

# 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>。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<sup>[3]</sup>。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<sup>[4]</sup>，从而满足6G多样化任务需求。因此，语义通信被认为是具有竞争力的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<sup>[5]</sup>把单词表征为嵌入向量<sup>[6]</sup>。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<sup>[7]</sup>。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<sup>[8-9]</sup>。

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<sup>[10-12]</sup>。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<sup>[13]</sup>。

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<sup>[14]</sup>。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<sup>[2]</sup>。

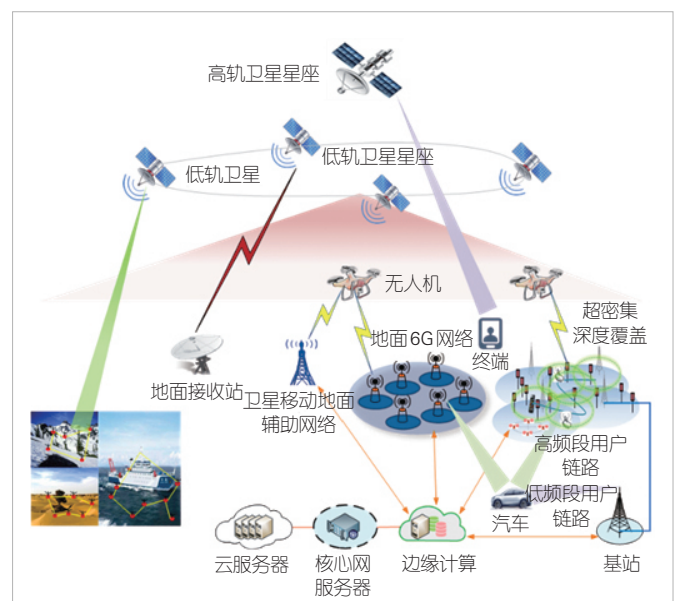
为应对无线信道中常见的信噪比（SNR）波动和噪声问题，北京邮电大学学者提出了一种基于潜在语义扩散模型的信道自适应去噪语义通信系统<sup>[15]</sup>。鹏城实验室的学者研究了基于语义知识库的多层级语义编码和传输机制，分别在视觉特征空间、语义特征空间、潜在特征空间进行类别判决，自适应地实现多层级传输与信道状态的智能适配<sup>[16]</sup>。

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。

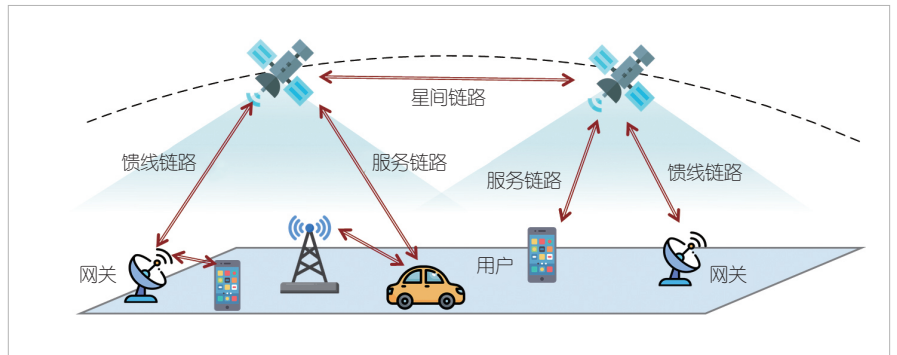
综合来看,面向6G空天地立体覆盖的基于语义的卫星通信系统在高效信息提取、可靠信息恢复和覆盖广度扩展方面,将面临动态环境、远距离传输和资源有限等多重技术挑战。

