

文章编号:1007-5321(2025)05-0001-16

DOI:10.13190/j.jbupt.2025-085

# 现代语义通信与6G智简网络理论技术体系

张平<sup>1</sup>, 许晓东<sup>1</sup>, 牛凯<sup>2</sup>, 许文俊<sup>1</sup>, 韩书君<sup>3</sup>,  
孙梦颖<sup>1</sup>, 董辰<sup>1</sup>, 马楠<sup>1</sup>, 张治<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室, 北京 100876; 2. 北京邮电大学泛在无线网络教育部重点实验室, 北京 100876;  
3. 北京邮电大学移动互联网安全技术国家工程研究中心, 北京 100876)

**摘要:** 第6代移动通信(6G)及未来通信系统面临通信智能深度融合的发展需求,本研究聚焦于解决通信智能深度融合面临的三大核心问题:1)通信带宽增加与资源消耗剧增的本质矛盾;2)信源压缩能力提升以实现信息熵减;3)信息系统适应性增强以优化通信系统增益。立足智慧内生的思想,在全球率先提出了现代语义通信与6G智简网络理论技术体系。该体系突破经典信息论局限,提出了语义信息论,拓展了经典通信理论边界;革新通信范式,提出了“先算后通”现代语义通信新路径;构建了“智慧内生、原生简约”的6G智简网络理论技术体系,为突破未来通信瓶颈提供了核心理论支撑与关键技术路径。基于此体系,团队成功搭建了国际首个面向6G智能通信融合的外场试验网,在大视频传输、无人车通信、工业互联网和星地通信等典型场景中完成了外场试验验证。在标准化领域,主导成立中国通信标准化协会技术委员会630(CCSA TC630)语义通信推进委员会和国际移动通信2030(IMT-2030)6G推进组语义通信任务组两大核心标准组织,推动具有自主知识产权的“中国方案”纳入国际标准体系。相关成果已在全球产业界与学术界开辟了“智简”演进新路径,实现了从基础理论创新、核心技术突破、试验环境验证到国际标准推动的全链条贯通,为我国掌握6G技术发展主导权、抢占未来通信技术战略制高点、构建安全可控的产业生态提供了系统性科技支撑与坚实保障。

**关键词:** 第6代移动通信;智慧内生;智能通信融合;现代语义通信;智简网络

中图分类号: TN91 文献标志码: A

## Modern Semantic Communication and 6G Intellicise Network Theory and Technology System

ZHANG Ping<sup>1</sup>, XU Xiaodong<sup>1</sup>, NIU Kai<sup>2</sup>, XU Wenjun<sup>1</sup>, HAN Shujun<sup>3</sup>,  
SUN Mengying<sup>1</sup>, DONG Chen<sup>1</sup>, MA Nan<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;  
3. National Engineering Research Center for Mobile Network Technologies, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** The deep integration of intelligence and communications has become the development trend of the sixth generation mobile communication (6G) and future communication systems. This study focuses on addressing three core issues in this deep integration: 1) The inherent contradiction between increased communication bandwidth and a sharp rise in resource consumption; 2) Improving the compression

收稿日期: 2025-08-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1806900);国家自然科学基金联合基金项目(U24B20131);北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金资助项目(L242012)

作者简介: 张平(1959—),男,教授,博士生导师。

通信作者: 许晓东(1980—),男,教授,博士生导师,邮箱: xuxiaodong@bupt.edu.cn。

capability of the source to achieve information entropy reduction; and 3) Enhancing the adaptability of information systems to optimize communication system gain. Aiming at native artificial intelligence (AI) evolution, we propose, for the first time globally, a theoretical and technological system for modern semantic communication and 6G Intellicise networks. This system breaks through the limitations of classical information theory by establishing semantic information theory and expanding the boundaries of classical communication theory. It introduces a new pathway of “computation first, communication later” through modern semantic communication, ushering in a new communication paradigm. Furthermore, it constructs a 6G Intellicise network theory and technology system characterized by “intelligent endogenous and native simplicity”, providing core theoretical support and key technological approaches for overcoming future communication bottlenecks. Moreover, we have successfully established the world’s first field trial network for 6G communication and intelligent integration, completing outfield trials in typical scenarios such as large-data-volume video transmission, unmanned vehicle communication, industrial Internet, and satellite-ground communication. In the realm of standardization, we have led the establishment of two core standards organizations—the China Communications Standards Association Technical Committee 630 (CCSA TC630) Semantic Communication Promotion Committee and the International Mobile Telecommunications 2030 (IMT-2030) 6G Promotion Group Semantic Communication Task Force—to promote the integration and leadership of the independently intellectual-property-rights-protected “Chinese solution” within the international standards system. These achievements have pioneered a new Intellicise evolution path globally in both industry and academia, achieving a full-chain progression from original theory and technological innovation to practical verification and international standards leadership. This work provides systematic technological support and a solid foundation for China to secure a leading position in 6G development, capture the strategic high ground in future communication technologies, and build a secure and controllable industrial ecosystem.

**Key words:** the sixth generation mobile communication native artificial intelligence; communication and artificial intelligence integration; modern semantic communication; Intellicise network

21 世纪的中国,正以崭新的面貌和前所未有的变革速度展现给全世界。当前,我国处于加快实现高水平科技自立自强、建设科技强国的关键时期。移动通信作为支撑网络强国、数字经济和双循环战略的关键基础设施,十四五规划明确要“前瞻布局第 6 代移动通信(6G, the sixth generation mobile communication)网络技术储备”。30 年间,我国在移动通信技术发展进程中,完成了从 2G 跟随、3G 突破、4G 并跑到 5G 领跑等角色的跨越<sup>[1]</sup>。2023 年 6 月,国际电信联盟发布了 6G 愿景和技术需求。与 5G 相比,6G 需要实现更高的传输速率、更低的空口时延、更大的连接密度、更广的覆盖面积,还要实现通信与人工智能(AI, artificial intelligence)、感知的深度融合<sup>[2]</sup>。面向新一代移动通信,我国需要继续保持领先优势,进一步增强在全球移动通信标准制定和产业发展中的主导作用。

传统通信技术主要通过增加信息传输的天线、

频谱、功率等物理维度来提升性能,逐步逼近基于香农信息论的通信容量极限。然而,这种方式已经触及多方面的技术“天花板”,包括容量提升困难、覆盖成本高昂和系统能耗过大等问题,导致其演进路径难以持续。当前,6G 的发展已从最初 50 多个潜在关键技术方向逐步收敛,聚焦于通感一体、智慧内生、空天地一体、AI 空口、数字孪生等国内外形成共识的重点方向。其中,通信与智能的深度融合正推动着一场具有颠覆性和革命性的新通信体系变革。尽管如此,移动通信领域仍面临理论局限、智能化程度不足和系统灵活性不够三大瓶颈,难以满足未来智能泛在化和可持续发展的需求。目前简单的 AI 外挂或叠加模式,在显著增加系统成本与复杂度的同时,所带来的性能增益却相当有限<sup>[3]</sup>,无法从根本上破解移动通信网络发展的困局。因此,笔者提出新一代通信技术必须探索新的发展路径,实现从“堆叠式创新”向“颠覆性创新”的跨越<sup>[4]</sup>。

聚焦于解决智能通信深度融合面临的“通信带宽增加与资源消耗剧增的本质矛盾、信源压缩能力提升以实现信息熵减、信息系统适应性增强以优化通信系统增益”三大核心问题,笔者在全球率先提出了智慧内生的现代语义通信与6G智简网络理论技术体系。该体系以本原信息论和智慧内生为基础,以系统论为指导,以整体熵减为优化目标,通过重塑传统通信网络框架,建立基于语义基和同义映射的语义信息论,提出“先算后通”的现代语义通信新路径,构建“智慧内生、原生简约”的6G智简网络理论技术体系,形成信道环境感知-信源结构表征-信息智能处理-网络自适应化的贯通式联合设计,充分利用通信系统各层关键信息,扩展通信系统能力上限,推动通信与智能深度融合,赋能通信领域的长期可持续发展。

现代语义通信与6G智简网络理论技术体系为通信与AI的深度融合开辟了新的技术路径,赋予6G真正的“泛在智能”。通过智慧内生、认知重塑等特性,围绕不同通信对象构建有针对性的智能服务生态,网络中的节点将成为具备智能的新型节点,基于AI的通信链路整体优化手段,网络本身的协议结构将趋向于极简,最终形成“节点极智、链路极柔、网络极简”,驱动网络“由智生简、以简促智”的自演进、自优化、自平衡的状态<sup>[5]</sup>。相关成果在基础理论研究、核心技术攻关、工程试验验证、标准化推进等方面均实现了突破性进展,为未来通信发展奠定了重要基础,引领了通信领域范式变革方向。

