隐蔽通信系统的隐蔽性度量方法 [J]. 高技术通讯, 2014, 24(5): 472-478. DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2014.05.005
[38] 梁源, 达新宇, 张喆, 等. 隐蔽通信中变换域通信系统双门限基函数设计 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 11-16. DOI: 10.13245/j.hust.171103
[39] LEE S, BAXLEY R J, WEITNAUER M A, et al. Achieving undetectable communication [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2015, 9(7): 1195-1205. DOI: 10.1109/JSTSP.2015.2421477
[40] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. On covert communication with noise uncertainty [J]. IEEE communications letters, 2017, 21(4): 941-944. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2647716
[41] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H. Covert communication in fading channels under channel uncertainty [C]//Proceedings of IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108525
[42] SHAHZAD K, ZHOU X Y. Covert wireless communications under quasi-static fading with channel uncertainty [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 1104-1116. DOI: 10.1109/TIFS.2020.3029902
[43] TA H Q, KIM S W. Covert communication under channel uncertainty and noise uncertainty [C]//Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761935
[44] BASH B A, GOECKEL D, TOWSLEY D. Covert communication gains from adversary's ignorance of transmission time [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2016, 15(12): 8394-8405. DOI: 10.1109/TWC.2016.2614502
[45] YAN S H, HE B, ZHOU X Y, et al. Delay-intolerant covert communications with either fixed or random transmit power [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2019, 14 (1): 129-140. DOI: 10.1109/TIFS.2018.2846257
[46] HU J S, YAN S H, ZHOU X B, et al. Covert communications without channel state information at receiver in IoT systems [J]. IEEE Internet of things journal, 2020, 7(11): 11103-11114. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2994441
[47] MA R Q, YANG X Q, PAN G F, et al. Covert communications with channel inversion power control in the finite blocklength regime [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(4): 835-839. DOI: 10.1109/LWC.2020.3046508
[48] PENG X, WANG J Q, XIAO S, et al. Strategies in covert communication with imperfect channel state information [C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685518
[49] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H. Covert wireless communication in presence of a multi-antenna adversary and delay constraints [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(12): 12432-12436. DOI: 10.1109/TVT.2019.2948608
[50] BENDARY A, ABDELAZIZ A, KOKSAL C E. Achieving positive covert capacity over MIMO AWGN channels [J]. IEEE journal on selected areas in information theory, 2021, 2(1): 149-162. DOI: 10.1109/JSAIT.2021.3053862
[51] JAMALI M V, MAHDAVIFAR H. Covert millimeter-wave communication: design strategies and performance analysis [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(6): 3691-3704. DOI: 10.1109/TWC.2021.3123307
[52] WANG M L, XU Z, XIA B, et al. DF relay assisted covert communications: analysis and optimization [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(3): 4073-4078. DOI: 10.1109/TVT.2022.3220336
[53] WANG M L, XIA B, YAO Y, et al. Fundamental limit among covertness, reliability, latency and throughput for IRS-enabled short-packet communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(4): 3886-3900. DOI: 10.1109/TWC.2023.3312796
[54] SOBERS T V, BASH B A, GOECKEL D, et al. Covert communication with the help of an uninformed jammer achieves positive rate [C]//Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2015: 625-629. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421206
[55] TAO L W, YANG W W, YAN S H, et al. Covert communication in downlink NOMA systems with random transmit power [J]. IEEE

wireless communications letters, 2020, 9(11): 2000–2004. DOI: 10.1109/LWC.2020.3011191
[56] WANG M C, YANG W W, LU X B, et al. Channel inversion power control aided covert communications in uplink NOMA systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(4): 871–875. DOI: 10.1109/LWC.2022.3149279
[57] KANG B C, YE N, QI B. Comparisons on covert performances of NOMA in satellite Internet of things [C]//Proceedings of Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp). IEEE, 2021: 318–322. DOI: 10.1109/ComComAp53641.2021.9652913
[58] SOLTANI R, GOECKEL D, TOWSLEY D, et al. Covert wireless communication with artificial noise generation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(11): 7252–7267. DOI: 10.1109/TWC.2018.2865946
[59] ZHENG T X, WANG H M, NG D W K, et al. Multi–antenna covert communications in random wireless networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(3): 1974–1987. DOI: 10.1109/TWC.2019.2900915
[60] ZHENG T X, YANG Z T, WANG C, et al. Wireless covert communications aided by distributed cooperative jamming over slow fading channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(11): 7026–7039. DOI: 10.1109/TWC.2021.3080382
[61] HE B, YAN S H, ZHOU X Y, et al. Covert wireless communication with a Poisson field of interferers [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(9): 6005–6017. DOI: 10.1109/TWC.2018.2854540
[62] WU J Y, CHEN C F, BU X Y. Polar code–aided frequency offset estimation algorithm in satellite covert communication carrier synchronization [C]//Proceedings of IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020: 1340–1344. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085165
[63] XUE R, WANG Y C. A satellite overlapping covert communication scheme based on LDPC–DCSK transmission technology [C]//Proceedings of 2020 The 9th International Conference on Networks, Communication and Computing. ACM, 2020: 147–151. DOI: 10.1145/3447654.3447675
[64] QIAN Y B, MA L, LIANG X W. Symmetry chirp spread spectrum modulation used in LEO satellite Internet of Things [J]. IEEE communications letters, 2018, 22(11): 2230–2233. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2866820
[65] YANG Y, ZHU L D, MAO X, et al. The spread spectrum GFDM schemes for integrated satellite–terrestrial communication system [J]. China communications, 2019, 16(12): 165–175. DOI: 10.23919/JCC.2019.12.013
[66] TSATSANIS M K, GIANNAKIS G B. Blind estimation of direct sequence spread spectrum signals in multipath [J]. IEEE transactions on signal processing, 1997, 45(5): 1241–1252. DOI: 10.1109/78.575697
[67] KOIVISTO T, KOIVUNEN V. Blind despreading of short–code DS–CDMA signals in asynchronous multi–user systems [J]. Signal processing, 2007, 87(11): 2560–2568. DOI: 10.1016/j.sigpro.2007.04.012
[68] CHEN C F, WANG S, LI L, et al. Intelligent covert satellite communication for military robot swarm [J]. IEEE access, 2019, 8: 5363–5382. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2963320
[69] WANG D Y, QI P H, ZHAO Y, et al. Covert wireless communication with noise uncertainty in space–air–ground integrated vehicular networks [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(3): 2784–2797. DOI: 10.1109/TITS.2021.3098790
[70] XU J P, BAI L, ZHOU L, et al. Covert downlink mmWave communication for massive MIMO LEO satellite [M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 653–664. DOI: 10.1007/978–981–19–6052–9_59
[71] SHAHZAD K, ZHOU X Y, YAN S H, et al. Achieving covert wireless communications using a full–duplex receiver [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(12): 8517–8530. DOI: 10.1109/TWC.2018.2878014
[72] CHEN X Y, SUN W, XING C W, et al. Multi–antenna covert communication via full–duplex jamming against a warden with uncertain locations [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 5467–5480. DOI: 10.1109/TWC.2021.3068096
[73] XU T Z, XU L, LIU X Y, et al. Covert communication with A full–duplex receiver based on channel distribution information [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). IEEE, 2018: 1–4. DOI: 10.1109/ISAPE.2018.8634312
[74] LI X M, DUAN G D, YAN S H, et al. Optimizing UAV jammer for covert communication of LEO satellite system [C]//Proceedings of 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech). IEEE, 2022: 156–161. DOI: 10.1109/ISCTech58360.2022.00032
[75] FENG S H, LU X, SUN S M, et al. Covert communication in large–scale multi–tier LEO satellite networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2024, PP(99): 1–12. DOI: 10.1109/TMC.2024.3396793

作 者 简 介



邓娜，大连理工大学副教授；主要研究领域为B5G/6G无线通信网络、无线能量传输、无人机通信、隐蔽通信、智能通信等。



邢成文，北京理工大学教授；主要研究领域为机器学习、统计信号处理、凸优化、多元统计和阵列信号处理。



赵楠，大连理工大学教授；主要研究领域为人工智能、智能反射面、通感一体化、无人机通信、安全与隐蔽通信。

低轨卫星网络接入与传输技术

Access and Transmission Technology for LEO Satellite Networks

申佳伟/SHEN Jiawei，洪涛/HONG Tao，
张更新/ZHANG Gengxin

（南京邮电大学，中国 南京 210003）
(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405010
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20241017.1705.008.html
网络出版日期：2024-10-17
收稿日期：2024-08-10

摘要：针对低轨卫星网络空口传输特征，在地面5G NR体制的基础上利用智能化网络与轻量化终端间的协同，实现用户的广域无感接入与适变传输。梳理了低轨卫星网络空口传输关键技术，认为需要采用内生智能的方法辅助空口设计，从空口赋能AI和AI辅助空口两个方面构建完整闭环的研究体系，最后展望了未来低轨卫星网络的研究趋势。

关键词：低轨卫星网络；波形；多址；接入与传输；人工智能

Abstract: Through an analysis of the air interface transmission characteristics of low earth orbit (LEO) satellite networks, a method is proposed for achieving wide-area seamless access and adaptive transmission through the synergy between intelligent networks and lightweight terminals, built upon the terrestrial 5G NR framework. The key technologies for air interface transmission in LEO satellite networks have been systematically reviewed. It is believed that an endogenous intelligence approach should be employed to assist air interface design. The research framework is envisaged to be constructed as a complete closed loop, focusing on two main aspects: empowering AI through the air interface and utilizing AI to assist the air interface. Finally, future research trends in LEO satellite networks are anticipated.

Keywords: low earth orbit satellite network; waveform; multiple access; access and transmission; artificial intelligence

引用格式：申佳伟, 洪涛, 张更新. 低轨卫星网络接入与传输技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 68-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405010
Citation: SHEN J W, HONG T, ZHANG G X. Access and transmission technology for LEO satellite networks [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 68-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405010

1 低轨卫星网络背景及意义

移动互联网和物联网应用需求的持续增长，促使移动通信网络向全场景服务和全球深度覆盖发展，但单纯依赖地面移动通信将难以满足此需求。目前，发展低轨卫星互联网已成为下一代信息技术竞争新高地。通过部署低轨卫星互联网，以增强并扩展地面网络的覆盖范围，能够显著提升在海洋、山区等偏远区域的网络可达性。这种网络架构在自然灾害或突发事件发生时，仍能保持通信服务的连续性，同时也能有效支持大范围移动目标（如飞机、轮船、火车等）的网络需求并提供不间断的通信服务等。从全球来看，第3代合作伙伴计划（3GPP）从R15开始重点关注非地面网络（NTN），尤其是卫星网络，并在R16、R17以及R18中持续对NTN进行研究。美国联邦通信委员会（FCC）在2023年通过了太空补充覆盖的提案，明确用卫星来补充地面移动通信网络覆盖，支持手机直连卫星。此外，中国也出台了《“十四五”信息通信行业发展规划》等政策，确立卫星互联网的战略地位。这些文件的核心关注点都是如何在全球范围内满足爆炸式增长的“人连”与“物联”应用需求。

但与地面网络相比，低轨卫星网络具有一些特殊性，主要包括以下几个方面[1-2]：1）传统地面网络是平面网络，引入低轨巨型星座后网络发展为立体多层网络，波束覆盖情况复杂，多类型终端、多频段、多协议混合接入。2）低轨卫星以高速绕地球运行，致使多普勒频移效应尤为显著。此外，卫星的高动态特性不仅引发了传输信道的时变性，还导致终端与卫星网络之间的连接关系发生快速动态变化。3）地面终端的通信距离通常为公里量级，而低轨卫星终端的信号传播距离则通常达到数百到数千公里量级。这种大尺度的

基金项目：国家自然科学基金项目（U21A20450、62171234、61971440）；江苏省前沿引领技术基础研究专项（BK20192002）；国家重点研发计划项目（2022YFB2902600）

时空传输导致了大传播时延，从而使得信道状态信息（CSI）过时。低轨卫星信道以直射分量为主，信道特性是欠散射信道，难以获得多输入多输出（MIMO）分集增益。4）相比于地面基站，低轨卫星是存储、计算、传输资源受限平台，服务能力有限。5）卫星轨道移动、用户和业务需求的不均性，使得系统内多址干扰和系统外同频干扰在空间、时间、频率和功率维度呈现高度的不规则性，从而导致系统的可用资源具有动态时变性和高维不规则性。

因此，低轨星座通信技术需要在地面5G新空口（NR）体制基础上，根据上述低轨空口特征做适应性的改造，以提升低轨卫星网络下终端的接入与传输能力。本文从低轨卫星网络背景及意义、低轨卫星星座与NTN标准以及低轨卫星网络传输空口关键技术这3个方面论述低轨卫星网络通信技术。