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

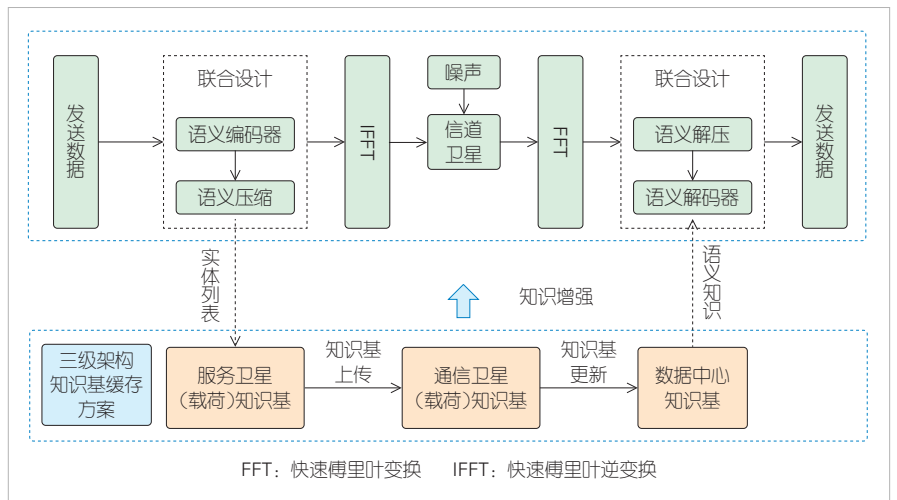
### 1.3 基于语义通信的卫星通信系统的链路结构

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,



▲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。

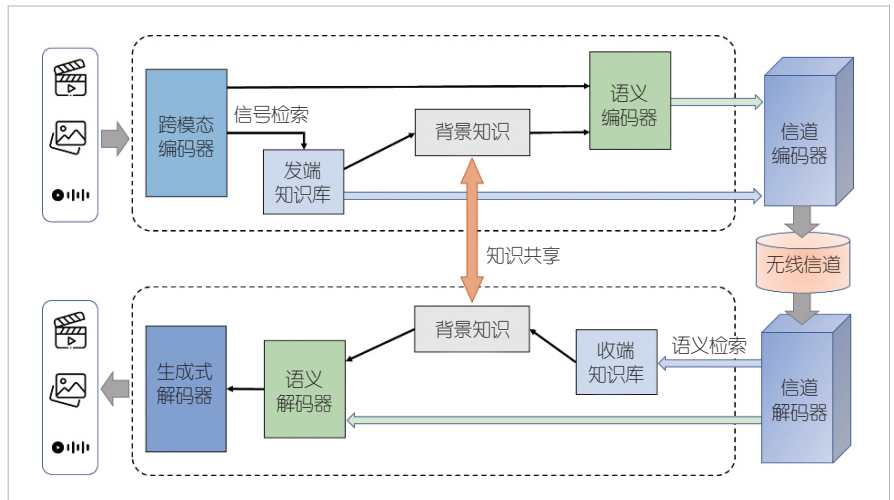
### 2) 自适应深度语义理解与语义高效传输机制

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

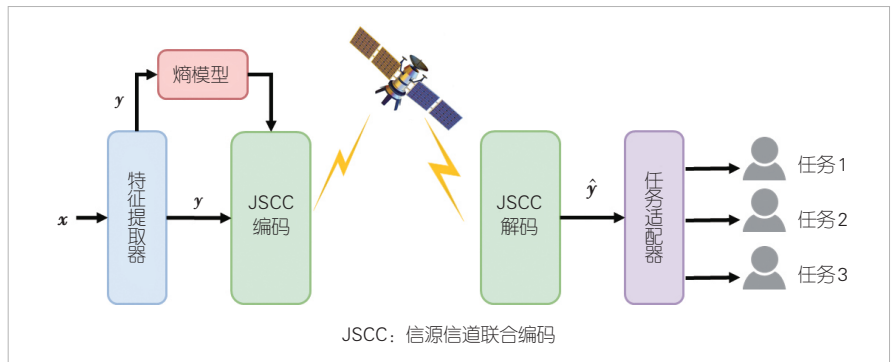
数据应该被保留。熵模型可以估计输入语义特征的概率分布。因此，该框架基于熵模型，计算特征信息的信息熵来评估其对下游任务的重要性，其辅助深度联合信源信道编解码实现可变长编解码，优化带宽资源，同时保证任务的完成准确度等性能。