全文的章节安排如下:第1节首先阐述语义通信的基础理论,为后续研究奠定理论根基;第2节在此基础上系统介绍6G智简网络的技术体系,构建整体框架;第3节进一步结合典型应用场景,提出语义通信的指标体系,明确评估维度;第4节则面向6G智能通信融合,给出外场试验网的搭建与验证方法,实现理论到实践的过渡;第5节总结标准化进展,探讨语义通信在产业化和国际标准中的推进路径;最后,第6节对全文进行总结与展望。

## 1 基础理论

未来无线通信系统不仅需要满足人与人之间的通信需求,并将支持海量智能机器之间的智能交互。通过引入语义通信,使得通信系统从关注符号传输到关注网络“达意”,将有助于提升通信效率,是未来通信系统的重要演进方向。

语义通信起源于1953年Weaver提出的通信3层模型,即语法层、语义层和语用层,如图1所示。基于香农信息论的传统通信属于语法通信范畴,主要解决技术问题,即通信符号如何保证正确传输。语义通信,从语义层面关注符号如何准确传达含义。近年来,钟义信团队构建了基于语法信息和语用信息的语义信息映射模型,但未与AI技术结合。随着AI技术的发展,语义通信取得了重要进展,在国内外呈现出多方向、多模式的发展趋势,涵盖从单模态到多模态、从信息重建到生成、从传输效率提升到沉浸式体验增强等方面。

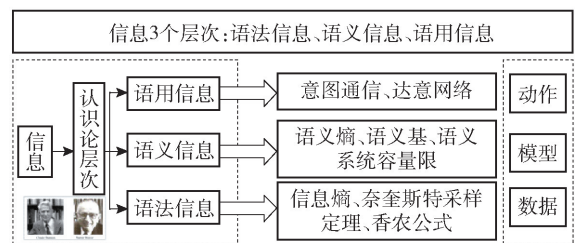


图1 信息3个层次

与传统语法通信不同,语义通信并不要求信息的大量符号级准确传递,而是关注发送端输入的语义信息与接收端恢复出的语义信息之间的匹配,通过减少信息交流和理解的时间,提升通信节点协作的效能<sup>[1,6]</sup>。笔者对信息的不同层次进行重新认知,从语义通信基础理论层面,思考“语义信息度量”和“语义传输容量”2个通信基本问题<sup>[1]</sup>,首次定义了语义基概念度量语义信息,提出了语义信息论衡量语义传输容量。两者共同赋能通信系统从“传输比特”迈向“传递语义承载模型”,为6G典型场景应用奠定了理论基础。

### 1.1 语义基

语义通信是在传统通信的基础上建立起来的,在传统信源编码的基础上创新性地增加了1个新的特征维度——语义信息。类比于香农经典信息论中“比特”对信息熵的表征和度量框架,笔者首次提出了“语义基”<sup>[7]</sup>的概念,用“语义基”作为语义通信的表征框架,基于智慧内生打造语义通信新范式,成为现代语义通信与6G智简网络理论技术体系的核心支撑理论。

作为语义信息的基本组成单元,语义基是所提出的一种完备的、高度抽象的语义信息的分解表示。语义基具有层级结构,能够提取多模态信息的语义特征,经多层次变换映射到语义元素。层级越低的

语义基表征语义越具体,层级越高的语义基表征语义越抽象,低层级语义基可以根据任务需求,经由同义映射生成高层级语义基。层级结构的语义基是信息高效表征的基础,可以用偏序集表示,系统语义基粒度选取可随通信意图、背景知识等弹性可变。

语义通信基于语义基构建语义空间,将信源数据映射到语义空间得到语义信息表征向量,并可进一步通过将语义信息表征向量映射到比特流的方式,使其经由物理信道进行传输。接收节点可以根据接收到的语义基和编码序列重新构造原始信号。其中,基于 AI 构建的语义特征是一种典型的隐式语义基表征方式,以高维空间特征参数的形式实现语义信息的表征。

## 1.2 现代语义信息论

Bao 在 2011 年提出了基于逻辑概率框架下的信源信道编码的理论基础<sup>[8]</sup>,然而仅仅是面向文字和语音等简单信息的语义通信框架。清华大学樊平毅教授团队将语义信息论分为语义熵、语义率失真和语义信道容量 3 个部分,分别回应语义信息的度量问题、语义编码与失真问题、最大语义通信量问题<sup>[9]</sup>。张平教授团队对语义通信的理论与方法进行了系统探讨与总结<sup>[10]</sup>,类比经典信息论,归纳了语义信息的度量体系。进一步,他们在 2024 年提出了语义通信的数学理论<sup>[11]</sup>,继承并扩展了经典香农信息论的数学模型,通过数学分析确定了语义信道的容量公式,构建了完整的语义信息论的度量体系。

语义信息论是现代语义通信与 6G 智简网络理论技术体系的理论基础,提出了语义通信系统设计的 2 个准则,即语义信息的可感知但不可见特征和语义信息的同义性特征。如图 2 所示,1 个语义信息的表现形式可能是多样的,即语义与语法信息间的映射关系是一对多的,通常这些映射是受到收发信机的背景知识和系统要求影响。由于语义通信的目的在于接收端能否正确理解发送端的意图,而非准确接收发送的每个比特,因此语义信息论研究的是语义信息表征与传输的度量体系及优化准则。

类比于经典信息论的信息熵,语义熵的定义为语义随机变量  $\tilde{U}$  的不确定性,即

$$H(\tilde{U}) = - \sum_{i_s=1}^{\tilde{N}} p(U_{i_s}) \text{lb}(p(U_{i_s})) = - \sum_{i_s=1}^{\tilde{N}} \sum_{i \in N_{i_s}} p(u_i) \text{lb} \left( \sum_{i \in N_{i_s}} p(u_i) \right) \quad (1)$$

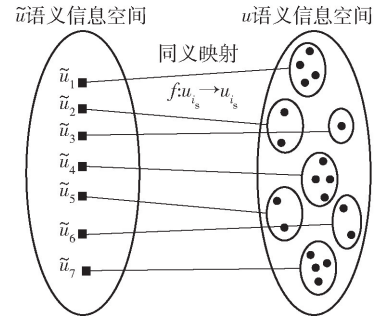


图 2 语义信息的同义映射<sup>[11]</sup>

其中  $U_{i_s}$  表示语义信息  $\tilde{u}_{i_s}$  的语用同义映射集合,并且将语义信道容量定义为上语义互信息的最大值,即

$$C_s = \max_{\{f_{xy}, p(x)\}} \{I^*(\tilde{X}; \tilde{Y})\} \quad (2)$$

其中  $I^*(\tilde{X}; \tilde{Y})$  为上语义互信息,可表示为

$$I^*(\tilde{X}; \tilde{Y}) = H(X) + H(Y) - H_s(\tilde{X}, \tilde{Y}) \quad (3)$$

语义信息论指出了通信与 AI 融合的性能极限,为语义通信系统的优化设计奠定了理论基础,具有重要的科学意义。

限带高斯信道下的语义信道容量公式为

$$C_s = B \text{lb} \left[ S^4 \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) \right] = B \text{lb} \left( 1 + \frac{P}{N_0 B} \right) + 4B \text{lb}(S) \quad (4)$$

其中  $S$  表示同义区间长度。当  $S=1$  时,语义信道容量公式退化为香农信道容量公式;当  $S>1$  时,则突破香农信道容量瓶颈。如图 3 所示,引入同义区间后,语义通信在相同信噪比下的信道容量相对于传统通信系统有明显提升,从而突破经典信道容量的限制,为 6G 演进提供强力支撑。特别是,同义区间长度  $S=2$  条件下,语义调制容量限相较于传统调制容量限有明显提升,能够突破语法调制容量的

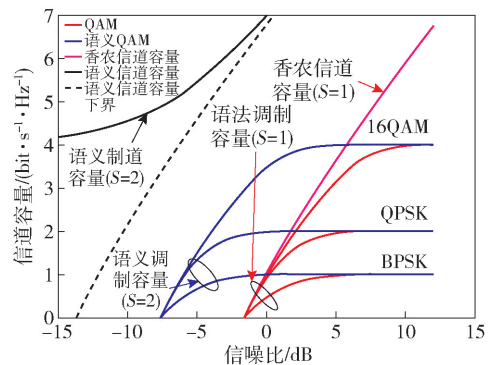


图 3 限带高斯信道下语义容量与语法容量对比

限制,有望成为未来无线通信系统设计与优化的理论指导。

## 2 6G 智简网络理论技术体系

基于语义基与语义信息论,笔者聚焦通信系统中语义信息的深层处理问题。提出基于语义模型传输的智简网络,支持智能模型在网络端到端的高效传输与动态更新,推动通信智能的深度融合。以语义信息为传输对象,通过信源-信道-信宿的联合设计,实现面向语义任务、信道能力的弹性信息压缩。以语义知识库为关键支撑,重塑通信系统的信息提

取、表征、编译码、综合和重建等核心环节<sup>[1]</sup>。突破传统多址接入限制,提出模分多址接入技术 (MDMA, model/mixed/meaning division multiple access)<sup>[12]</sup>,实现多用户高效接入。