2 低轨卫星星座与NTN标准

2.1 低轨卫星星座发展

1）国外低轨星座发展

欧美等国对低轨星座的建设起步较早，在20世纪末便出现了Iridium、Globalstar、Orbcomm三大低轨卫星星座通信系统。近几年来，多家公司展开了低轨卫星星座部署的计划，其中包括：SpaceX公司的Starlink低轨星座、OneWeb公司的OneWeb卫星星座、亚马逊公司的Kuiper星座、铱星公司的NXET星座、AST SpaceMobile公司的手机直连BlueBird星座等[3]。以Starlink为例，自2018年提出至2024年3月，该系统已成功完成超过5 000颗卫星的在轨组网并且涵盖了多个卫星型号。Starlink第一阶段星座计划在123个轨道面部署4 409颗卫星，轨道高度分布在550～1 325 km之间，并在用户端最低仰角为40°的条件下，实现了全球无缝覆盖。对于第二阶段星座及后续规划，SpaceX公司拟在轨道高度为330～350 km之间部署7 518颗V频段低轨巨型卫星。根据SpaceX向国际电信联盟提交的材料，其远期目标是实现多达42 000颗卫星的部署。

2）国内低轨星座发展

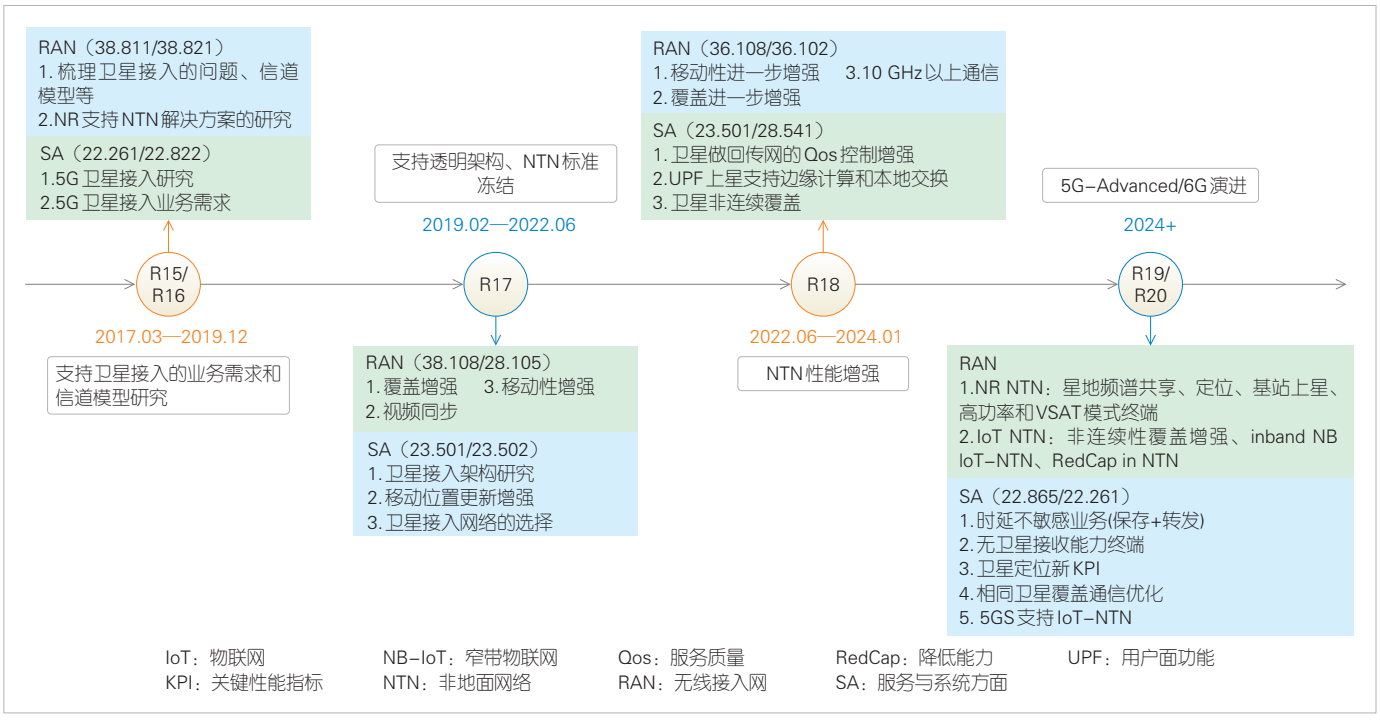
中国于2021年4月成立了中国卫星网络集团有限公司，负责建设与运营中国的低轨卫星互联网星座系统。目前规划分为一期和二期星座。一期星座主要是由60颗近极轨窄带卫星和108颗倾斜轨道宽带卫星组成。其中，极轨卫星轨道高度为1 175 km，倾斜角为86.5°，共有6个轨道面，每个轨道面有10颗卫星；倾斜轨道高度为1 150 km，倾斜角为50°，共有12个轨道面，每个轨道面有9颗卫星。一期星座主要包括支持标准速率话音、数据、短消息、物联网服务的窄带体制，以数字视频广播协议为基础改进的宽带体制和以5G协议为基础改进的宽带演进体制。星网二期星座还处于研制建设之中，计划的轨道高度为500 km左右，一共由约4 080颗卫星组成，全部使用以5G为基础的宽带演进体制。中国民用航天企业也在参与低轨星座的建设。2020年1月16日，银行航天发射全球首颗Q/V高频毫米波频段的低轨宽带卫星，单星可覆盖300 000 km^2，轨道高度1 200 km，截至2022年3月，已有7颗卫星在轨运行。上海垣信卫星科技有限公司提出的千帆低轨星座[4]，采用全频段、多层多轨道星座设计，将在2030年建设成拥有15 000颗卫星的星座，以提供宽带互联网服务。

综上可以看出，目前低轨星座的建设和发展方向在向巨型化星座方向发展。融合地面5G NR体制，低轨星座向巨型星座发展的原因如下：1）卫星网是一个相对均匀的稀疏网络，业务需求具有极不均匀性，需要通过资源调度在热点区域汇聚更多的卫星/波束资源，形成小区域内的密集波束覆盖场景，提升系统的容量；2）地面5G NR空口正交频分复用（OFDM）波形具有高峰均比的特征，低轨巨型星座通过增加系统中卫星数目增强了的系统总功率，从而提升了对于OFDM波形高峰均比的容忍度；3）低轨卫星星座全球运营，系统内外同频干扰严重，终端多星可视增加了系统的冗余度，并且可以通过选星接入策略利用空间隔离度规避同频干扰。

2.2 低轨卫星网络体系架构以及NTN标准

1）3GPP NTN网络标准

针对NTN网络的体制标准制定，国际电信联盟、3GPP以及中国通信标准化协会等标准化组织正在开展卫星互联网相关研究和标准制定工作。其中，在3GPP R15到R18中，5G NTN技术规范最具代表性。3GPP 5G NTN标准演进过程如图1所示[5]。3GPP R15主要定义了NTN的部署场景和参数，如体系架构、高度、轨道等，并确定对空口的潜在影响，研究了NTN的信道模型。3GPP R16针对先前研究中确定的空口方案，研究对无线接入网（RAN）协议/架构的影响。3GPP R17有两个目标：第一个目标是确定适用于物联网的NTN场景，包括支持基于透明有效载荷的LEO和GEO；第二个目标是对于上述确定的场景，研究并建议进行必要的适应性改造，以支持卫星上的窄带物联网（NB-IoT）和增强型机器类型通信（eMTC），尽可能重复使用3GPP TR 38.821中针对NR NTN进行的研究的结论。将用户设备（UE）中的全球导航卫星系统（GNSS）能力作为NB-IoT和



▲图1　3GPP 5G NTN 标准演进过程

eMTC设备的工作前提。有了这个前提，UE可以以足够的精度来估计和预补偿上行（UL）传输的定时和频率偏移。3GPP R18聚焦透明转发模式，对NR NTN以及IoT NTN体制进行进一步增强，并针对NR NTN的增强功能，以进一步完善5G卫星组网能力为目标，这主要包括支持10 GHz以上频段部署、覆盖增强、移动性和服务连续性增强以及星上本地数据交换技术。3GPP R18还针对IoT NTN的增强功能沿用R17 NTN中引入的移动性增强技术，通过禁用混合自动重传请求反馈进行业务体验增强，并研究改进的接入和移动管理功能增强对不连续覆盖的支持。

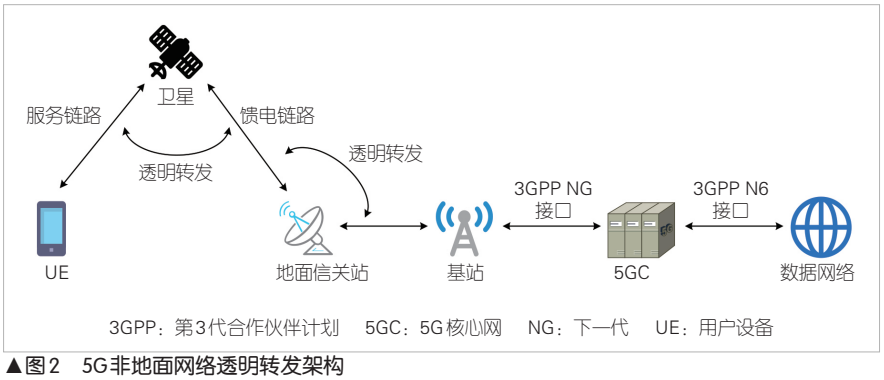
5G NTN标准是基于前期的5G标准规范，针对非地面网络接入做了适应性调整。因此，对于从事相关的通信设备研发工程师而言，可以很容易融入到5G NTN体制的卫星互联网产业中，只需要针对NTN场景解决5G关键技术的适应性及改造问题，为智能手机和其他类型的大众市场用户设备通过低轨卫星接入到网络中打下了坚实的基础。

2）低轨卫星网络体系架构

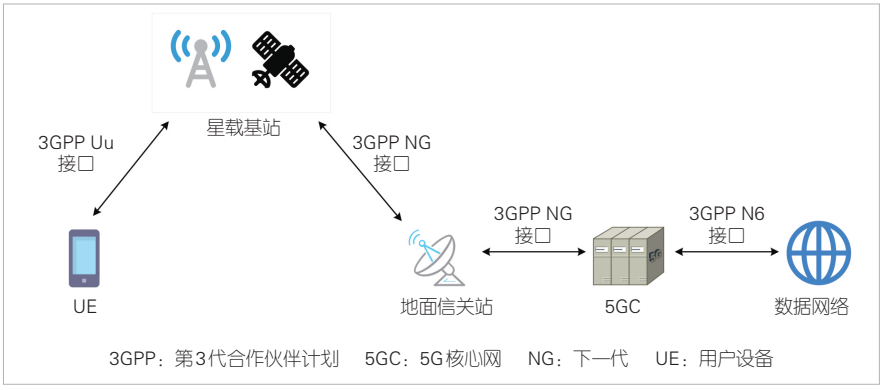
3GPP NTN在R17和R18版本中采用透明转发架构[6]，卫星仅实现射频相关功能，对卫星能力要求低，有利于NTN组网的快速落地。如图2所示，卫星作为终端和NTN网关中间的射频处理单元，实现无线信号的透明转发。信号的基带处理仍然放在地面基站去实现，因此该网络架构对卫星能力载荷和处理能力的要求较低，有利于网络的快速部署。

3GPP再生模式网络架构也在逐步完善，并在R19版本中已经可以支持再生载荷。除了射频部分，基站的部分（DU/CU）或全部功能、核心网的部分网元（例如用户面功能）或者全部功能均可以部署在星上。再生模式下服务链路采用Uu接口，馈电链路根据卫星所具备的功能实现Xn/N1/N2/N3等接口，如图3所示。

在低轨卫星网络特征下，移动终端如何自主接入到合适网络中，实现大跨度变化条件下的可靠适变传输？虽然体系架构设计中内生智能辅助的方法有利于实现上述的目标，但也带来了新的难题，例如：人工智能的应用将严重依赖于无