### 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



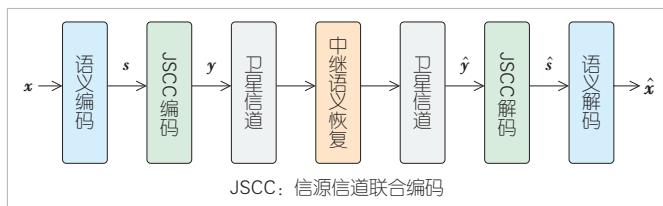
▲图5 自适应高效语义特征提取与传输框架

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。

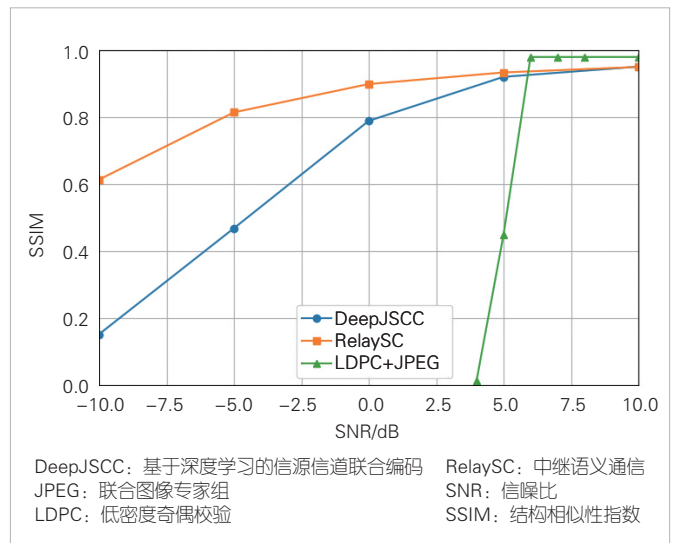
为了验证引入中继语义恢复器在卫星中继通信场景下的优势，我们构建了一个基于信源信道联合编码与中继语义恢复网络的卫星中继图像传输框架。在该框架中，地面收发端部署语义编解码器，卫星中继端部署中继语义恢复网络。传输图像经过语义编码传输到卫星中继端，并在卫星中继端进行语义转发，此处并不涉及信息的编解码过程，而视作语义信息的恢复与纠错，最后传输到地面接收端解码得到传输信息。在仿真验证中，我们采用结构相似性指数（SSIM）和峰值信噪比（PSNR）作为评价指标，对比方案包括：1）DeepJSCC传输模型，它是经典的语义通信模型，使用基于卷积神经网络的编码器-解码器；2）使用JPEG进行源编码以及使用低密度奇偶校验（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 $512 \times 512$ 像素。将图像依像素建模为 $x \in \mathbb{R}^m$ 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 $s \in \mathbb{R}^k$ 的向量，通常 $k < m$ 。 $R = k/m$ 被称为



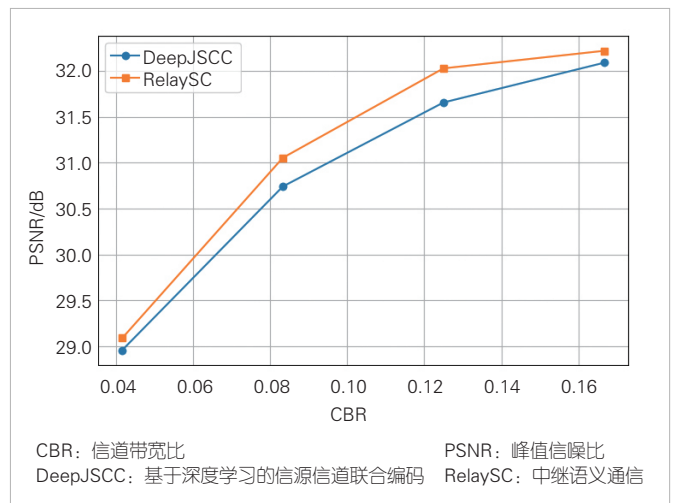
▲图6 卫星语义中继系统

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。

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] FARSAFAD 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、企业业合作项目等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。