### 2.1 智简网络

基于语义模型体系的智简网络,在网络内可实现语义承载模型的分发、更新与演化,可以提高通信效率和准确性,使得网络通信更加简单、快速和准确。智简网络系统架构由 3 个部分组成,如图 4 所示,分别为通信层面的语义通信、网络层面的网络智协和应用层面的领域知识库。

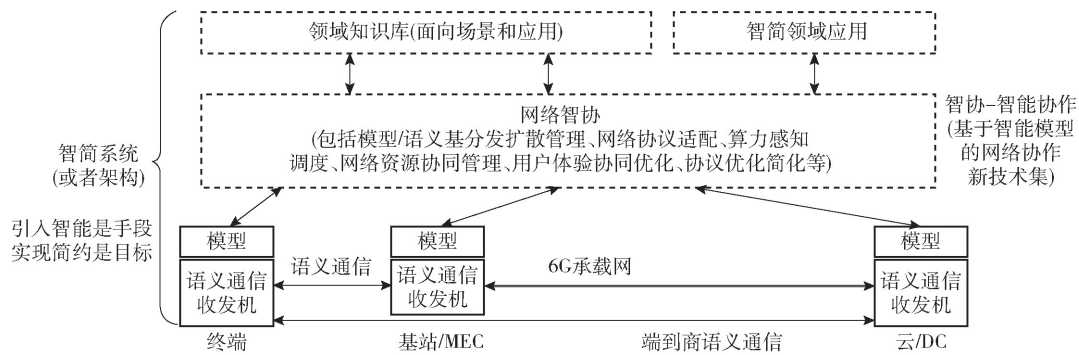


图 4 智简网络系统架构

在语义通信中,发起端使用已知的智简模型和通信环境的语义参数,对发端的应用数据进行联合编码,生成语义通信发送数据,并通过网络和通信传输信道发送到语义通信对端。收端通过选取相同或近似的智简模型对接收到的语义数据进行解码,恢复并得到语义通信所传输的信息<sup>[13]</sup>。

网络智协是网络对语义通信的协作支持和网络自身的智能化管理和简化优化,是基于智能模型的网络协作新技术的集合,旨在支持语义通信并简化优化网络管理<sup>[14]</sup>。首先,在网络层面,通过对传输的数据依据其应用模态或网络目标进行分类,再使用神经网络和深度学习等算法,提取归类后应用数据的语义特征,生成多个系列的智简模型,并持续迭代优化<sup>[15]</sup>。接着,再对智简模型和语义基进行分发管理,以保障语义通信的发送端有适合的智简模型对发送信息进行语义编码,在语义通信的接收端有匹配的智简模型进行解码和恢复<sup>[16]</sup>。网络智协还包括对语义通信中用到的网络协议的适配、算力的感知和调度、网络资源的协同管理<sup>[17]</sup>、用户体验的协同优化<sup>[18]</sup>、网络自身协议的优化简化等功能。

智简模型也需要根据不同的行业应用场景进行

定制和优化,例如金融、医疗、交通等行业领域的知识和规则,需要通过语义通信模型进行理解 and 处理,以提高其准确性或在传输时给予高优先级保障。因此,行业知识库和语义通信模型之间是相互依存和协同工作的关系。行业知识库可以提供领域知识和规则,辅助语义通信模型进行优化和定制;同时,智简模型也可以利用行业知识库中的信息进行数据理解 and 处理,提高通信效率和准确性。

智简网络功能架构示意图如图 5 所示,智简网络通过新定义的应用模态向网络映射应用程序编程接口 (API, application programming interface),采用应用告知或网络智能识别感知的方式,获取不同应用的模态特征,并映射到相应的网络技术指标,包括但不限于运算优先、通量优先、语义优先、指令优先、效果优先、时延优先、抖动优先等。之后语义通信发送端才可以适配相应的语义通信模型,再通过不同的物理实体网络和运营商综合承载网传递相关的语义通信数据,达成语义通信传递有效信息的目的。此时,网络也已经成为相关的信息传达匹配和保障了相应的网络资源。

模型管理模块中又分为知识库、模型和底层语

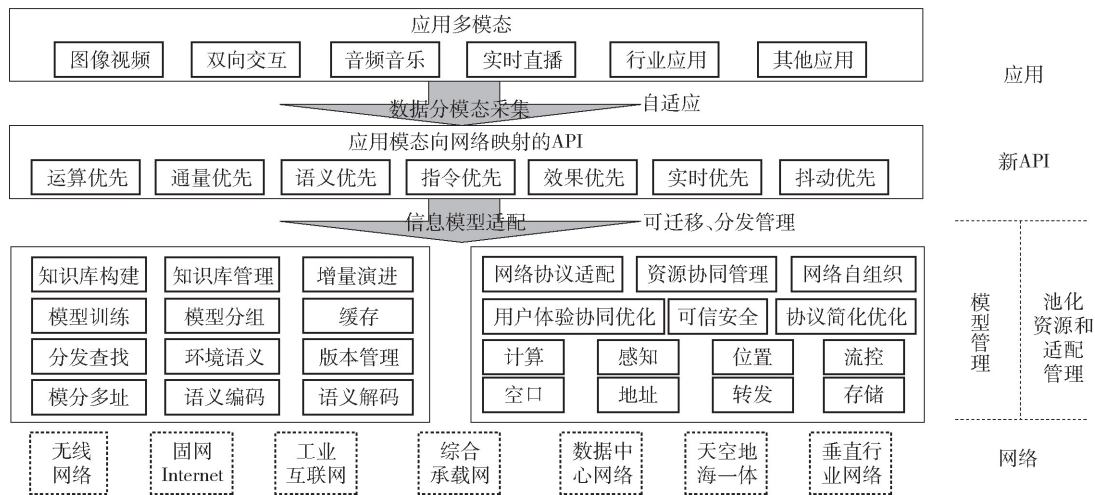


图 5 智简网络功能架构示意图

义通信部分。知识库包括知识库构建和知识库管理相关的功能模块。模型则包括训练、分发、分组、缓存、查找、增量演进、版本管理等。底层语义通信包括环境语义、语义编解码、新型模分多址功能等。

网络除了常规的池化资源管理功能以外,更重要的是为语义通信适配相应的网络传输协议,包括网络资源的智能协同管理、网络智能自组织、基于用户体验的智能协同优化、智能安全可信方案、协议简化优化等功能。将智能融入到网络设备和网络管理中,达到网络智能简约,更服务于新的语义通信范式。

智简网络模型部署管理架构示意图如图 6 所示,语义信息自下而上汇聚于大模型层,可逐层按需求更新模型。云侧由超大规模网元组成,包括集中

式云服务器、AI 管理中心、数据中心等,支持广泛的智简模型训练。边侧主要由边缘服务器、智简模型存储单元等节点组成,可实现细粒度的智简模型部署和资源管理。端侧由移动终端、智能汽车等终端设备组成,根据需求请求智简模型,完成数据采集、语义通信等功能。

## 2.2 信源信道联合编码技术

信源编码的目的是去除信源中的冗余信息以提升通信的效率,而信道编码的目的是通过编码增加冗余信息以抵抗信道的衰落与干扰。在经典信息理论中,当信源与信道均达到渐进均分特性时,最优设计的信源编码和最优设计的信道编码组合等价于最优设计的信源信道联合编码<sup>[19]</sup>。因此,根据实现方式的不同,面向语义通信的信源信道联合编码技术

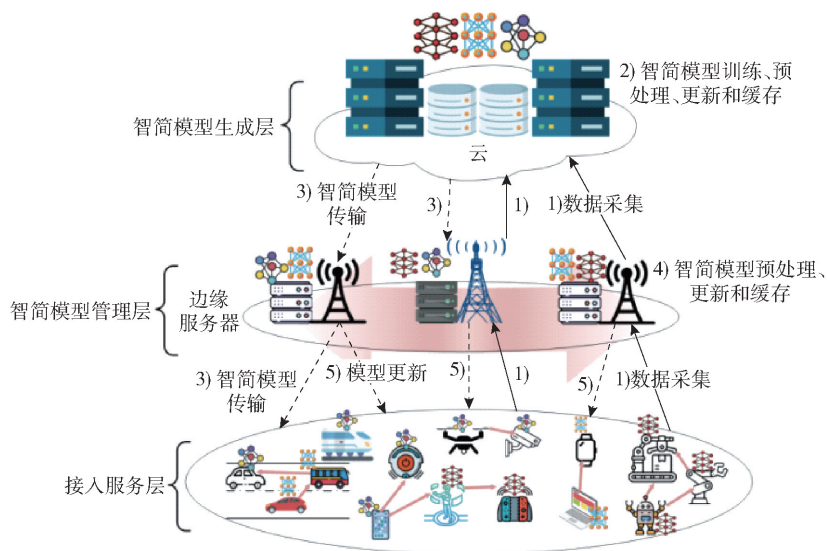


图 6 智简网络模型部署管理架构示意图

主要分为模块化设计的方法与一体化设计的方法<sup>[7]</sup>。在模块化设计的方法中,将语义提取即语义编码和语义译码模块加入现有的通信系统中,针对提取的语义信息进行信源信道联合编码,比如基于上下文的语义编码器<sup>[20]</sup>和长短时记忆(LSTM, long short term memory)的语义译码方法<sup>[21]</sup>。在一体化设计的信源信道联合编码技术中,将语义提取、信源编码和信道编码融合为 1 个编码模块进行统一设计<sup>[22]</sup>。