▲图2　5G非地面网络透明转发架构



▲图3　5G非地面网络的可再生网络架构

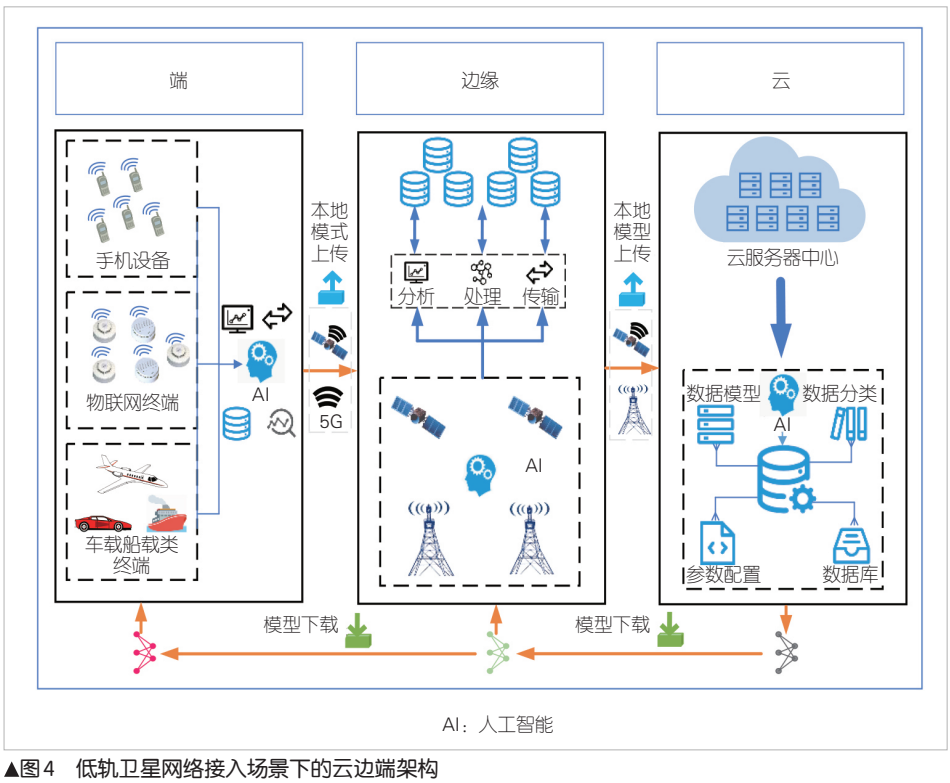
线网络交换数据、设备自身的计算资源以及端–边之间的相互合作，这将给空口传输带来前所未有的压力。因此，人工智能与无线通信的深度融合已成为关键技术方向，其中内生的人工智能体系架构尤为重要。不同于简单的人工智能辅助无线通信系统设计，在云–边–端架构上，以内生AI的方式研究AI辅助的空口设计，同时设计空口赋能AI的研究范式。AI辅助空口是在空口的设计中将通过终端设备、基站/卫星边缘节点、信关站云端的感知、存储、计算和通信能力，促成内生的AI去辅助空口设计。空口赋能AI是在设计前就综合考虑终端不同业务的需求、系统能够提供的资源、内生AI对于终端和卫星节点计算资源和传输资源的需求，充分开发基于AI的物理层和媒体接入控制（MAC）层的智能设计，利用深度学习算法，使模型从大量的无线物理层和MAC数据中自动学习、调整和升级，实现空口的智能化设计。具体而言，云层由地面云数据中心组成，负责集中式的数据处理和全局管理；边缘层由具有计算能力的卫星载荷、地面边缘节点构成，负责本地数据处理和快速响应；端层由直接与卫星网络交互的用户设备或传感器组成，负责数据的采集和指令的执行，如图4所示。

3 低轨卫星网络传输空口关键技术

低轨卫星网络是一个立体多层、动态变化的信息网络，不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大，系统内的多址干扰和低轨境外波束系统外同频干扰动态变化，使得固定或事先设定模式的接入与传输方式很难适应时变复杂的网络接入与传输需求。核心问题需要解决在立体多层网络覆盖场景中，多频段、长变时延、协议各异的网络条件下，移动终端如何自主接入到合适网络中，实现大跨度变化条件下的可靠适变传输。这需要打破原来单一系统僵化的固定式或事先设定接入与传输模式，利用智能化网络与轻量化终端间的协同，使得系统空口具备自学习、自演进能力，从而适应多样化的动态场景。

3.1 传输波形

空口传输波形直接关系着无线通信系统的接收性能和能谱效率，其中多载波波形，特别是OFDM凭借其卓越的抗多径衰落能力、高频谱效率及实现复杂度较低的特性，在第4代和第5代地面移动通信系统中得到了广泛应用。但是，当前OFDM波形较高的数据传输速率，以及其提供较高质量的服务是以在准静态或者低中速移动环境下为前提所得到的，在未来低轨卫星的高移动性和多样化业务场景下面临诸多的挑战[7]。低轨卫星波束广、覆盖终端类型多样，且对地高速



▲图4　低轨卫星网络接入场景下的云边端架构

移动而导致多普勒频移现象显著。在高移动性场景下，多普勒效应会破坏OFDM波形子载波的正交性。为了维持正交性，通常需要增加子载波带宽或进行多普勒预补偿改善，但这会显著降低OFDM波形的频谱效率。此外，OFDM波形的频谱旁瓣较高，且由于载波间的严格正交性要求，使得OFDM波形的灵活配置能力受到了限制。OFMD波形由于多载波调制相位随机叠加，波形具有高峰均比的特征，而低轨卫星平台受限于平台载重是功率受限系统。高峰均比的OFDM波形需要回退，避免波形进入放大器的非线性区引起波形的严重畸变。放大器工作点的回退严重降低了放大器的功率效率。在低轨卫星高动态场景下研究具有多样化业务服务能力的性能稳定、灵活高效的新型波形具有重要的意义。

针对低轨高动态信道下传输波形的研究中，正交时频空（OTFS）是一种二维调制技术，其通过将低轨卫星场景下的高动态时频域信道模型映射为时延–多普勒域的稀疏慢变的信道模型，充分利用了时延–多普勒域的信号特征，从而更好地适应低轨卫星场景下高动态信道的特性。在实际应用中，OTFS波形采用时域矩形脉冲成形与匹配处理，既能满足理想信道条件下的正交性要求，又因其结构简单、高效，易于在硬件中实现。但是由于OTFS波形存在信号功率谱旁瓣衰减缓慢干扰相邻频带的问题，从而导致波形频谱利用率的降低。滤波成形OFDM技术是一种通过在子载波级对信号时频波形进行滤波成形的高级调制方法。该技术不仅在降低功率谱旁瓣方面表现出显著优势，而且对频偏具有较强的抗干扰能力。此外，它允许根据特定的传输需求灵活调整波形的时频结构，从而显著提升波形设计的灵活性。然而，与传统正交OFDM波形不同，滤波成形OFDM波形中的导频符号受到周围导频和数据符号的非正交干扰，给信道估计、导频设计以及符号恢复带来了较大的挑战。

3.2 多址技术

当前的卫星通信系统主要面向传统的连接型通信业务，如语音和视频传输，广泛采用了固定分配的正交多址接入技术，包括时分多址（TDMA）、频分多址（FDMA）和码分多址（CDMA）等。在现有系统中，TDMA和FDMA技术尤为普遍，应用范围涵盖了地球静止轨道（GEO）、中地球轨道（MEO）和低地球轨道（LEO）等多种轨道的通信系统。固定分配正交多址接入技术由于其具有技术成熟度高、信道利用效率高的优点，所以在长时连接型通信业务中表现出显著优势。但是由于低轨卫星互联网的终端类型多样，卫星互联网网络结构具有动态变化性、低轨卫星星上资源受限以及星地传播时延较大的特点，固定分配正交多址接入技术在该环境下因频繁的信令交互而显得低效。非正交多址（NOMA）多个用户可以使用同一个无线传输资源块，从信息论角度可以更好地逼近多用户信道容量。并且，在低轨多类型用户场景下多址问题的关键是大量用户能够得到保障目标速率的服务，而不是追求单个用户的极限传输容量。NOMA接入方式可以吸收某些单用户的峰值速率用来支持卫星波束覆盖的大规模用户的连接数，并且用户数据包可以碰撞，有利于在卫星长传播时延信道下的免授权传输方式。典型的MOMA技术包括：中兴通讯提出的多用户共享接入技术（MUSA）[8]、华为公司提出的稀疏码多址技术（SCMA）[9]等非正交接入技术。

在卫星物联网的应用领域中，典型的业务特征包括短小的数据包和高突发性的交互模式。与传统固定分配的多址接入技术相比，随机接入（RA）技术在这些环境中可以有效地提高系统资源的利用率。然而，这种接入方式对于数据包碰撞具有较低的容忍性，特别是在信道负载增加时，系统的性能可能会急剧下降，引发所谓的“雪崩效应”。考虑到随机接入技术的轻控制特性与物联网业务对短数据包和无连接通信的需求高度契合，物联网产业的演进对随机接入技术提出了新的挑战。具体而言，这些挑战涉及从传统的碰撞避免策略转变为未来的碰撞容忍和碰撞消除策略的方向发展。研究者们提出了一系列基于竞争解决的增强型随机接入技术，包括竞争解决分集时隙ALOHA技术[10]、非规则重传时隙ALOHA技术[11]、编码时隙ALOHA技术[12]等。这些技术可以看作是NOMA技术与RA技术的结合，其核心思想是利用串行干扰消除技术消除碰撞对系统性能造成的影响，从而达到提升系统信道利用率的目的。

3.3 接入策略

低轨卫星网络的存在可以实现全球的网络覆盖。然而，在一些区域（如城郊等），多种网络以及不同卫星波束会产生密集波束覆盖的场景，而用户接入不同的波束会对网络性能和用户体验带来极大的影响。因此，用户接入策略，即通过优化选择用户的接入波束以提升网络性能，成为研究的重中之重。当前多层网络覆盖接入选择策略主要分为：单目标决策、多目标综合加权决策、方案理论优化决策。1）单目标决策：文献[13]介绍了异构网络中的负载均衡策略，用户终端在覆盖其的通信节点内基于信号强度和业务负载判断切换的必要性，以及选择需进行切换时的目标通信节点，避免了部分通信节点过载，实现了负载均衡。2）多目标综合加权决策：文献[14]面向GEO/LEO异构卫星网络，提出了一种基于参数自适应的多属性接入和切换决策算法，综合考虑信

干噪比、用户需求带宽、流量传输成本和卫星负载状况，保证多媒体业务的服务质量（QoS），并定义了一个自适应参数，进一步平衡网络负载。3）方案理论优化决策：文献[15]在异构卫星网络与用户层建立博弈模型，提出了一种双方博弈选择算法，综合考虑了网络满意度和用户多样化需求。

多波束覆盖可根据不同业务需求和外界环境影响为用户自主选择接入不同的网络，而终端业务需求、网络负载、接入信道状况、系统内外干扰、动态波束服务时间、接入用户公平性、系统吞吐量等不同的参数影响终端自主接入性能，多个参数相互作用难以优化求解。多频段、多协议混合接入，网络立体多层，卫星的高速运动和用户的随机移动，均会导致终端与地面网/卫星网的连接关系和传输环境动态变化，从而使得传播信道多样复杂、动态变化，难以建模，因此需要利用智能化网络与轻量化终端间的协同，通过人工智能辅助设计终端的广域自主接入方法。但终端和低轨卫星是存储、计算、传输资源受限的平台，需要适配终端/卫星能够提供的资源和使用的人工智能算法复杂度，才能实现智能化网络协助便携式终端的广域自主接入。

3.4 传输技术

大规模天线阵列是地面网络提升信道容量的主要手段。学术界提出了从空域上对设备进行分簇的思想[16]，其核心思想是利用多天线系统所特有的空间自由度，将空间上正交或者准正交的设备分为不同的簇。每个簇内的设备共享一个空间波束，通过设计发射波束，可以部分甚至完全消除簇间干扰。文献[17]在星地融合网络场景下研究了用户成组配对和功率分配以最大化系统的容量。多天线技术是5G等下一代无线网络的重要核心技术之一，东南大学在基于大规模天线阵的波分多址接入技术方面做了大量研究[18-19]。借鉴地面5G网络中的多输入多输出技术，充分挖掘空域资源，是提升低轨卫星系统传输容量是一种有效解决方案。但与地面富反射环境信道不同，卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道，采用基于多天线收发的空时编码技术并不能取得理想的分集增益。文献[20]在大规模低轨星座场景下提出了一种面向用户的虚拟MIMO传输架构，讨论了系统的双工模式、导频设计、波束成形、切换管理等系统问题，并在切换管理、功率分配、用户QoS需求约束下最大化系统的吞吐量。

卫星信道是直射分量占主体的欠散射信道，采用地面5G网络中多天线收发的空时编码技术并不能取得理想的分集增益，需要采用多波束成形技术提升系统资源的复用增益。而星地间长传播时延导致难以获得终端的实时信道信息，低轨卫星的在轨高速运动和终端的随机移动又造成统计信道信息准确度低、生存周期短，从而无法辅助高动态环境下的无线传输。此外，不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大，系统内的多址干扰和系统外同频干扰动态变化，使得传统地面网络多天线MIMO传输方法以及固定或事先设定模式的传输方式很难适应时变复杂的低轨卫星网络。立体多层动态网络场景难以建模、服务终端海量、卫星处理能力有限使得信道参数难以准确获得、多个约束和性能参量相互作用的NP-hard问题难以求解、这些都需要通过AI辅助空口设计的方法实现系统适变传输的需求，同时需要研究适配终端和卫星存储、计算、传输资源的空口赋能AI的部署方法，从而实现自学习、自演进能力的传输技术。