英国帝国理工学院利用深度卷积神经网络开发了深度联合源信道编码<sup>[23]</sup>,直接将图像像素映射到复值信道输入,奠定了基于模型的语义通信基础。英国伦敦玛丽女王大学基于 Transformer 提出深度语义通信系统,能够适应不同传输环境,扩展到文本、语音等多种应用<sup>[24]</sup>。新加坡南洋理工大学提出的语义通信框架融合大语言模型与生成式 AI,拓展了多模态处理能力<sup>[25]</sup>。中国学者在语义通信研究

中也取得了显著成果,如浙江大学的知识图谱辅助语义通信网络<sup>[26]</sup>、上海交通大学的信道去噪扩散模型系统<sup>[27]</sup>和北京邮电大学的高效率联合编解码方案<sup>[28]</sup>,分别在语义压缩、图像和视频传输方面取得突破。

为真正实现“节点极智、链路极柔、网络极简”的智简通信目标,面向 6G 业务多模态信息的语义编解码的性能与效率至关重要。笔者在此基础上,进一步研究面向差异化服务质量需求的多媒体业务语义通信模型,结合时变信道特性,开发低复杂度、易实现的信源信道联合编码技术。如图 7 所示,智简通信系统设计信源信道联合编码模块,利用 AI 技术对传输环境进行感知建模,对调制编码信道进行信道估计,基于智简模型,根据当前信道传输信息,对传输数据进行信源信道编码,对抗信道状态的时变特性所产生的差错传输,以改善信源信道联合编码效率并提升语义恢复准确度。

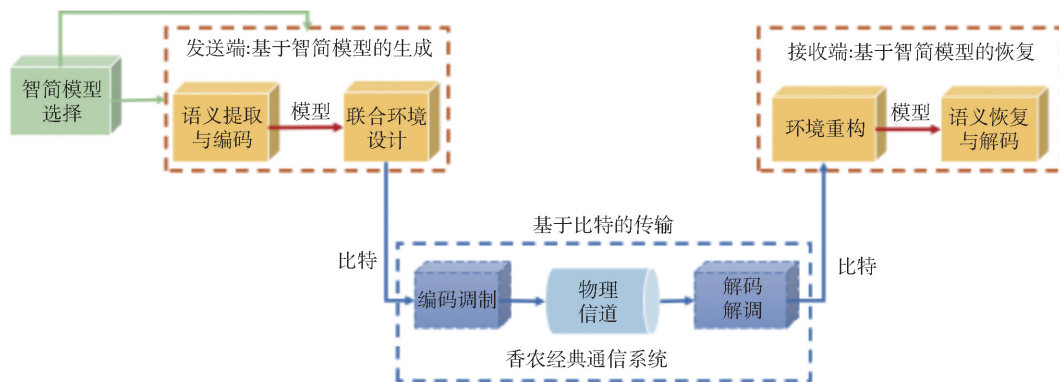


图 7 信源语义编码传输与接收恢复流程<sup>[13]</sup>

### 2.3 语义知识库技术

语义知识库是一种可为数据信息提供相关语义知识描述的结构化、具备记忆能力的知识网络模型。面向智简通信的语义知识库可分为信源、信道、任务知识库,分别为信源数据、信道传输环境、任务需求提供多层次语义知识表征,从而支撑端到端智简通信的高效实现<sup>[29]</sup>。多样化的信源数据,如文本、图像和视频等多媒体信息;复杂的信道传输特性,涉及传播路径中的障碍物分布、散射体几何特征和智能反射面的空间位置和相位配置参数;差异化的任务需求,包括图像分类、三维场景重构和语义分割等具体任务目标。

发送端通过整合信源特征、信道状态和任务需求等多维知识库,提取语义特征描述、构建概率推理模型和解析语义意图,实现多模态联合编码。相应

地,接收端依托其本地知识库进行语义检索与情境推理,完成自适应联合解码,最终达成面向特定应用场景的智能语义通信。如图 8 所示,Xu 等<sup>[30]</sup>提出一种基于正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)传输的知识增强语义通信方案,其主要过程包括语义编码、语义导频生成、时域符号生成、无线信道传输和语义解码模块。该方案基于部署在设备、边缘服务器和云端的知识库,实现智简通信性能的增强。Zheng 等<sup>[31]</sup>提出一种基于显式语义构建语义知识库的语义检错重传方法,通过在显示语义表征粒度上进行检错与重传,可在保证低传输开销的同时,有效提升智简通信系统的鲁棒性。

### 2.4 模分多址技术

区别于传统多址考虑时、频、功、空等物理资源

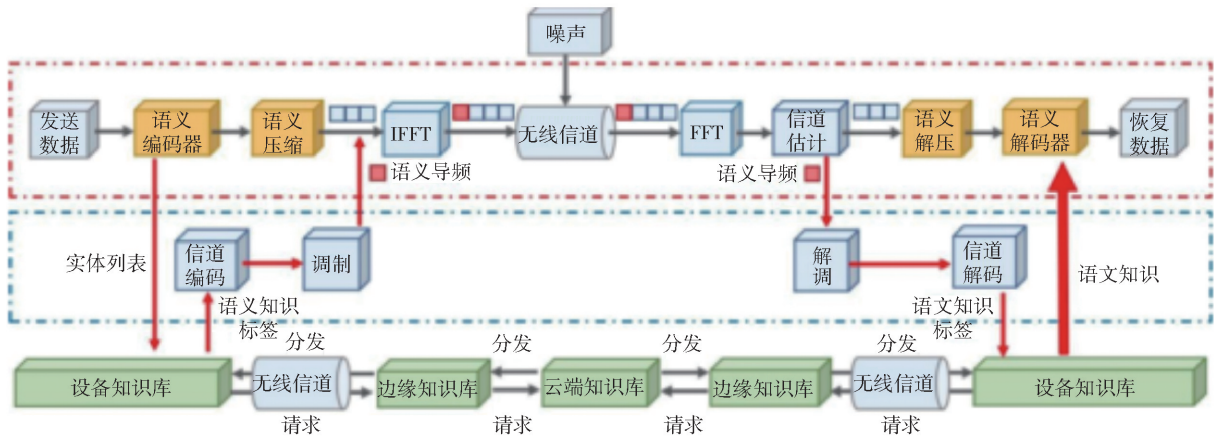


图 8 基于 OFDM 的知识增强智简通信系统<sup>[30]</sup>

实现多用户区分,MDMA 是从更高信息维度上利用信源语义域特征的新型多址方式<sup>[12]</sup>。MDMA 利用 AI 模型从信息源中提取语义特征,为多用户语义信息的区分提供了知识基础。在提取信源的语义信息时,将获得高位语义信息空间成为语义模型空间,在语义模型空间中不同用户的语义信息可以由共性信息和特性信息 2 部分构成,对于不同用户的信息来说,在映射到语义模型空间后区分不同信息的关键在于特性信息的部分。

如图 9 所示,在基于 MDMA 的语义通信上行链路中,首先,基站匹配要传输相同模态信源的 2 个发起上行传输指令的用户。用户 1 和用户 2 分别使用相同的智简模型提取其信源语义信息  $S_x$  和  $S_y$ ,通过计算用户 1 和用户 2 语义信息之间的互信息,判断互信息的信息熵是否低于设定阈值;若互信息的信

息熵低于设定阈值,即可认为该组数据表达相同语义,则认定该组数据为共性信息;否则,即为个性信息。其次,用户 1 和用户 2 在时间 1(频率 1)向基站发送共性语义信息  $S_x + S_y$ 。然后,用户 1 和用户 2 在时间 2(频率 2)向基站发送个性语义信息  $S_{x_p}$  和  $S_{y_p}$ 。基站接收到用户 1 和用户 2 的共性和个性信息后,可以恢复每个用户的原始语义信号,并通过语义解码器恢复信源。

在下行智简通信链路中,基站同时将来自多个信源数据的语义信号分发给多个用户。首先,基站根据用户的需求,匹配相应的用户并提取语义信息。通过比较 2 个语义信号之间的相似度,可以提取共性语义信息  $S_{x_s}$  和  $S_{y_s}$  以及个性信息  $S_{x_p}$  和  $S_{y_p}$ 。携带共性信息的信号被组合在一起发送,而携带个性信息的信号被单独发送给用户。用户 1 和用户 2 接收

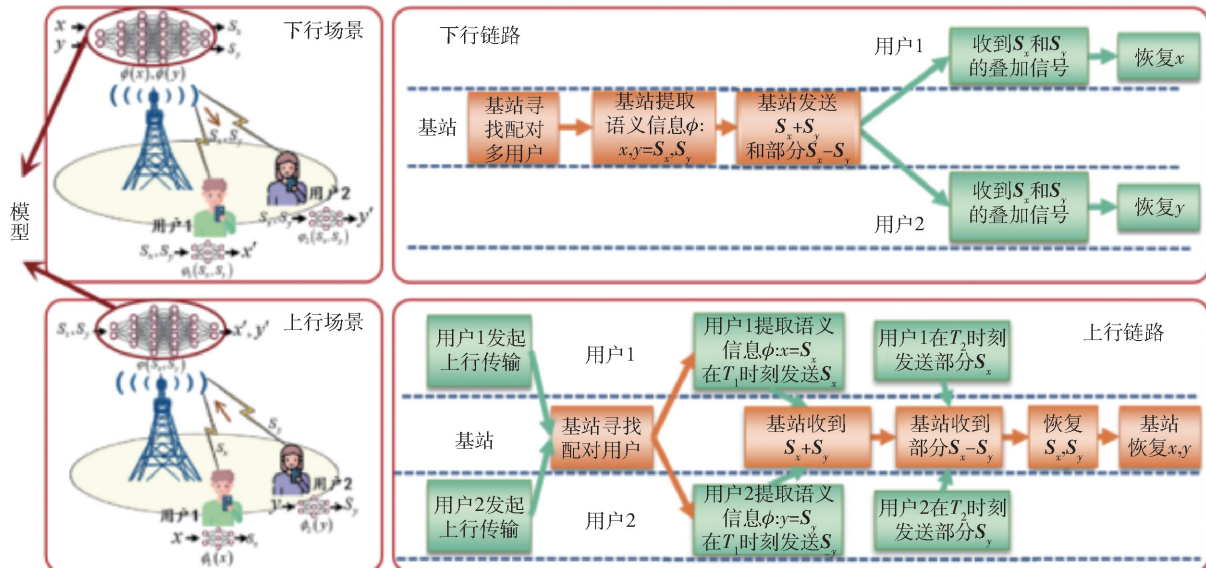


图 9 基于 MDMA 的语义通信示意图<sup>[12]</sup>

共性信息和各自的个性信息,并使用语义解码器恢复原始数据。

### 3 典型场景与指标体系

#### 3.1 典型场景

##### 3.1.1 智能电网场景

智能电网是现代化电力系统的一次重大变革,它利用前沿技术应对全球气候变化、不断增长的工业化需求和对能源系统可靠性的挑战。通过整合可再生能源资源,如风能、太阳能和先进储能单元,智能电网不仅在能源生产上更为环保,而且在结构上变得更加小型化和分散化,有效提高了能源利用的灵活性和效率。智能电网的核心是其庞大的传感器网络和双向通信系统,这一系统确保了对整个电网状态的实时监控,从而大幅度提升了电力调度和分配的智能水平。这种全面的监控能力使得电网可以快速响应各种情况,包括需求波动、供应中断或其他紧急状况。

在智能电网中,变电站巡检对于确保电力网络的安全和可靠运行至关重要。然而,变电站内部由于金属设备的信号阻塞、信道衰落导致的信号衰减、天气条件和设备老化等各种因素可能导致通信条件恶劣,进而严重影响回传的检查图像质量,对巡检造成了重大挑战,这也是大多数变电站巡检任务面临的常见问题。许多研究已经尝试解决相关问题,但先前的研究都是基于传统通信方法进行的。传统通信系统依赖的信道编码方法在低信噪比条件下表现不佳,导致传输性能不理想,特别是在弱信号区域。在智能电网的巡检任务中只需聚焦于巡检图像中的部分重要语义信息(如仪表数据、关键元器件状态等)完成智能电网的变电站检查任务即可,而传统通信对信息的传输往往是无差别的,没有对信息的内容进行深度分析和处理。

基于语义通信技术,定位巡检图像的具体语义内容,并将其嵌入到语义增强模型中,可以提高图像中重要语义内容的传输质量,确保对传输图像进行安全检查时不出现错误或遗漏<sup>[32]</sup>。与传统通信系统相比,语义通信在低比特率或低信噪比的信道条件下具有更好的传输质量,有效信号覆盖的区域显著扩大,保证了智能机器人在信号微弱的变电站边缘区域巡逻时能够正常工作。智简通信在提升通信效率、优化资源分配和管理、提高系统的适应性和弹性、促进综合能源系统集成和提升故障检测能力方

面有巨大提升。

##### 3.1.2 虚拟现实场景

虚拟现实(VR, virtual reality)场景通过创造一个全面的虚拟环境,从视觉、听觉、触觉等不同方面提供沉浸式体验。不同于传统的观看或视听体验,VR允许用户以自然的方式和虚拟环境互动。然而,VR具有多种模态信源信息共存、海量数据传输、较低延迟需求等特征,需要未来6G提供高速且稳定的网络连接、高分辨率和高帧率的传输<sup>[33]</sup>、强大的多模态信息处理能力、较高的数据安全和隐私保护水平。

然而,当前的图像和视频编解码器基于底层像素信息,将丰富的语义内容翻译成许多小块的像素,这些片段不包含任何高级语义内容。然而,在接收图片信息时,人们更关注内容的含义,而不是每一个微小的像素。语义通信放宽了信息传输中的错误要求,提高了接收端恢复的语义信息与发送端发送的语义信息的匹配度,有望实现低比特率的高质量通信<sup>[34]</sup>。同时,以人的体验质量为目标,实现智能化和人性化的人-机-物交互方式。

随着科技的进步,VR正在变得日益丰富和真实,为用户提供前所未有的沉浸式体验。语义通信的引入,特别是在即将到来的6G网络环境下,预示着VR体验将变得更加流畅、互动性更强和个性化。通过智能地传输最关键的信息,减少带宽需求,并优化网络资源使用<sup>[35]</sup>,语义通信为VR带来的革命性改进将推动其在教育、娱乐、医疗等多个领域的广泛应用。未来的VR体验,将不仅仅是视觉和听觉的盛宴,而是一个全方位、多感官、高度互动的数字世界,为用户开启全新的探索之旅。

##### 3.1.3 卫星通信场景

6G卫星通信具有覆盖地域广、建设速度快、抗毁能力强等优势,可弥补全球地面通信网络的覆盖死角。对于中高轨卫星而言,技术相对成熟,但由于距离地球距离较远,存在较高的传输时延和链路损耗,并且受数量等原因限制,可用带宽较小,传输速率较低。此外,低轨卫星相对地面高速移动,导致海量设备连接频繁切换、网络连接关系动态变化、通信时延相对地面网络较长、覆盖持续时间较短等问题<sup>[36]</sup>。

通过在卫星搭载轻量化AI芯片,语义通信通过传输信息的“含义”而非原始数据,有望成为卫星通信的变革性技术。例如,针对遥感图像传输,实时识

别图像中的语义信息,仅传输关键特征(如灾害区域变化)而非整张图像,可以达到节省带宽的目的<sup>[37]</sup>。在动态卫星网络中,基于语义通信技术,通过上下文感知,动态调整传输策略,可以实现自适应语义传输。另外,通过传输加密或抽象的语义信息,可以增强卫星数据传输的安全性和隐私保护。

### 3.1.4 车联网与自动驾驶场景

车联网通信技术和车联网技术将成为 6G 的典型应用场景和关键技术之一。随着 AI 技术的进一步发展,6G 车联网将融合深度学习、强化学习、通感一体化等关键技术,形成车辆、路、云的全场景一体化感知决策架构。在该架构体系下,人、车、路和云需要海量信息交互,且这些信息将涵盖人的语言指令、传感信息、雷达信息、摄像头拍摄的图像信息和来自云端的控制指令等。基于语义通信,通过对车联网环境信息进行语义提取,实现车辆、人和智能交通系统设备的交互信息的一致性表征,提高汽车和智能交通系统的智能化、互操作性和用户体验。

通过高效的信息理解和传输,语义通信技术不仅提升了车辆间通信的精准度,还增强了车辆对周围环境的感知能力<sup>[38]</sup>。在车联网环境中,车辆可以更准确地交换关于道路状况、交通流量和潜在障碍物的信息,从而大大提高道路安全性和交通效率。对于自动驾驶而言,智简通信的引入使得无人驾驶系统能够更加准确地解释和响应复杂的道路情况和行车规则,确保行车的安全性和流畅性<sup>[39]</sup>。此外,还可促进车辆与城市基础设施之间的互操作性,支持更智能的城市交通管理系统。语义通信是推动车联网和自动驾驶发展的关键技术,它为实现更加安全、高效和智能的交通体系提供了强有力的支持。