4 结束语

低轨卫星网络具有覆盖范围广、网络立体多层、应用场景多样、终端需求差异大、服务对象多样、服务终端海量、星地传输时延大、卫星处理能力受限等系统特征，并且由于卫星的高速运动和用户的随机移动，终端与网络连接关系和传输环境会动态变化。不同频段间、宽窄带业务间信道差异性大，系统内的多址干扰和低轨境外波束系统外同频干扰动态变化，使得原来单一系统僵化的绑定式接入与传输模式不再适用。低轨卫星高动态使得场景时变复杂难以建模，并且低轨卫星网络中终端业务需求、传输信道特征、网络负载、系统内外干扰、动态波束服务时间、用户的成组分簇、接入用户公平性等多个约束参数和性能指标形成相互作用的NP-hard问题难以求解，需要采用内生智能的方法辅助空口设计，从空口赋能AI和AI辅助空口两个方面构建完整闭环的研究体系实现系统接入与传输的需求，从而实现自学习、自演进能力的接入与传输方式以适应多样化的低轨动态场景。

参考文献

[1] 吴巍, 张更新. 天基物联网技术 [M]. 北京: 电子工业出版社
[2] 汪春霆, 翟立君, 李宁, 等. 关于天地一体化信息网络典型应用示范的思考 [J]. 电信科学, 2017, 33(12): 36-42. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017322
[3] 方芳, 吴明阁. 全球低轨卫星星座发展研究 [J]. 飞航导弹, 2020, 5: 88-92. DOI:10.16338/j.issn.1009-1319.20190258
[4] 高梓贺, 姚海鹏, 张磊, 等. 低轨巨型星座体系架构设计与关键技术分析 [J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 43-52. DOI:10.11959/j.issn.2096-8930.2024015
[5] 孙建成, 孙嘉颍, 缪德山, 等. 5G NTN网络架构标准化演进的思考 [J]. 电信科学, 2023, 39(9): 76-86. DOI: 10.11959/j. issn. 1000-0801.2023168
[6] 3GPP. Study on management aspects of Internet of things (IoT) non-terrestrial networks (NTN) enhancements: 3GPP TR 28.841 [S]. 2023
[7] 杨刚华, 何高宁, 陈睿荣, 等.6G 无线空口传输技术研究进展与展望

[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1078–1113. DOI:10.3969/j.issn.1003–3114.2021.06.001
[8] YUAN Z F, YU G H, LI W M, et al. Multi–user shared access for Internet of Things [C]//Proceedings of IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2016: 1–5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504361
[9] NIKOPOUR H, BALIGH H. Sparse code multiple access [C]// Proceedings of IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2013: 332–336. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666156
[10] CASINI E, DE GAUDENZI R, DEL RIO HERRERO O. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): an enhanced random access schemefor satellite access packet networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2007, 6(4): 1408–1419. DOI: 10.1109/TWC.2007.348337
[11] LIVA G. Graph–based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA [J]. IEEE transactions on communications, 2011, 59(2): 477–487. DOI: 10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
[12] PAOLINI E, LIVA G, CHIANI M. High throughput random access via codes on graphs: coded slotted ALOHA [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2011: 1–6. DOI: 10.1109/icc.2011.5962871
[13] YONEYA R, MEHBODNIYA A, ADACHI F. Two novel handover algorithms with load balancing for heterogeneous network [C]// Proceedings of IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015–Fall). IEEE, 2015: 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2015.7391183
[14] SONG H Y, LIU S J, HU X, et al. Load balancing and QoS supporting access and handover decision algorithm for GEO/LEO heterogeneous satellite networks [C]//Proceedings of IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2018: 640–645. DOI: 10.1109/CompComm.2018.8781039
[15] JIANG J, GUO D. A mutual satellite heterogeneous network selection algorithm of multiuser based on game theory [J]. Application of electronic technique, 2014: 591–598. DOI: 10.3969/j.issn.0258–7998.2014.10.032
[16] RIAZUL ISLAM S M, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power–domain non–orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(2): 721–742. DOI: 10.1109/comst.2016.2621116
[17] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Non–orthogonal multiple access based integrated terrestrial–satellite networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35 (10): 2253–2267. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2724478
[18] XIONG X, WANG X D, GAO X Q, et al. Beam–domain channel estimation for FDD massive MIMO systems with optimal thresholds [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(7): 4669–4682. DOI: 10.1109/TWC.2017.2701371
[19] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for millimeter–wave/terahertz massive MIMO transmission with per–beam synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1550–1563. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699100
[20] ABDELSADEK M Y, YANIKOMEROGLU H, KURT G K. Future ultra–dense LEO satellite networks: a cell–free massive MIMO approach [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473753

作 者 简 介



申佳伟，南京邮电大学在读硕士研究生；研究方向为卫星物联网。



洪涛，南京邮电大学副教授；研究方向为卫星物联网、卫星通信等；发表论文11篇。



张更新，南京邮电大学教授、博士生导师；研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络；作为项目负责人完成科研项目30余项，获省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖8项；发表论文100余篇，授权国家发明专利30余项，出版学术著作5部。

5G电源模组高精度3D结构光测量技术

High-Precision 3D Structure Optical Measurement Technology for 5G Power Modules

邓芳伟/DENG Fangwei，黄石军/HUANG Shijun
（中兴通讯股份有限公司，中国 深圳 518057）
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405011
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20241031.1811.002.html
网络出版日期：2024-11-01
收稿日期：2024-08-06

摘要：提出了多视角大景深高精度3D视觉传感技术。运用高清数字光处理（DLP）结构光投影技术和高速高分辨工业相机，从板级集成电路设计、控制驱动软件研发、3D点云重建与处理算法等方面深入研究，自主研发亚微米级/低成本多视角大景深高精度3D视觉测量技术。主要包括：采用高分辨率、高帧率的工业摄像机，实现高精度的三维重建；采用多波长相位扩展法，实现高精度的相位计算；利用多工业摄像机解决视场隐藏，扩大了三维重构视场，最终实现了0.48 μm *Z*轴的重复精度。

关键词：多视角；三维重建；多波长相位扩展法

Abstract: The multi-angle large-field-depth high-precision 3D visual sensing technology is proposed, which uses the high-definition digital light processing (DLP) structure light projection technology and high-speed high-resolution industrial camera to conduct in-depth research on board-level integrated circuit design, control drive software R&D, and 3D point cloud reconstruction and processing algorithms, and independently develops sub-micron-level/low-cost high-precision 3D visual measurement technology. High-resolution and high-frame-rate industrial cameras are used to achieve high-precision 3D reconstruction. The multi-wavelength phase spread method is used to implement high-precision phase calculation. Multi-industrial cameras are used to hide the field of view, expanding the three-dimensional reconstruction of the field of view, and finally achieving the repetition accuracy of the 0.48 μm *Z* axis.

Keywords: multi-perspective; three-dimensional reconstruction; multi-wavelength phase spread method

引用格式：邓芳伟, 黄石军. 5G电源模组高精度3D结构光测量技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 75-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405011
Citation: DENG F W, HUANG S J. High-precision 3D structure optical measurement technology for 5G power modules [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 75-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405011

1 背景概述

随着以手机、智能穿戴设备为代表的3C电子高端制造业的迅猛发展，传统“光源+镜头+2D工业相机”的机器视觉检测方式对精密零件的空间尺寸、平面度、段差、表面质量关键指标参数的获取难以实现。3D视觉检测技术成为高端制造行业产品品质提升的关键之一。然而，目前市场上已有的3D视觉检测设备仍不能很好地满足3C电子高端制造行业的检测需求。

在现有5G电源模组测量工艺中，大多使用2D相机进行平面测量，其中测量的尺度主要为芯片尺寸、位置以及整体的缺漏，但是对于电源模组中的一些插针并没有很好的测量方案，往往依靠人工借助仪器观看和经验判断来评判插针高度是否一致，以及是否需要修正和调整。为此，在主要的5G电源模组生产线中，插针的高度往往不能被很好地测量出来。通常情况下，装配的误差和运输中的磕碰经常会导致插针产生高低不平整，没有被检出的模组会进一步导致后面的工序受到影响。因此，电源模组的生产良品率将会受到较大影响。

基金项目：国家重点基础研究发展计划项目（2010CB328200、2010CB328201）；国家高技术研究发展计划项目（2006AA01Z257）；国家自然科学基金项目（60602058、60572120）；国家科技重大专项（2009ZX03003-002-02）

2 解决方案

业界针对3D机器视觉测量技术进行了探索研究。文献[1]使用了时间编码的结构光系统来获得精确的3D测量数据。这项工作考虑了构成结构光系统的相机和投影仪中的镜头畸变。所提出的方法可以实现大约1 mm的平均误差。此外，多视角结构光系统也很受欢迎。文献[2]提出了一种基于立体视觉的3D测量方法，以实现自动测量系统，将测量精度提高到大约0.1 mm。文献[3]提出了一种将两个任意相机组合成一个系统的方法，每个组合都可以将数据生成到通用坐标系中。这项工作进一步提高了测量精度，使测量精度达到了约0.02 mm，在3D结构光测量中使用了二进制散焦技术来加快测量速度。文献[4]结合了1D条纹调制和2D条纹调制，有助于提高效率和准确性。这种方法可以减少16.9%的测量误差[4]。

从上述研究结果中，我们可以发现，在微米级别的3D机器视觉形状测量解决方案中，尚未有被证实的技术[5]。高精度3D机器视觉技术的最佳结果仍然大约是1 μm，且没有进一步的突破[6-7]。当前机器视觉领域的主流解决方案是使用单目或立体相机来重建表面。在结构光中使用多目相机来解决更大的测量视野问题仍然是一个空白领域。

为了解决5G电源模组生产线中插针的歪斜三维测量问题，我们提出了多视角大景深高精度3D视觉传感技术，运用高清数字光处理（DLP）结构光投影技术和高速高分辨工业相机，从板级集成电路设计、控制驱动软件研发、3D点云重建与处理算法等方面深入研究，自主研发亚微米级/低成本的高精度3D视觉测量技术。核心技术点如下：1）利用多路高分辨率摄像机生成多视点图像，以保证数据处理速度，并在一定程度上解决了点云数据单侧阴影和缺失问题。同时，利用算法优化数据冗余度和信息重叠度。2）采用459 nm频带的高分辨率蓝光投影模块屏蔽大部分环境光，为结构化光测量系统提供亮度高、稳定可靠的测量光源。3）采用多频四步移相法的正弦波光栅编码方案，可解开正弦波相位，避免二值化引起的相位计算误差，提高系统对表面纹理干扰的鲁棒性。

3 系统设计

本系统采用4个16MP Basler CoaX - Press 2.0 boA5320–150 cm高分辨率的工业相机、1个DLP 4710模块1 080 P分辨率的投影仪。其中，DLP模块可以达到120 Hz的投影频率。在实测情况下，为了使摄像机的视场覆盖物体，重叠视场要大于物体，4个摄像机都能生成物体的图像，我们设计了一个多视角系统，并使用SolidWorks模拟重叠视场，找到最佳测量点。3D测量系统和仿真结果如图1所示。

1）4个相机部署在同一水平高度，光心都聚焦在检测物体的中心，达到相机重叠区域最大化；

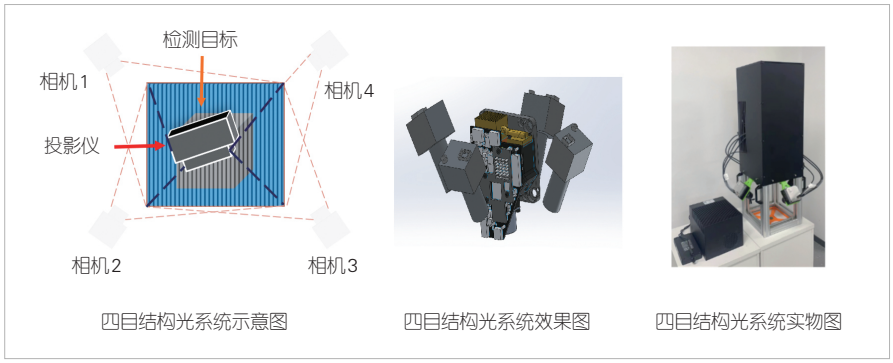
2）DLP投影仪垂直向下部署，向检测物体表面投出不同纹路图案；

3）工控机提供信号控制和数据接口，一方面触发投影仪和相机拍摄，另一方面获取相机采集的图像数据；

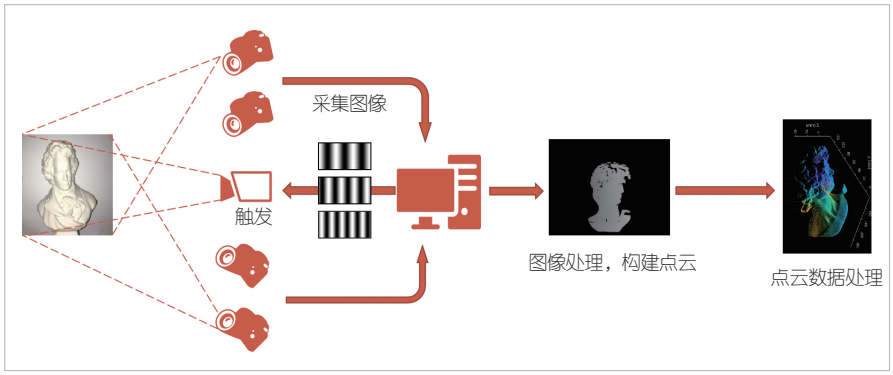
4）在采集区域提供水平面板，用于放置检测物体，确保位姿水平，符合拍摄要求。

4 工作流程

图2显示了这一系统的主要工作流程。一旦将测试对象置于系统的测量视野范围内，就会触发工控机执行测量程序。投影仪拍摄一组连续正弦曲线，并同时触发摄像机。触发的摄像机捕捉图像，并将其发送到工控机以进行进一步处