## 3.2 指标体系

传统通信系统的主要性能指标,比如比特误码率和符号误码率,难以衡量语义通信系统的性能。现代语义通信从语义的实际意义出发,提出全新的语义度量指标,用于评估语义信息恢复的准确度,用于评估现代语义通信的新指标包括多模态任务评估指标、传输效率评估指标和一致性评估指标 3 个部分。

### 3.2.1 多模态任务评估指标

现代语义通信系统的传输对象主要有文本、语音、图像和视频,不同的信息模态所需的评价指标有所不同。因此,针对多模态信息的任务评估指标主要包括:双语评估代理(BLEU, bilingual evaluation

understudy)<sup>[40]</sup>、峰值信噪比(PSNR, peak-signal-to-noise-ratio)<sup>[41]</sup>、结构相似度指数测量(SSIM, structural similarity index measure)<sup>[42]</sup>、信号失真比(SDR, signal-to-distortion ratio)<sup>[43]</sup>等。

针对文本,可以通过自然语言处理中的文本生成度量进行评估, BLEU 是一种用于评估机器翻译质量的算法,其采用一种改进的精度形式,将输出文本与语言专家翻译的多个参考句子进行比较。BLEU 的计算式为

$$V_{\text{BLEU}} = V_{\text{BP}} \exp \left( \sum_{n=1}^N w_n p_n \right) \quad (5)$$

其中  $V_{\text{BP}}$  代表惩罚因子。在式(5)中,通过采用最大长度为  $N$  的第  $n$  个元素,来计算第  $n$  个元素的精确度,具体表示为

$$p_n = \frac{\sum_i \sum_k \min(h_k(c_i), \max_{j \in m} h_k(s_{ij}))}{\sum_i \sum_k \min(h_k(c_i))} \quad (6)$$

针对语音,用 SDR 来衡量其性能,计算发送语音和接收语音信号之间的误差为

$$V_{\text{SDR}} = 10 \lg \left( \frac{\|\mathbf{x}\|_2^2}{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|_2^2} \right) \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{x}$  代表原始的信号,  $\hat{\mathbf{x}}$  代表恢复的信号,  $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$  代表恢复信号中加入的失真和噪声等,  $\|\cdot\|_2$  表示向量的  $L_2$  范数, SDR 的单位是 dB, 较高的 SDR 值通常表示更好的恢复质量。

针对图像和视频,可以通过 PSNR 和 SSIM 来表示,分别为

$$V_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left( \frac{255^2}{V_{\text{MSE}}(f, g)} \right) \quad (8)$$

$$V_{\text{SSIM}}(f, g) = l(f, g) * c(f, g) * s(f, g) \quad (9)$$

SSIM 度量通过引入人类视觉系统(HVS, human visual system)的质量感知概念来评估 2 幅图像之间的相似度。SSIM 将图像失真建模为相关损失、亮度失真和对比度失真的组合。其中,  $l(f, g) = (2\mu_f \mu_g + C_1) / (\mu_f^2 + \mu_g^2 + C_1)$ , 表示 2 个图像亮度  $\mu_f$  和  $\mu_g$  的接近度。  $c(f, g) = (2\sigma_f \sigma_g + C_2) / (\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + C_2)$  表示 2 个图像明暗对比度的接近度。  $s(f, g) = (\sigma_{fg} + C_3) / (\sigma_f \sigma_g + C_3)$  通过 2 幅图像之间的相关系数来衡量表示 2 幅图像之间的结构比较,  $\sigma_{fg}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  是用于避免零分母的正常数。

### 3.2.2 传输效率评估指标

在现代语义通信系统中,将源信息映射到语义空间中的语义信息存在语义重叠的问题,影响之间

通信系统的传输效率,因此用语义重叠率(SOR, semantic overlap rate)来衡量语义通信系统的传输效率<sup>[31]</sup>。用频域或时域的资源重用率来表示,具体为

$$V_{SOR} = \frac{|F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_k|}{|F_1| + |F_2| + \dots + |F_k|} \quad (10)$$

或

$$V_{SOR} = \frac{|T_1 \cap T_2 \cap \dots \cap T_k|}{|T_1| + |T_2| + \dots + |T_k|} \quad (11)$$

### 3.2.3 一致性评估指标

由于模型传播的存在,现代语义通信系统可以根据服务需求和质量等不同条件接收和集成来自其他网络节点的深度学习模型。因此,在性能评估方面,语义信息的传输要注意语义恢复的信息是否能够满足预期。语义服务质量指标为

$$V_{SS} = \frac{V_{ST}(\hat{S})}{V_{ST}(S)} \quad (12)$$

其中: $S$ 表示发送端未处理的信息, $\hat{S}$ 表示在接收端通过语义信息恢复所得到的信息, $V_{ST}(\cdot)$ 表示信息在执行后续任务中的性能。使用 Sigmoid 等函数将  $V_{ST}(\cdot)$ 的结果映射到 $[0,1]$ 。选择后续任务的指标应该是性能越好,指标越高。 $V_{SS} = 1$ ,则语义信息完全恢复; $V_{SS} = 0$ ,则语义信息无法恢复。

## 4 面向 6G 智能通信融合的外场试验网搭建与验证

团队建成国际首个面向 6G 智能与通信融合的外场试验网,如图 10 所示,打造了开放的联合研发、测试验证环境,外场验证了语义通信可以在 5G 链路上达到 6G 传输能力,受到国内外极大关注。

### 4.1 现代语义通信仿真平台与面向 6G 的原型样机平台

搭建了国际首个面向 6G 的现代语义通信全链



图 10 面向 6G 智能通信融合外场试验网

路仿真平台和通用原型样机,如图 11 所示,支持从物理层到应用层的端到端仿真能力。仿真平台支持数据分割、速率匹配、传输调度等关键业务面协议栈功能,并实现了多模态业务数据的传输性能评估。仿真结果验证了现代语义通信在谱效、传输速率和时延等方面的优势,为 6G 技术验证与标准化推进提供了强有力的支撑。此外,原型样机平台成功开展了面向 6G 的通信感知一体化和内生智能等多项技术验证,可加速 6G 产业的培育与业务部署。

### 4.2 端到端现代语义通信平台

信源信道联合编码是语义通信的关键技术之一,基于信源信道联合编码的端到端语义通信的性能表现是业界关注的重点。因此,团队搭建了国际首套现代语义通信端到端平台,如图 12 所示。语义通信端到端平台由发射机、功放和接收机 3 部分组成,在发射机运行语义编码、调制、层映射、预编码、资源映射和 OFDM 调制模块,经由功放放大后由接收机解码接收。

如图 13 所示,现代语义通信端到端平台验证了语义通信技术在 5G 链路上到达 6G 传输能力的可行性,谱效提升 7.5 倍。该平台在无人系统、智能电



图 11 面向 6G 的语义通信全链路仿真平台和通用原型样机



图 12 端到端语义通信平台

网、大视频传输等场景中进行了外场测试,证实了语义通信在实际应用中的性能优势。

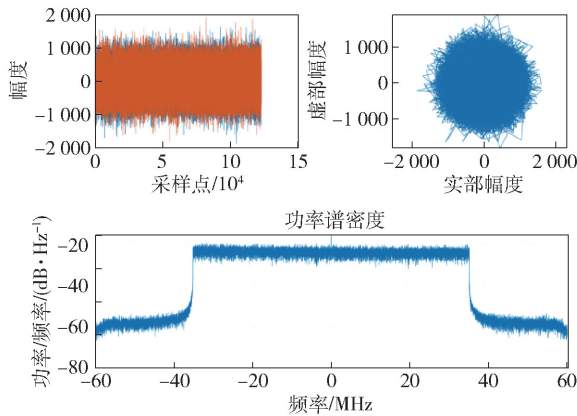


图 13 现代语义通信端到端平台外场试验信号

### 4.3 语义模分多址平台

针对模分多址技术的验证设计了模分多址实验平台,如图 14 所示,通过对 2 用户的上下行链路进行仿真试验。外场试验证明,基于模分多址的语义通信系统在低信噪比条件下,频谱效率相比传统 5G 系统提升至 2 倍,用户信号恢复性能也大幅增强,显著提升了多用户语义通信系统的资源利用率与可靠性。

### 4.4 语义沉浸式通信场景

在复杂的多媒体数据中,不同的内容虽然在表现形式上千差万别,但在语义层面存在着一定的共性特征,例如人物的动作、场景的类型等;同时,每个数据又具有独特的个性信息,以区别于其他相似内容。团队基于端到端语义通信平台对语义沉浸式通

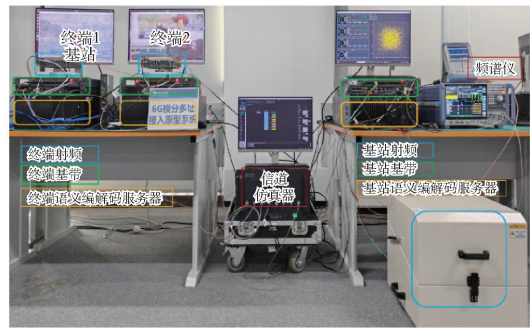


图 14 模分多址技术试验平台

信进行试验,原理如图 15 所示。

验证结果表明,所提出的基于潜在空间和信源信道联合编码的语义视频传输系统,带宽需求降低至 5G 链路的 40%,有效应对了大规模多媒体数据传输的挑战。此外,基于语义通信的咪咕视频彩铃实现成果落地试用,大幅提升了窄带高清的用户体验,传输效率提高 10%。

### 4.5 语义卫星通信场景

在 6G 移动通信中,星地链路作为实现全球覆盖的关键一环仍面临着诸多挑战,其中低信噪比条件下的通信质量问题尤为突出。由于星地链路较远的距离导致的信号衰落和收到多种干扰源的影响导致接收信号的质量大打折扣,语义通信的发展为这一难题带来解决方案。将语义通信应用于卫星通信可以使信号在有限的带宽和功率条件下具有较好的传输能力。

在外场试验中搭建的语义卫星通信平台如图 16 所示,将语义通信模块和信源信道联合编码融合到卫星通信中,提升星地链路对抗深衰落和强干扰的能力。实测结果如图 17 所示,较目前通信方案可获得接近 7 dB 性能提升,显著增强了星地链路对抗干扰与深衰落的能力,有效缓解了星地传输能力受限的问题。

## 5 语义通信标准化推进

6G 标准化进展正围绕用户体验优化、系统扩展

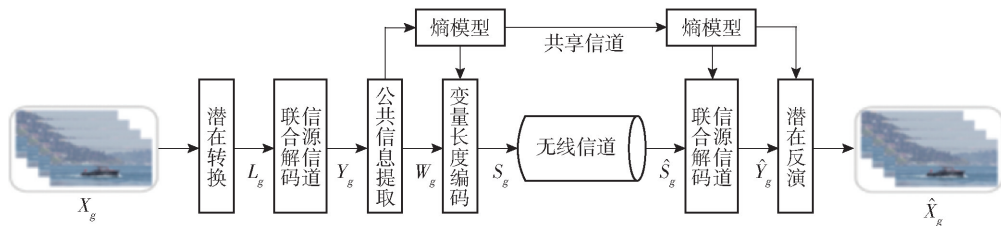


图 15 语义沉浸式通信场景增强框图

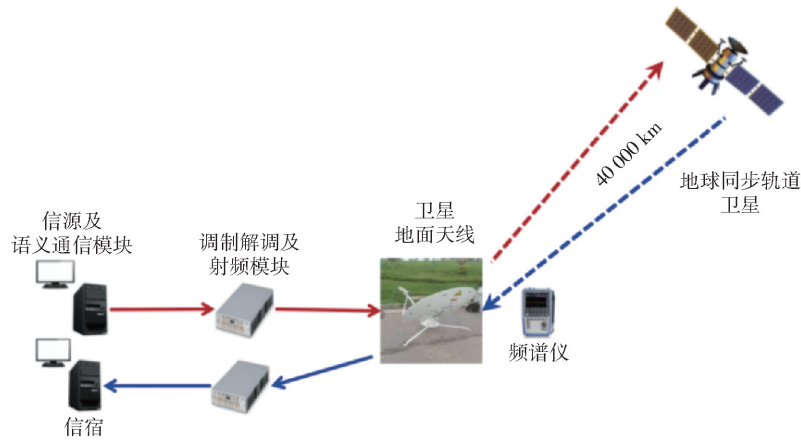


图 16 语义卫星通信框图

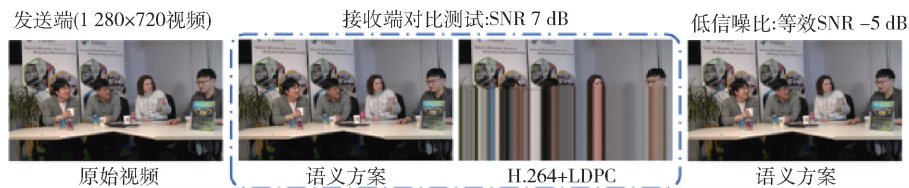


图 17 语义卫星通信场景结果

能力和多样化服务支撑全面展开,重点聚焦于沉浸式通信、空天地一体化、通感融合等核心场景需求。面对多频段和终端异构化挑战,标准化工作推进统一且灵活的技术架构,致力于简化配置、降低能耗和提升系统经济性,特别适配功耗敏感设备与消费级场景。同时,AI/机器学习(ML,machine learning)框架被纳入标准体系核心,推动无线接口、资源管理、协议流程等实现内生智能,为 6G 网络注入自主感知、自主决策、自主优化能力,全面提升系统性能与服务效率。

团队长期深度参与第 3 代合作伙伴计划(3GPP,3rd generation partnership project)移动通信国际标准化工作,涵盖从 3G 时分同步码分多址

(TD-SCDMA,time division-synchronous code division multiple access)、4G 时分长期演进(TD-LTE,time division-long term evolution)、5G 异构组网与移动组网到 6G 语义通信与原生 AI 等各代关键技术

的标准制定与演进,如图 18 所示。在国内语义通信标准化推进方面,已形成多层次协同格局。当前,中国通信标准化协会(CCSA,China communications standards association)的首个语义通信相关技术标准研究报告已于 2024 年 8 月完成并结项,获得了多家运营商、设备商和高校科研院所的参与支持。该标准研究项目围绕智简语义通信的应用场景、系统架构、协议设计、指标体系和关键技术进行了全面阐述,并通过搭建仿真平台和原型

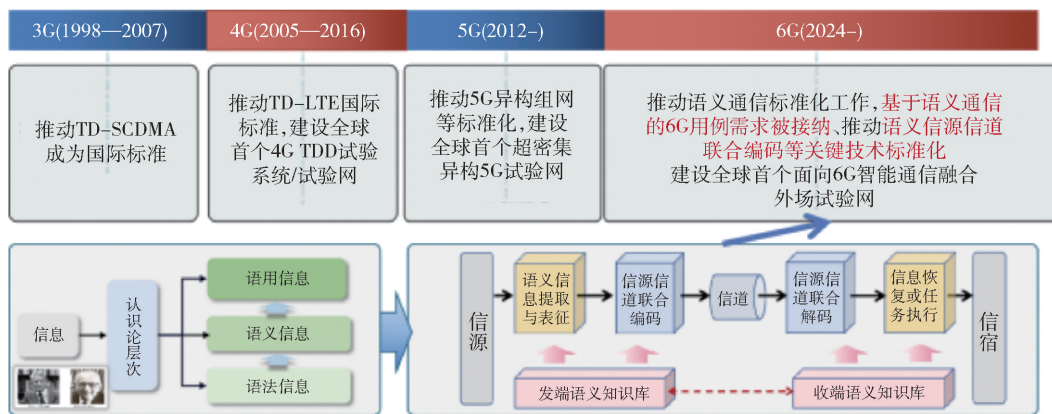


图 18 3G~6G 标准参与情况

验证系统,对关键技术进行了验证,为 6G 移动通信技术的演进提供了参考。联合 40 余家国内外成员单位于 2023 年成立国际移动通信 2030(IMT-2030, international mobile telecommunications 2030) 6G 语义通信任务组,涵盖典型场景、系统设计和应用验证等六大方向。此外,推动成立了技术委员会 630(TC630, technical committee 630) 语义智简通信技术与标准推进委员会,系统开展总体需求、架构、性能和关键技术研究,推动产业前共识形成。

在国际语义通信标准化推进方面,团队提出的语义通信 6G 场景用例多项标准提案在 3GPP 技术规范组服务和系统方面(TSG SA1, technical specification group service and system aspects 1) 第 110 次福冈会议被成功接纳<sup>[44-46]</sup>。SA1 作为 6G 标准的第 1 个关键环节,迈出了语义通信 6G 国际化的第 1 步,为后续语义通信关键技术标准化打下了重要基础。未来,团队将继续致力于语义通信标准化工作,聚焦四大关键方向:1) 信道状态信息(CSI, channel state information) 压缩反馈,通过引入基于信源信道联合编码的 CSI 压缩反馈技术,提升信道状态信息传输效率;2) 混合式自动重送请求传输机制,探索基于信源信道联合编码与调制的确认(ACK, acknowledgement)/否定确认(NACK, negative acknowledgement) 反馈方式,实现更加鲁棒的重传控制;3) 双端模型部署及生命周期管理,涵盖模型采集、对齐和更新机制;4) 6G 数据面/用户面语义增强,包括语义提取、语义编码和 AI 分层编解码等核心技术,支撑数据传输的智能优化。