▲图1 系统设计图



▲图2 工作流程示意图

理。系统利用校准参数和处理后的图像，以点云的形式重建测试对象。

1）系统准备：根据实际需要利用多相机系统，从不同视角准确捕获条纹图像，利用投影仪生成清晰、对比度适中的正弦条纹图。

2）摄像机标定：通过摄像机标定来建立有效的成像模型，求解出摄像机的内外参数。这些参数包括焦距、光心（内参数），以及相机的位置、姿态（外参数）。

3）生成正弦条纹图：使用计算机编程生成一系列具有特定相位差（如π/2）的正弦条纹图。这些条纹图将用于后续的投影。

4）投影正弦条纹：将生成的正弦条纹图依次投影到被测物体上。投影仪需要按照预定的顺序和相位差投影条纹，以确保后续能够准确提取相位信息。

5）拍摄条纹图像：使用4个相机从不同的视角拍摄目标场景或物体，获取二维图像序列。这些图像需要覆盖目标物体的各个侧面，以便后续能够从中提取足够的三维信息。

6）相位提取：从每个视角的条纹图像中提取相位信息，对相位进行解包裹处理以获得连续的相位分布图。

7）相位匹配：将不同视角的相位分布图进行匹配，建立相位点之间的对应关系。

8）三维重建：利用相位差与物体高度之间的数学关系（如三角测量原理）计算出被测物体上各点的高度信息，将计算出的高度信息与二维图像坐标相结合生成被测物体的三维点云数据。

5 技术思路

如图3所示，系统主要由硬件搭建、参数标定、点云构建、点云处理、点云配准5个模块组成，各模块功能如下：

1）硬件搭建主要负责相机、结构光投影仪、工控机、数据线、采集卡、标定板等设备的选型和组装，以及标定和调试等工作。它是实现3D视觉测量的基础，其意义在于提供高质量的图像数据，从而实现精准的三维测量。正确选择和优化可以提高测量的精度和效率，同时也可以为不同应用场景提供定制化的解决方案。

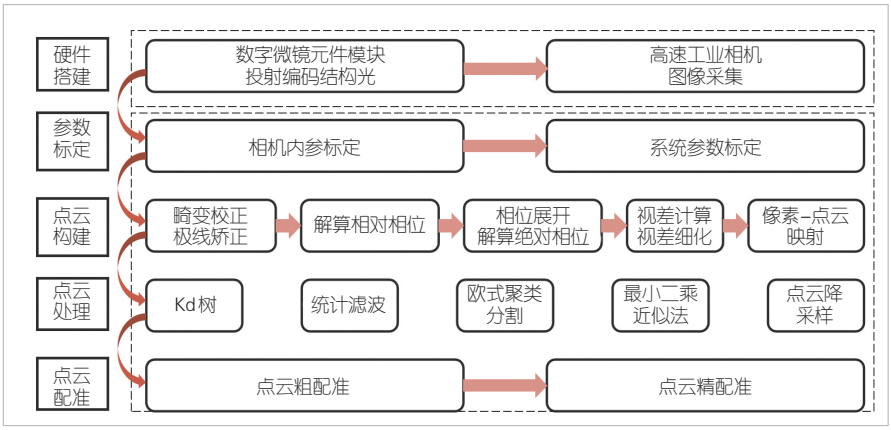
2）参数标定用于确定相机和激光扫描仪等设备的内部和外部参数，以便进行准确的三维测量。这通常包括两个方面：相机内部参数标定和外部参数标定。其中，相机内部参数标定主要是指确定相机的焦距、畸变等参数，这些参数会影响到相机成像的精度和质量；外部参数标定则是指确定相机的位置和姿态等参数。正确的参数标定可以消除设备本身的误差，从而实现更加准确的三维测量。

3）点云构建是指将三维场景或物体表面的离散点数据转换成点云模型的方法。使用工业相机和结构光进行扫描和捕获物体表面图像信息，采用相移法生成点云数据。点云构建包括：

- 畸变矫正主要针对由于设备运动或采集过程中产生的点云数据变形问题；
- 极线矫正主要用于解决由于相机内外参数不一致导致的左右视图对应点不在同一水平线上的问题；
- 解算相对相位的目的主要在于提取和分析信号或波之间的相位差异，这种差异通常包含了关于被测对象的重要信息；
- 相位展开恢复被折叠或包裹的相位信息到其真实、连续的数值范围；
- 视差计算通过测量和计算不同观测点对于同一目标的观测差异，来推断或确定目标物体与观测者之间的距离；
- 像素点云映射将三维空间中的点云数据映射到二维图像平面上，以便进行进一步的图像处理和分析。

4）点云处理是对采集到的点云数据进行处理和分析的过程，目的是提取有用的信息并将其转换为可视化或数字模型。点云处理包括数据表示、统计滤波、欧式聚类分割、MLS、点云降采样等功能。

- 数据表示是指利用存储k维空间向量点集并进行快速检索的树形数据结构；
- 统计滤波通过测量数据的局部统计特征来消除噪声或提取特定的特征；
- 欧式聚类分割将无序的点云数据根据空间中的几何特



▲图3　系统架构

征和密度分布分割成多个有意义的簇或群组；

• MLS通过局部加权最小二乘方法，对离散数据点进行曲面拟合；

• 点云降采样减少点云中的点数，从而显著降低数据量。

5）点云配准是将多个点云数据对齐到同一个坐标系中的过程，以便进行后续处理和分析。粗配准是在两个点云之间的变换完全未知的情况下进行的较为粗糙的配准，目的是为精配准提供一个较好的变换初值。利用随机参数估计算法通过随机采样和一致性检验来估计数学模型的参数，处理包含大量噪声和离群点的数据。

精配准是在粗配准的基础上，进一步计算两个点云之间的精确旋转和平移矩阵。利用迭代最近点（ICP）算法，通过迭代优化的方式，逐步最小化对应点对之间的误差，从而实现对齐。

6 关键技术

1） 四步相移法

投影模组生成具有一定相移的正弦光栅条纹图，相机将同步拍摄这一组光栅图像[8]。由于物体表面的高度变化，投射的光栅图案会发生扭曲，这种扭曲实质上反映了物体表面的相位信息。四步相移法通过精确控制投影图案的相位变化，并记录相应的干涉图像，从而实现对物体表面相位信息的精确测量。通过分析具有一定相位差的多幅光栅图像，解算出被测物表面形貌数据的相位初值。通过正确的相位初值和更多的编码图案进行相位展开，得到在图像画面范围内的无歧义绝对相位值[9]。通常带有相移的光强可以表示为：

$$\mathrm{In}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \delta]\ 。 \quad (1)$$

其中，In为光强函数，A为背景光强，B为条纹的调制幅值，$\Phi(x, y)$点对应的相位，δ为移动相位值，采用四步相移法，其相移步距为：0、π/2、π、3π/2，则光强表达式依次是：

$$\mathrm{In}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y)], \quad (2)$$

$$\mathrm{In}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \pi/2], \quad (3)$$

$$\mathrm{In}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + \pi], \quad (4)$$

$$\mathrm{In}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\Phi(x, y) + 3\pi/2]。 \quad (5)$$

通过对四幅不同相移的光栅图像进行相位提取，可以使用公式（6）完成对相位主值的计算[10]：

$$\Phi(x, y) = \arctan((I_2 - I_4)/(I_1 - I_3))。 \quad (6)$$

由此可以得到在图像中呈周期变化的相位主值。但由于单一频率所得到的相位主值并不能完全覆盖整幅图像的像素分布，这会导致不同位置的像素可能具有相同的相位主值，因此还需要对相位主值进行展开，通过展开周期变化的相位主值得到能包裹整幅图像的绝对相位。具体步骤如下：

• 投影相位图案：投影仪首先投射一个初始相位为0的正弦光栅图案到物体上。随后，依次改变投影图案的相位，每次增加π/2，直到完成4个相位状态（0, π/2, π, 3π/2）的投影。

• 图像捕获：相机在每个相位状态下捕获一幅图像，共得到4幅干涉图像。这些图像包含了由于物体表面高度变化而引起的光栅图案扭曲信息。

• 相位计算：通过算法处理这4幅干涉图像，计算出它们之间的相位差。常用的算法包括傅里叶变换法、相移算法等。这些算法能够利用图像中的光强信息反推出相位信息，从而得到物体表面的相位分布图。

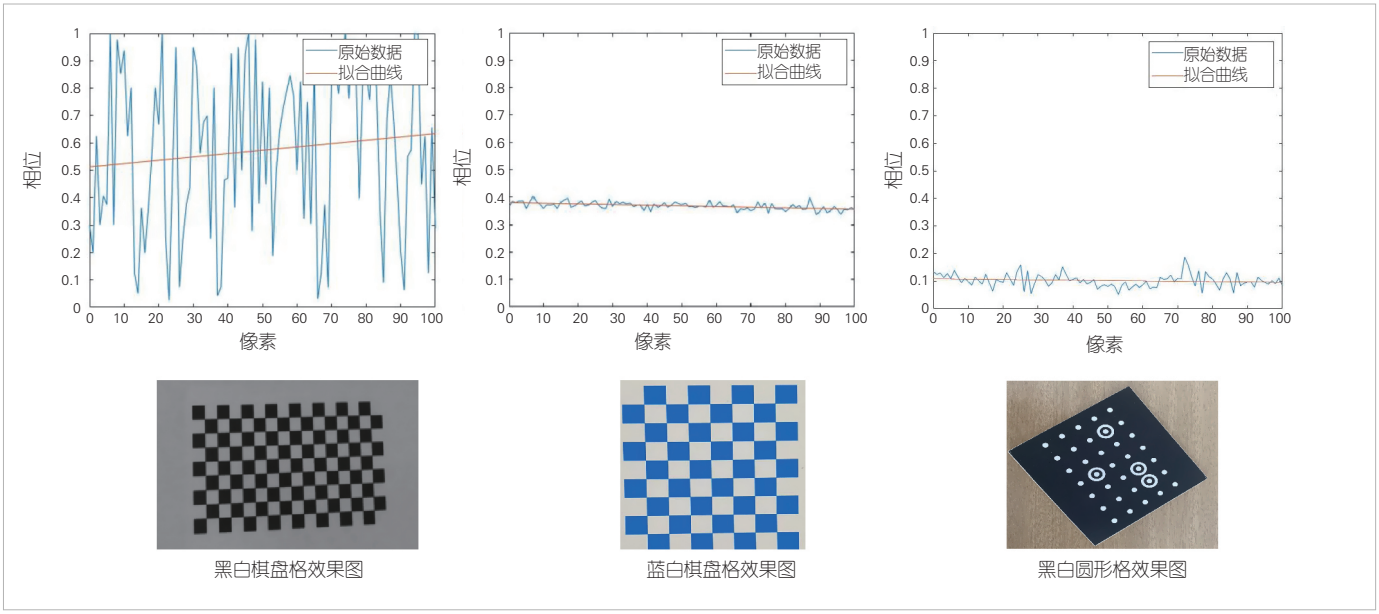
• 三维重建：根据得到的相位分布图以及投影仪、相机和物体的几何关系，利用数学方法计算出物体表面的三维坐标。这一步骤通常需要结合标定好的系统参数和相机成像模型进行。

2）结构光系统标定模型

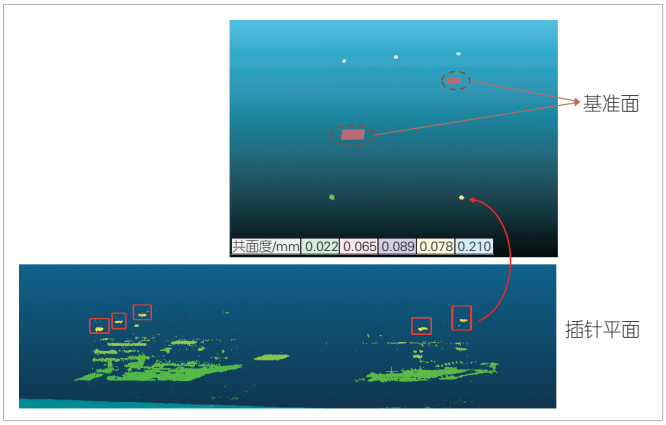
在校准方法中，目前主流使用的是张式校准方法[11]，具备稳定性和鲁棒性。但这种方法也有缺点，因为结构光系统在校准过程中，采用投影方式来进行校准，棋盘校准板一般需要放置在4个角落，如果棋盘校准板被正弦曲线覆盖，那么当放置在角落时，特征很难被准确地从曲线中提取出来。改进的校准方法是用圆校准板代替棋板，因为圆点与背景是分开的。这样，无论投影的模式是否存在，圆点都很容易提取。黑白棋盘格相位误差为：0.302 弧度，蓝白棋盘格相位误差 0.13 弧度，黑白圆形格相位误差 0.024 弧度。图 4 显示，在提取角点的重投误差中，圆形校准板的性能比棋盘校准板好得多，并且黑白棋盘校准板的相位变化最大，圆形校准板的相位变化最小（理想的相位是单行恒定的）。

3）点云处理算法

在印制电路板（PCB）生产过程中，有时PCB上的针脚可能因人为干扰或装配误差而偏斜，因此必须找出针脚是否垂直。为了找到PCB上的针脚的共面度，必须准确找到针脚的顶面。如图5所示，利用生成的点云数据，通过采用RANSAC算法或最小均方法拟合，从而准确得到针脚的顶面，计算所有针脚的顶面彼此之间的距离。设置最大距离和



▲图4　不同校准板的相位分布



▲图5　点云处理效果图

最小距离之间的差值可以决定针脚的共面度，其中RANSAC算法是通过随机采样数据集中的一部分点（假设为内点）来拟合模型，然后用这个模型去测试数据集中的所有点，找出符合模型的数据点（内点），并排除不符合的数据点（外点）。通过多次迭代，算法不断寻找包含更多内点的模型，直到满足一定的条件（如迭代次数达到预设值或内点数量超过一定比例）为止。RANSAC算法的核心在于其随机性和迭代性，这使得它能够在存在大量外点的情况下依然能够估计出合理的模型参数。

7 实验结果

表1显示了实际5G电源模块PCB测量结果。我们将试验结果与坐标测量机（CMM）和Mega相3D结构光照相机M051090进行比较，并进一步与实际值进行比较。实验表明，在实际测量中，采用均方根计算得出的重复性误差为0.001 mm，绝对误差为0.01 mm。测试结果如表1所示。

▼表1　测试结果

测试工件	本系统测量值/mm	本系统测量误差/mm	CMM测量值/mm	CMM 测量误差/mm	M051090 测量值/mm	M051090 测量误差/mm
PCB 1	7.226 2	0.015 15	7.258 8	0.007 81	7.296 6	0.017 21
	7.259 2		7.263 0		7.272 4	
	7.238 2		7.257 2		7.282 8	
	7.228 0		7.274 5		7.299 8	
PCB 2	7.304 9	0.040 76	7.302 8	0.030 59	7.328 9	0.044 17
	7.259 2		7.326 0		7.381 2	
	7.311 9		7.372 9		7.398 9	
	7.358 8		7.352 4		7.415 9	

CMM：坐标测量机　PCB：印制电路板

8 结论

本文所提系统采用高速摄像机和高频投影机实现了5G电源模组的三维重建和高精度的针脚测量应用。实验结果表明，与CMM和M051090相比，该系统的重复性和准确度都能满足实际生产要求。

该系统可以应用于3C电子制造行业的立体尺寸测量、空间精确定位引导、器件表面形状分析等高精度测量领域，具体应用包括手机中框尺寸检测、手机镜头模组胶路检测、金属配件高度测量、电池表面质量检查等。此外，该系统的相关技术成果还可以用于高端制造，例如汽车零配件的铸造件表面质量缺陷检查等。

高精度3D结构光测量技术能够实现亚微米级别的精确测量，对于需要严格控制的工业生产和科学研究至关重要。在生产过程中，企业可以利用该技术对产品进行实时、在线的测量和检测。这种实时的质量控制能够及时发现并解决潜在的质量问题，提高产品的质量和稳定性，还能够为产品设计和生产提供精确的尺寸、形状和表面粗糙度等参数，有助于企业优化产品设计、改进生产工艺，进而提升产品的市场竞争力。

在智能制造、数字化工厂等新型生产模式下，高精度3D测量技术更是发挥着关键作用。通过对工厂设备进行全生命周期测量、虚拟装配、动态模拟等操作，企业可以更好地实现生产过程的数字化和智能化。

参考文献

[1] KUNZMANN H, TRAPET E, WÄLDELE F. A uniform concept for calibration, acceptance test, and periodic inspection of coordinate measuring machines using reference objects [J]. CIRP annals, 1990, 39(1): 561–564. DOI: 10.1016/s0007–8506(07)61119–6

[2] EI–HAKIM S F, BERALDIN J A, BLAIS F. Comparative evaluation of the performance of passive and active 3d vision systems [EB/OL]. [2024–08–06]. https://core.ac.uk/outputs/24323593/

[3] VILAÇA J L, FONSECA J C, PINHO A M. Calibration procedure for 3D measurement systems using two cameras and a laser line [J]. Optics & laser technology, 2009, 41(2): 112–119. DOI: 10.1016/j.optlastec.2008.05.012

[4] GENG J. Structured–light 3D surface imaging: a tutorial [J]. Advances in optics and photonics, 2011, 3(2): 128. DOI: 10.1364/aop.3.000128

[5] MOTTA J M S T, DE CARVALHO G C, MCMASTER R S. Robot calibration using a 3D vision–based measurement system with a single camera [J]. Robotics and computer–integrated manufacturing, 2001, 17(6): 487–497. DOI: 10.1016/s0736–5845(01)00024–2

[6] GALLUCCI A, ZNAMENSKIY D, et al. Prediction of 3D body parts from face shape and anthropometric measurements [J]. Journal of image and graphics, 2020, 8(3): 67–77. DOI: 10.18178/joig.8.3.67–74

[7] FURUNO T, FUJITA S, WANG D H, et al. 3D bow and posture measurements for virtual reality customer service training system [J]. Journal of image and graphics, 2021, 9(4): 152–156. DOI: 10.18178/joig.9.4.152–156

[8] AILANI V, PRAKASH D, VENKATESH K S. Self localization with edge detection in 3D space [J]. Journal of image and graphics, 2013, 1(2): 99–103. DOI: 10.12720/joig.1.2.99–103

[9], LEE H M, CHOI W C. Algorithm of 3D spatial coordinates measurement using a camera image [J]. Journal of image and graphics, 2015, 3(1): 30–33. DOI: 10.18178/joig.3.1.30–33

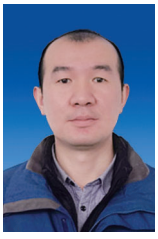
[10] HU H H, GAO J, ZHOU H Y, et al. A combined binary defocusing technique with multi–frequency phase error compensation in 3D shape measurement [J]. Optics and lasers in engineering, 2020, 124: 105806. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.105806

[11] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

作　者　简　介



邓芳伟，中兴通讯产业数字方案部产品总监；研究方向为产业数字化转型，具体包括提供行业数字底座和移动机器人以及相关配套产品。



黄石军，中兴通讯高级战略规划师；研究方向包括机器视觉、人工智能、计算机视觉。

基于分层自编码器的异常网络流量检测

Malicious Network Traffic Detection Based on Hierarchical Autoencoder

张晓青/ZHANG Xiaoqing[1,2]，谷勇浩/GU Yonghao[1,2,3]，田甜/TIAN Tian[4]
（1. 北京邮电大学计算机学院，中国 北京 100876；
2. 北京邮电大学智能通信软件与多媒体北京市重点实验室，中国 北京 100876；
3. 中山大学广东省信息安全技术重点实验室，中国 广州 510275；
4. 中兴通讯股份有限公司，中国 深圳 518057）
(1. School of Computer Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. Beijing Key Laboratory of Intelligent Telecommunications Software and Multimedia, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Security Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;
4. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI：10.12142/ZTETJ.202405012
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220706.0920.002.html
网络出版日期：2022-07-06
收稿日期：2022-05-10

摘要：通过研究现有异常网络流量检测技术存在的问题，提出了一种分层自编码器（HAE）集成模型，以无监督的学习方式摆脱了传统检测方法对于样本标签和攻击样本的依赖，以分层集成的方式学习正常流量的多种分布特征提高单个自编码的检测效果。与现有集成学习方式不同，HAE以串行的方式学习上一自编码器学得不好的样本，降低了训练和测试时间。仿真实验结果表明，相比传统的异常检测方法，HAE具有更高的检测率。

关键词：分层自编码器；异常网络流量检测；无监督学习方法；集成学习

Abstract: By studying the problems existing in the existing malicious network traffic detection technology, a hierarchical autoencoder (HAE) ensemble model is proposed, which gets rid of the dependence of traditional detection methods on sample labels and attack samples by unsupervised learning, learns various distribution characteristics of normal traffic by hierarchical integration, and improves the detection effect of single autoencoder. Different from the existing ensemble learning methods, HAE learns the samples that the previous self-encoder does not learn well in a serial way, which reduces the training and testing time. Simulation results show that HAE has a higher detection rate than traditional anomaly detection methods.

Keywords: HAE; malicious network traffic detection; unsupervised learning method; ensemble learning

引用格式：张晓青，谷勇浩，田甜．基于分层自编码器的异常网络流量检测 [J]. 中兴通讯技术，2024, 30(5): 81-86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405012
Citation: ZHANG X Q, GU Y H, TIAN T. Malicious network traffic detection based on hierarchical autoencoder [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(5): 81-86. DOI: 10.12142/ZTETJ.202405012

现有的网络攻击种类繁多，随着技术的发展，还会产生新的攻击类型或已有攻击类型的变种，而现有的基于有监督或半监督的恶意软件检测方法只对训练集中出现的恶意软件类别具有较好的检测效果，对于未知类别的恶意软件检测能力较弱。此外，该类方法还存在恶意软件流量获取困难、样本标注代价高等问题。因此，传统的基于有监督或半监督的异常检测方法对训练样本的要求较高，且对未知类别的恶意软件检测能力不足。为此，本文提出了一种新的无监督异常检测方法——分层自编码器（HAE）集成，以分层集成的方式提高自编码器的检测性能。本文的主要贡献如下：

1）基于自编码器提出了一种分层集成的模型HAE，通过学习正常流量的不同分布特征提高单个自编码器的学习效果；

2）基于3个公开数据集，将HAE与其他传统异常检测方法和集成方式进行对比实验，验证了HAE对于网络流量异常检测的有效性。

基金项目：北京邮电大学中央高校基本科研业务费行动计划项目（2021XD-A11-1）；中兴通讯产学研合作项目（HC-CN-20200807013）；广东省信息安全技术重点实验室开放基金项目（2020B1212060078）

1 研究现状

无监督异常检测方法通过学习正常样本的通用特征来区分异常样本，当检测行为与正常行为偏离较大时发出告警信息，不依赖样本标签和异常样本，省去了数据标记、恶意样本捕获等预处理工作，并且对于未知种类的恶意样本具有较好的检测效果，被广泛应用于各个领域，如医疗[1]、军事[2]、交通[3]等。本文从机器学习方法、深度学习方法以及集成学习方法3个方面介绍网络异常流量检测领域的无监督异常检测技术。

常见的机器学习异常检测方法有基于距离或密度的相似度度量方法、基于概率密度的方法等。研究人员[4-5]采用基于K-means聚类方法，将样本间距离作为相似度度量指标寻找正常样本的质心，基于样本到质心的距离计算异常分数，距离越远异常分数越大。高斯混合模型（GMM）是一种基于概率密度的异常检测方法，正常样本比异常样本具有更高的预测概率。BLANCO等[6]对于每维特征使用一个GMM进行建模，通过聚合所有特征的预测概率得到样本的正常分数。无监督机器学习方法实现简单，但是对离群点和噪声点敏感且运算开销大，难以应用于大规模数据集。作为一种有效的无监督降维方法，主成分分析法（PCA）常与其他异常检测方法结合使用进行异常检测[7-8]，以减少计算开销。

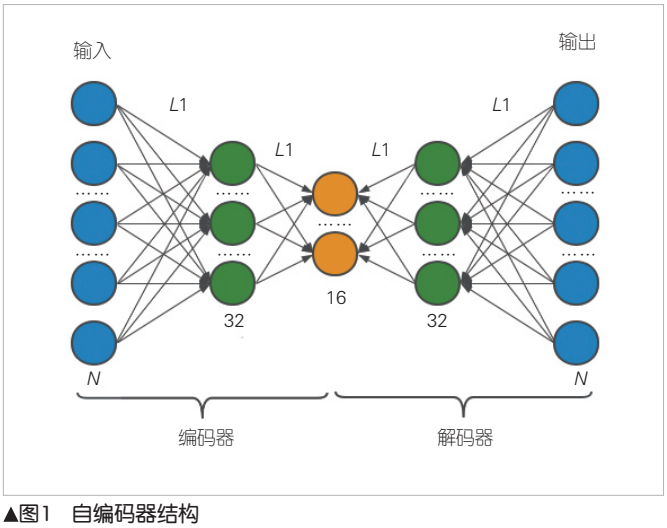
深度学习异常检测方法主要是基于自编码器（AE）的方法和基于生成式对抗网络（GAN）的方法。由于网络流量具有时序性，因此序列自编码器常被用于网络流量异常检测。孙旭日等[9]提出了一种基于长短期记忆（LSTM）的自编码网络结构，由LSTM-Encoder和LSTM-Decoder两部分组成。其中，前者对输入的特征向量时间序列数据进行等长学习表达，后者使用当前的隐含状态和前一步预测的值对编码后的时间序列进行重构，最后结合预设阈值检测异常流量。VU等[10]提出了多分布变分自动编码器（MVAE），在变分自动编码器的损失函数的KL项中引入了数据样本的标记信息，使其更具可分辨性。该标记信息允许MVAE将网络数据样本强制划分到潜在特征空间中不同区域的不同类中，使得网络流量更易区分。杨宏宇等[11]基于变分自动编码器和生成式对抗网络提出了V-G模型：首先使用多簇选择算法（MCFS）对多源数据进行无监督特征选择，然后构建V-G模型进行训练和参数优化，并通过均方根误差函数统计训练过程中的重构误差阈值。