## 6 结束语

针对智能通信深度融合面临的“通信带宽增加与资源消耗剧增的本质矛盾、信源压缩能力提升以实现信息熵减、信息系统适应性增强以优化通信系统增益”三大核心问题,首次提出现代语义通信与 6G 智简网络理论技术体系,在基础理论、关键技术、外场试验和标准化推进方面取得了重大突破,标志着现代语义通信与 6G 智简网络理论技术体系成为 6G 重要演进方向,并为智能制造、智慧车联网、元宇宙等多领域提供了坚实的理论与技术支撑。现代语义通信与 6G 智简网络理论技术体系这项成果是北京邮电大学作为“信息黄埔”对世界通信行业的贡献,让我国在现代化建设的征途上不仅有自立自强的产业体系,还有构建这个体系的核心技术支撑,更

有为发展这些核心技术提供支撑的基础理论。

## 参考文献:

- [1] 张平. 通信与智能融合: 6G 迈向“智简”的有效途径[J]. 中国网信, 2024(10): 31-35.  
ZHANG P. Communication and intelligence integration: An effective pathway for 6G towards intellicise[J]. China Cyberspace, 2024(10): 31-35.
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R/OL]. (2021-06-06) [2025-10-09]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202106/P020210604552572072895.pdf>.  
IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G overall vision and potential key technology white paper[R/OL]. (2021-06-06) [2025-10-09]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202106/P020210604552572072895.pdf>.
- [3] HUANG L, ZHANG H, LI R, et al. AI coding: Learning to construct error correction codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 26-39.
- [4] 新华网. 我国成功搭建国际首个通信与智能融合的 6G 试验网[EB/OL]. (2024-07-11) [2025-10-09]. <https://www.xinhuanet.com/politics/20240711/2da8de04db054bdfb683cb340e5e52be/c.html>.  
XinhuaNet. China successfully built the world's first 6G test network integrating communication and intelligence [EB/OL]. (2024-07-11) [2025-10-09]. <https://www.xinhuanet.com/politics/20240711/2da8de04db054bdfb683cb340e5e52be/c.html>.
- [5] ZHANG P, XU W, LIU Y, et al. Intellicise wireless networks from semantic communications: A survey, research issues, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2025, 27(3): 2051-2084.
- [6] 张平. 语义通信: 未来通信系统的智简之道[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 1.  
ZHANG P. Semantic communications: Intellicise path for future communication systems[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(1): 1.
- [7] ZHANG P, XU W J, GAO H, et al. Toward wisdom-evolutionary and primitive-concise 6G: A new paradigm of semantic communication networks [J]. Engineering, 2022, 8(1): 60-73.
- [8] BAO J, BASU P, DEAN M, et al. Towards a theory of semantic communication [C]//2011 IEEE Network Science Workshop. West Point, NY, USA: IEEE, 2011: 110-117.
- [9] 辛港涛, 樊平毅. 语义信息论的回顾与展望[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 9-12.

- XIN G T, FAN P Y. Review and prospect of semantic information theory [J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(2): 9-12.
- [10] 张平, 牛凯, 姚圣时, 等. 面向未来的语义通信: 基本原理与实现方法[J]. 通信学报, 2023, 44(5): 1-14.
- ZHANG P, NIU K, YAO S S, et al. Semantic communications for future: Basic principle and implementation methodology [J]. Journal on Communications, 2023, 44(5): 1-14.
- [11] 牛凯, 张平. 语义通信的数学理论[J]. 通信学报, 2024, 45(6): 7-59.
- NIU K, ZHANG P. A mathematical theory of semantic communication[J]. Journal on Communications, 2024, 45(6): 7-59.
- [12] ZHANG P, XU X D, DONG C, et al. Model division multiple access for semantic communications[J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2023, 24(6): 801-812.
- [13] ZHANG P, XU X D, DONG C, et al. Intellicise communication system: Model-driven semantic communications[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2022, 29(1): 2-12.
- [14] XU X D, XU B X, HAN S J, et al. Task-oriented and semantic-aware heterogeneous networks for artificial intelligence of things: Performance analysis and optimization [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 11(1): 228-242.
- [15] DONG C, LIANG H T, XU X D, et al. Semantic communication system based on semantic slice models propagation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 41(1): 202-213.
- [16] WANG Y N, HAN S J, XU X D, et al. Intellicise model transmission for semantic communication in intelligence-native 6G network [J]. China Communications, 2024, 21(7): 95-112.
- [17] WANG Y N, HAN S J, XU X D, et al. Feature importance-aware task-oriented semantic transmission and optimization[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024, 10(4): 1175-1189.
- [18] LI J Y, CHI X Y, WANG H, et al. Joint video frame scheduling and resource allocation for device-edge collaborative video intelligent analytics [C] // 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Milan, Italy: IEEE, 2025: 1-6.
- [19] 吕守晔, 戴金晟, 张平. 信源信道联合的新范式: 语义通信[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 2-8.
- LYU S Y, DAI J C, ZHANG P. A new paradigm of joint source-channel coding: Semantic communications [J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(2): 2-8.
- [20] JIANG A X, LI Y, BRUCK J. Error correction through language processing [C] // 2015 IEEE Information Theory Workshop (ITW). Jerusalem, Israel: IEEE, 2015: 1-5.
- [21] RAO M, FARSAF N, GOLDSMITH A. Variable length joint source-channel coding of text using deep neural networks [C] // 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Kalamata, Greece: IEEE, 2018: 1-5.
- [22] GÜLER B, YENER A, SWAMI A. The semantic communication game [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018, 4(4): 787-802.
- [23] BOURTSOULATZE E, KURKA D B, GUNDUZ D. Deep joint source-channel coding for wireless image transmission [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(3): 567-579.
- [24] XIE H Q, QIN Z J. A lite distributed semantic communication system for Internet of things [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(1): 142-153.
- [25] DU B X, DU H Y, NIYATO D, et al. Task-oriented semantic communication in large multimodal models-based vehicle networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(10): 9822-9836.
- [26] WANG B Y, LI R P, ZHU J H, et al. Knowledge enhanced semantic communication receiver [J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(7): 1794-1798.
- [27] WU T, CHEN Z Y, HE D Z, et al. CDDM: Channel denoising diffusion models for wireless semantic communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11168-11183.
- [28] XU B X, HAN S J, XU X D, et al. Semantic prior aided channel-adaptive equalizing and de-noising semantic communication system with latent diffusion model [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(6): 4614-4630.
- [29] 孙亚萍, 崔曙光, 张平. 面向语义通信的语义知识库综述 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 19-23.
- SUN Y P, CUI S G, ZHANG P. A survey of semantic knowledge base for semantic communications [J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(2): 19-23.
- [30] XU X D, XIONG H C, WANG Y N, et al. Knowledge-

- enhanced semantic communication system with OFDM transmissions[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(7): 172302.
- [31] ZHENG Y, WANG F Y, XU W J, et al. Semantic base enabled image transmission with fine-grained HARQ [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(4): 3606-3622.
- [32] FAN S R, LIANG H T, DONG C, et al. A specific task-oriented semantic image communication system for substation patrol inspection [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(2): 835-844.
- [33] CHI X Y, HAN S J, XU X D, et al. Value-driven XR transmission in multi-connectivity assisted communication system [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, Early Access: 1-16.
- [34] GAO H X, SUN M Y, XU X D, et al. Adaptive cross-modal super-resolution semantic communication for mobile AI-generated panoramic video [J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, Early Access: 1-14.
- [35] CHI X Y, HAN S J, XU X D, et al. Source value-based resource allocation in task-oriented communications [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 39395-39408.
- [36] 许晓东, 韩书君, 赵芸, 等. 6G 无线覆盖扩展技术 [J]. *中国科学(信息科学)*, 2024, 54(5): 1144-1176.
- XU X D, HAN S J, ZHAO Y, et al. 6G wireless coverage extension technologies [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2024, 54(5): 1144-1176.
- [37] ZHENG G H, NI Q, NAVAIE K, et al. Semantic communication in satellite-borne edge cloud network for computation offloading [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(5): 1145-1158.
- [38] ZHANG W Z, HAN S J, XU X D, et al. Joint service placement and model partitioning for accelerating DNN inference in edge intelligence empowered vehicle networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, Early Access: 1-16.
- [39] YUAN Y F, ZHANG J X, XU X D, et al. Learning-based task-centric multi-user semantic communication solution for vehicle networks [J]. *Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(6): 9328-9342.
- [40] PAPANENI K, ROUKOS S, WARD T, et al. Bleu: A method for automatic evaluation of machine translation [C] // *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Philadelphia, Pennsylvania, USA: Association for Computational Linguistics, 2002: 311-318.
- [41] HORÉ A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs SSIM [C] // *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 2366-2369.
- [42] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [43] VINCENT E, GRIBONVAL R, FÉVOTTE C. Performance measurement in blind audio source separation [J]. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2006, 14(4): 1462-1469.
- [44] 3GPP. Use Case on AI-Driven Multi-Vehicle Cooperative Perception; S1-252967-2025 [S].
- [45] 3GPP. Use Case on Intelligent Transmission Service for User Experience Improvement; S1-252590-2025 [S].
- [46] 3GPP. Use Case on Smart Housekeeping; S1-252860-2025 [S].