集成学习通过组合多个弱学习器提高单个模型的检测效果，MIRSKY等[12]基于自编码器提出了一种轻量级的异常检测方法Kitsune：首先基于层次聚类将特征空间划分为多个子空间，分别使用一个自编码器进行特征降维与重构，然后使用一个自编码器对重构误差进行非线性聚合，得到样本的异常分数。为了克服自编码器过拟合和泛化能力弱的问题，吴德鹏等[13]使用降噪自编码器进行集成，以一定的概率将输入层节点的值置为零，通过对缺失特征数据进行预测提高自编码器的泛化性能。于振洋等[14]将AdaBoost算法引入网络异常流量检测中，分别对两种弱学习方法进行集成：估计多变量高斯分布和估计超球体区域，首先根据当前训练样本的权重分布得到弱学习器，计算样本的误差信息和弱学习器的权重，然后更新样本的权重分布重新训练得到多个弱学习器，对于测试样本，根据弱学习器的权重组合所有弱学习的输出结果。

2 基于分层自编码器的异常检测方法

2.1 自编码器

自编码器是一种无监督神经网络，主要由编码器和解码器两部分组成。其中，编码器将输入数据x压缩成浅层空间表征z，解码器对浅层空间表征进行重构，通过最小化输入样本x和重构样本$\hat{x}$的均方误差学习输入数据的特征。此外，自编码器作为一种数据压缩算法具有3个显著特征：数据相关、有损压缩、自动学习。常见的自编码器有稀疏自编码器、深度自编码器、卷积自编码、变分自编码器等。综合考虑数据的特点、神经网络的复杂度，文章采用的自编器类型为稀疏自编码器，如图1所示，输入和输出都是维度为N的特征向量，编码器和解码器都是一个两层的多层感知机（MLP），通过添加一个$L1$正则化项对隐层单元施加稀疏性约束，降低模型过拟合的风险。



▲图1 自编码器结构

2.2 集成学习

根据不同的场景，正常流量数据也分为多种，如上传、下载、浏览等。理想情况下，系统希望通过自编码器学习各种类型正常流量的分布特征，但是训练结果往往是模型只在部分训练数据上表现良好，因此可以通过集成学习组合多个自编码器，学习不同场景下正常流量的分布特征，降低误报。常见的集成方法有Bagging、Boosting等，其中Bagging随机抽取训练子集的方式针对性不强，缺乏指导原则，Boosting通过增加预测得不好的样本的权重来学习单个模型学习得不好的样本，这种方式使得它对样本噪声十分敏感。因此针对以上问题，本文提出了一种分层集成的方法，对当前层自编码器没有学好的样本构建下一层自编码器后重新训练，以较小的代价使得模型能够充分学习正常网络流量。

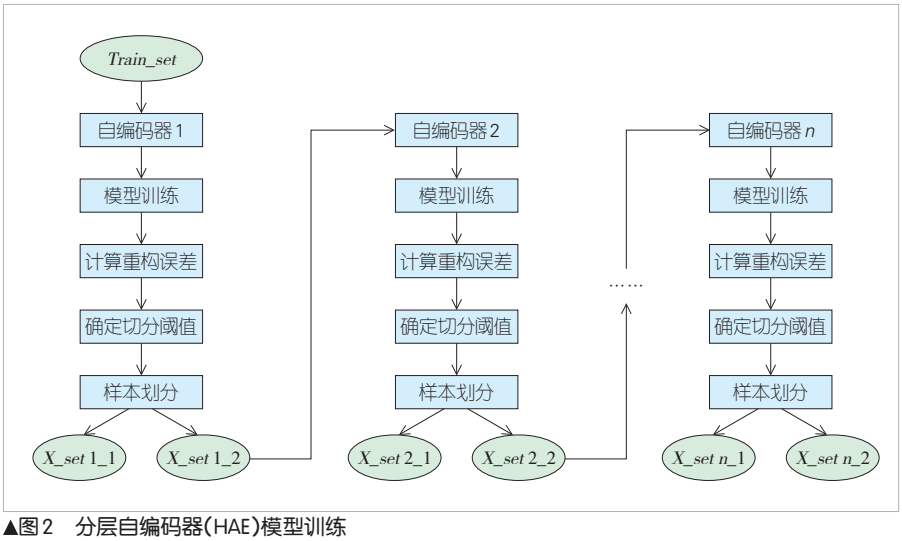
2.3 分层自编码器

为了指导模型学习正常流量的多种分布特征，本文提出分层集成的方式训练多个自编码器，如图2所示。多个自编码器以串行的方式进行集成，不同的自编码器独立训练，训练完成后的自编码器只在部分数据上表现良好。为了使模型学习到另外一部分数据的隐层特征，需要重新构建自编码器对这部分数据进行学习，通过不断地对自编码器表现不好的样本子集构建自编码器重新训练，得到在不同样本子空间上表现良好的自编码器集合。

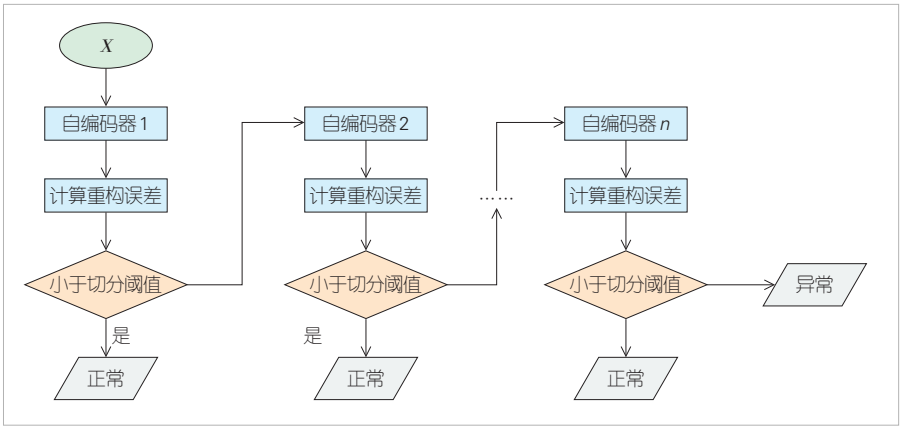
为了划分自编码器表现不好的样本子集，本文将重构误差作为样本集划分的依据，按照一定的比例将重构误差高的样本子集进行重新训练，如图2所示。自编码器训练完成后会根据重构误差将训练数据划分为两部分：X_set1和X_set2。两部分数据子集的大小满足$|X_set1|:|X_set2|=a$，重构误差MSE满足$MSE\{X_set1\}\leqslant b\leqslant MSE\{X_set2\}$，其中$a$是划分比例，$b$是当前自编码器对应的数据切分阈值，为了方便计算，将b设置为$\mathrm{Max}\{MSE\{X_set1\}\}$。$X_set1$的重构误差较低，说明该自编码器学到的隐层特征能够较好表示这一类样本，而X_set2是该自编码器学的不好的样本，将其输入到下一自编码器中重新学习。集成的自编码器的数目n作为模型的超参数，根据验证集的效果进行选取。

HAE模型预测或称如图3所示，每个自编码器相当于一个过滤器，对未知流量进行预测并计算重构误差，若重构误差小于数据切分阈值，则认为符合当前自编码器学习到的样本特征分布，否则输入到下一自编码器进行判断。若未知流量大于所有自编码器的异常阈值，则认为该流量与训练集中正常流量的特征分布不同，将其判定为异常。

本文分析了分层集成和AdaBoost集成的训练和测试复杂度。两种集成都以串行的方式进行集成，并根据上一自编码器的训练结果调整训练数据重新训练。不同的是，AdaBoost集成每次基于整个样本集进行训练，而分层集成则按照一定比例将学得不好的样本进行训练，训练集的规模在逐层递减，训练复杂度更低。在对未知样本进行预测时，AdaBoost集成中所有自编码器都需要参与决策，而分层集成可能在任何一个自编码器判断结束后停止，测试复杂度更低。复杂度



▲图2　分层自编码器(HAE)模型训练



▲图3　分层自编码器(HAE)模型预测

计算结果如表1所示。

3 实验验证与分析

3.1 数据集

为了验证HAE在网络异常流量检测方面的有效性和可用性，本文选择了CIC IDS 2017、UNSWNB15和USTCTFC 3个开源数据集进行对比实验。为了避免数据不均衡对评估指标的计算产生影响，我们选择全部的攻击流量及等量的正常流量作为测试集，其余正常流量作为训练集。不同数据集训练集和测试集规模如表2所示。

CIC IDS 2017数据集[15]基于B-Profile系统[16]模拟正常的主机交互行为，在不同的时间点设置了Brute Force、Heart-bleed、Botnet、拒绝服务（DoS）、分布式拒绝服务（DdoS）、Web Attack、Infiltration共7种攻击场景，包含12种具体的攻击类型，5天捕获了2 425 955条流量记录。我们使用流量特征提取工具CICFlowMeter[17]提取了80维流量特征，包含http、https、安全外壳协议（SSH）、文件传输协议（FTP）、Email共5种应用层协议。

UNSWNB15数据集[18]基于IXIA工具[1]模拟网络环境进行流量采集，分别以不同的攻击频率进行两次场景模拟，耗时31 h捕获了2 540 047条流量记录，包含DoS、Backdoors、Worms、Fuzzers、Analysis、Exploits、Generic、Reconnaissance、Shellcode共9种攻击类型。使用Argus、Bro-IDS两种特征提取工具和12种算法提取了49维流量特征，包含传输控制协议（TCP）、用户数据报协议（UDP）、互联网控制消息协议（ICMP）等多种传输层协议以及http、ftp、ssh、dns等多种服务类型。

USTCTFC数据集[2]中的攻击流量是由CTU大学2011年至2015年从真实网络环境中捕获的，包含Cridex、Geodo、Hitbot、Miuref、Neris、Nsis、Shifu、Tinba、Virut和Zeus共10种攻击类型。正常流量是使用IXIA工具[1]捕获的，包含BitTorrent、Facetime、FTP、Gmail、MySQL、Outlook、Skype、服务器消息块（SMB）、World Of Warcraft和Weibo共10种场景。数据集大小为558 641。

3.2 预处理

CIC IDS 2017数据集和UNSWNB15数据集提供的是特征提取后的流量数据，对于USTCTFC数据集提供的pcap格式的原始报文数据，本文使用特征提取工具CICFlowMeter[17]提取80维流量特征。此外，为了方便后续实验处理，需要对特征提取后的数据进行数据清洗和数据归一化。

1）数据清洗。网络会话捕获不完整或其他网络原因可能会导致特征提取后的个别流量中含有NaN、Inf等异常值，对后续数据处理产生影响。因为这部分流量占比较少，因此本文将包含异常值的流量作为“脏数据”进行剔除。

2）数据归一化。为了消除不同特征维度量纲的影响，本文采用线性函数归一化的方法将各个维度数据的数值范围归一化到0~1之间。归一化的过程如公式（1）所示：

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \tag{1}$$

其中，X_{norm}是归一化后的结果，X是原始数据，$X_{\min}$、$X_{\max}$分别是原始数据中的最小值和最大值。

3.3 性能评估指标

为了合理评估模型的性能，本文采用精确率Pre、召回率Rec和F1值作为性能评估指标。精确率又称为查准率，反映了预测结果为异常的样本中真实类别为异常的样本比例；召回率也称查全率，反映了异常样本中预测正确的样本比例；F1值反映了精确率和召回率的综合表现。精确率和

▼表2 数据集攻击类型及规模

数据集	攻击类型	训练集	测试集	数据集大小
CIC IDS 2017	12种	1 764 511	864 444	2 425 955
UNSWNB15	9种	1 897 481	642 566	2 540 047
USTCTFC	10种	127 814	430 827	558 641

▼表1 分层集成和AdaBoost集成的训练和测试复杂度

序号	ABAE	HAE	备注
1	$P = N$	$P = N \times (\frac{1}{1+a})^m$	P为第m个自编码器训练的样本量，N为原始训练集规模，a是HAE样本且分比例。
2	$T = M$	$T = \begin{cases} k, & x\text{为正常流量} \\ M, & \mathbf{x}\text{为异常流量} \end{cases}, k \leqslant M$	T是对未知样本x预测过程中参与决策的自编码器的数目，M为集成的自编码器的总数。

ABAE：基于AdaBoost的集成模型 HAE：分层自编码器

1 http://www.ixiacom.com/products/perfectstorm
2 https://github.com/yungshenglu/USTC-TFC2016

召回率相差较大会导致F1值降低。F1值常被用来衡量模型的整体性能。以上3种指标的计算公式如下：

$$\mathrm{Pre}=\frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FP}},\tag{2}$$

$$\mathrm{Rec}=\frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FP}},\tag{3}$$

$$\mathrm{F1}=\frac{2\times\mathrm{Pre}\times\mathrm{Rec}}{\mathrm{Pre}+\mathrm{Rec}},\tag{4}$$

其中，TP为恶意流量检测为恶意流量的样本数目，TN为正常流量检测为正常流量的样本数目，FP为正常流量检测为恶意流量的样本数目，FN为恶意流量检测为正常流量的样本数目。

3.4 模型性能评估

为了合理对比不同模型实验效果，本文基于相同的实验环境构建各个模型，选择各个模型最优的测试结果进行对比。为了体现HAE在网络异常流量检测中的优势，本文选择主成分分析方法（PCA）、孤立森林（IForest）和基于频数直方图的异常检测方法（HBOS）进行对比，实验结果如表3所示。其中，各个数据集上HAE的召回率和F1值优势比较明显，说明HAE能够极大提高异常样本的检出率，模型整体性能最优。从精确率指标可以看出，HAE在UNSWNB15和USTCTFC两个数据集上依然具有一定的优势，在CICIDS2017数据集上精确率较低，但是召回率和F1值都很高，说明HAE以较小的代价牺牲精确率，极大地提高了召回率，带来了模型整体性能的提升。综合比较模型的实验结果，HAE相比传统的机器学习方法效果更好，原因主要有两点：一是训练集规模较大，机器学习算法训练困难；二是HAE通过构建多层神经元提取不同层次的数据特征，表征能力更强。

为了验证分层集成的优势，本文选择基于AdaBoost的集成模型（ABAE）、自编码器AE、基于LSTM的时序自编码器（LSTM-AE）[9]进行对比实验，实验结果如表4所示。可以看出，其中各个数据集上HAE和ABAE的F1值均高于单个AE，这说明集成能够提高单个自编码器的学习效果。加入时序特征学习的LSTM-AE模型在CICIDS2017数据集上具有较好的效果，仅次于HAE模型，说明该数据集上时序特征明显，但是在其他两个数据集上效果不佳，甚至不如AE。在CICIDS2017数据集HAE的各项指标均高于ABAE，具有明显优势；在UNSWNB15数据集上HAE的精确率更高说明HAE在该数据集上能够降低误报，牺牲了一定的召回率，导致F1值比ABAE低约0.6%，但是HAE的复杂度比ABAE更低，计算效率更高；在USETCFTC数据集上HAE的召回率和F1值更高，精确率较低说明HAE以较小的代价牺牲了精确率带来了召回率的较大提升和模型整体性能的提高。综合F1值和模型复杂度进行分析，ABAE的效果更好，因为HAE中每一自编码器只专注于学习上一自编码器学得不好的样本，缓解了AdaBoost集成的不足，提升了模型的性能。

4 结束语

为解决现有网络异常检测领域中样本标记难、攻击流量

▼表3　不同数据集上HAE与传统机器学习方法的对比实验结果

数据集	CICIDS2017			UNSWNB15			USTCTFC		
指标	Pre	Rec	F1	Pre	Rec	F1	Pre	Rec	F1
PCA	81.21	43.22	56.42	81.56	44.40	57.50	94.42	71.88	81.62
IForest	80.26	40.64	53.95	78.54	36.32	49.67	94.52	73.35	82.60
HBOS	80.33	40.79	54.11	80.77	41.05	54.44	94.00	66.81	78.11
HAE	68.42	96.25	79.99	97.25	89.47	93.20	96.44	99.27	97.84

HAE：分层自编码器　　Iforest：孤立森林
HBOS：基于频数直方图的异常检测方法　　PCA：主成分分析方法

▼表4　不同数据集上HAE与AE、ABAE的对比实验结果

数据集	CICIDS2017			UNSWNB15			USTCTFC		
指标	Pre	Rec	F1	Pre	Rec	F1	Pre	Rec	F1
AE	69.01	83.67	75.64	90.30	93.28	91.77	95.77	97.07	96.41
ABAE	67.27	91.06	77.38	96.76	90.97	93.78	97.75	95.21	96.46
LSTM-AE	66.20	99.66	79.55	90.18	84.81	91.53	97.62	81.62	88.90
HAE	68.42	96.25	79.99	97.25	89.47	93.20	96.44	99.27	97.84

ABAE：AdaBoost的集成模型　AE：自编码器　HAE：分层自编码器

难以捕获，以及现有集成方式复杂度高、精度低的问题，本文提出了一种轻量有效的无监督集成方式：分层集成，并基于自编码器构建集成异常检测模型HAE，对自编码器学得不好的样本重新训练使得模型能够学习正常数据多种分布特征，提高了模型的检测效果，并通过划分阈值的方式降低模型复杂度。实验结果表明，HAE在多个数据集上优于其他异常检测模型，具有较强的泛化能力和特征学习能力。后续我们将考虑改进样本划分阈值的计算方法，使得模型能够根据训练结果动态调整阈值，并考虑使用变分自编码器学习隐变量的数据分布，降低模型过拟合的风险，提升模型的整体性能。

参考文献

[1] MOHAMED M B, MEDDEB-MAKHLOUF A, FAKHFAKH A. Intrusion cancellation for anomaly detection in healthcare applications [C]//Proceedings of 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2019: 313-318. DOI: 10.1109/IWCMC.2019.8766592

[2] GURUNG S, CHAUHAN S. Performance analysis of black-hole attack mitigation protocols under gray-hole attacks in MANET [J]. Wireless networks, 2019, 25(3): 975-988. DOI: 10.1007/s11276-017-1639-2

[3] GAO L L, LI F, XU X, et al. Intrusion detection system using SOEKS and deep learning for in-vehicle security [J]. Cluster computing, 2019, 22(6): 14721-14729. DOI: 10.1007/s10586-018-2385-7

[4] 贾凡, 严妍, 张家琪. 基于K-means聚类特征消减的网络异常检测 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(2): 137-142. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.26.005

[5] LIU H, HAO G, XING B. Entropy clustering-based granular classifiers for network intrusion detection [J]. EURASIP journal on wireless communications and networking, 2020, 2020(1): 4. DOI: 10.1186/s13638-019-1567-1

[6] BLANCO R, MALAGÓN P, BRIONGOS S, et al. Anomaly detection using Gaussian mixture probability model to implement intrusion detection system [M]//Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2019: 648-659. DOI: 10.1007/978-3-030-29859-3_55

[7] SALO F, BOU NASSIF A, ESSEX A. Dimensionality reduction with IG-PCA and ensemble classifier for network intrusion detection [J]. Computer networks, 2019, 148: 164-175. DOI: 10.1016/j.comnet.2018.11.010

[8] LIU L Q, XU B, ZHANG X P, et al. An intrusion detection method for Internet of Things based on suppressed fuzzy clustering [J]. EURASIP journal on wireless communications and networking, 2018, 2018(1): 113. DOI: 10.1186/s13638-018-1128-z

[9] 孙旭日, 刘明峰, 程辉, 等. 结合二次特征提取和LSTM-Autoencoder的网络流量异常检测方法 [J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(2): 17

[10] VU L, CAO V L, NGUYEN Q U, et al. Learning latent distribution for distinguishing network traffic in intrusion detection system [C]//Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019: 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2019.8762015

[11] 杨宏宇, 王峰岩. 基于无监督多源数据特征解析的网络威胁态势评估 [J]. 通信学报, 2020, 41(2): 143-154

[12] MIRSKY Y, DOITSHMAN T, ELOVICI Y, et al. Kitsune: an ensemble of autoencoders for online network intrusion detection [EB/OL]. [2022-06-15]. http://arxiv.org/abs/1802.09089

[13] 吴德鹏, 柳毅. 基于集成降噪自编码的在线网络入侵检测模型 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(11): 3396-3400. DOI: 10.19734/j.issn.1001-3695.2019.07.0300

[14] 于振洋. 基于Boosting的网络异常流量检测算法研究 [J]. 淮阴工学院学报, 2011, 20(5): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7961.2011.05.008

[15] SHARAFALDIN I, HABIBI LASHKARI A, GHORBANI A A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018: 108-116. DOI: 10.5220/0006639801080116

[16] SHARAFALDIN I, GHARIB A, LASHKARI A H, et al. Towards a reliable intrusion detection benchmark dataset [J]. Software networking, 2017, 2017(1): 177-200. DOI: 10.13052/jsn2445-9739.2017.009

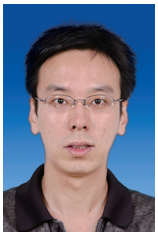
[17] LASHKARI A H, DRAPER G G, MAMUN M S I, et al. Characterization of tor traffic using time based features [EB/OL]. (2017-02-20) [2022-06-15]. https://pdfs.semanticscholar.org/d76f/32eb3af1a163c0fde624e9fc229671ca75b6.pdf

[18] MOUSTAFA N, SLAY J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set) [C]//Proceedings of Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS). IEEE, 2015: 1-6. DOI: 10.1109/MilCIS.2015.7348942

作 者 简 介



张晓青，北京邮电大学计算机学院在读硕士研究生；主要研究领域为网络安全、数据科学与信息处理。



谷勇浩，北京邮电大学计算机学院硕士研究生导师；主要研究领域为网络安全、数据科学与信息处理；主持参与国家级、省部级及企业资助的科研项目20余项；发表论文近100篇，申请专利20余项。



田甜，中兴通讯股份有限公司资深安全标准与产品总监；研究领域包括APT、M2M安全、WLAN安全、5G安全态势感知等；拥有10余年网络与通信安全领域经验，多次牵头与参与3GPP、IETF、ITU-T、CCSA的安全标准制定工作，拥有数十件欧美授权专利。

中兴通讯技术杂志社
促进产学研合作青年专家委员会

主　任　陈　为（北京交通大学）

副主任　秦晓琦（北京邮电大学）　卢　丹（中兴通讯股份有限公司）

委　员

曹　进　西安电子科技大学
陈　力　中国科学技术大学
陈　为　北京交通大学
陈琪美　武汉大学
陈舒怡　哈尔滨工业大学
陈思衡　上海交通大学
官　科　北京交通大学
韩凯峰　中国信息通信研究院
何　姿　南京理工大学
侯天为　北京交通大学
胡　杰　电子科技大学
黄　晨　紫金山实验室
李　昂　西安交通大学
刘　凡　南方科技大学
刘春森　复旦大学
刘俊宇　西安电子科技大学
卢　丹　中兴通讯股份有限公司
陆游游　清华大学
宁兆龙　重庆邮电大学
祁　亮　上海交通大学
秦晓琦　北京邮电大学
秦志金　清华大学
史颖欢　南京大学
唐万恺　东南大学
王景璟　北京航空航天大学
王兴刚　华中科技大学
王勇强　天津大学
温淼文　华南理工大学
吴泳澎　上海交通大学
武庆庆　上海交通大学
夏文超　南京邮电大学
徐梦炜　北京邮电大学
徐天衡　中国科学院上海高等研究院
杨川川　北京大学
尹海帆　华中科技大学
于季弘　北京理工大学
张　娇　北京邮电大学
张宇超　北京邮电大学
章嘉懿　北京交通大学
赵昱达　浙江大学
赵中原　北京邮电大学
周　伊　西南交通大学
朱秉诚　东南大学

刊物相关信息

投稿须知　投稿平台　过刊下载　论文索引与引用指南

中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

办刊宗旨：

以人为本，荟萃通信技术领域精英
迎接挑战，把握世界通信技术动态
立即行动，求解通信发展疑难课题
励精图治，促进民族信息产业崛起

产业顾问：

段向阳、高　音、胡留军、华新海、刘新阳、
陆　平、史伟强、屠要峰、王会涛、熊先奎、
赵亚军、赵志勇、朱晓光

双月刊　1995 年创刊
第 30 卷　总第 179 期
2024 年 10 月　第 5 期

主管：安徽出版集团有限责任公司
主办：时代出版传媒股份有限公司
　　深圳航天广宇工业有限公司
出版：安徽科学技术出版社
编辑、发行：中兴通讯技术杂志社

总编辑：王喜瑜
主编：王利
执行主编：黄新明
副主编：卢丹
编辑部主任：王萍萍
责任编辑：徐烨
编辑：杨广西、朱莉、任溪溪
设计排版：徐莹
发行：王萍萍
编务：王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址：合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室
邮编：230061
网址：tech.zte.com.cn
投稿平台：tech.zte.com.cn/submission
电子信箱：magazine@zte.com.cn
电话：（0551）65533356

发行方式：自办发行
印刷：合肥添彩包装有限公司
出版日期：2024 年 10 月 25 日
中国标准连续出版物号：ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价：每册 20.00 元