

科技评论

通信与 AI 融合的路径思辨

张平¹, 牛凯^{2*}, 刘宜明^{1*}, 许晓东¹, 许文俊¹, 马楠¹

摘要 通信与智能的融合,开启了具有革命性、颠覆性的通信新体系变革。首先分析了通信技术、人工智能(artificial intelligence, AI)的研究现状,指出通信技术与 AI 融合的必要性;然后给出了原创的通信智能融合框架(ComAI),阐述了 ComAI 的指导理论,即语义信息论,揭示了同义性是语义信息的本质特征,由同义映射出发,构建了语义信息度量体系,证明了语义无失真信源编码定理、语义信道编码定理和语义限失真信源编码定理;进一步探讨了 ComAI 系统的系列关键技术;最后,展望 ComAI 未来的应用前景。为支撑中国构建智能通信基础设施体系,亟需实现关键核心技术突破,提升中国在信息通信领域的综合竞争力。

关键词 语义信息论;通信智能融合;语义通信

当前,以第 5/6 代移动通信技术(5G/6G)为代表的通信技术,已经逼近了经典信息论指出的理论极限,通信科技的发展受到了理论性能的严重制约。同时,人工智能迎来了第 3 次热潮,产生了显著的溢出效应,AI for Science 成为科学研究的新范式。通信与人工智能融合成为信息科技研究的大趋势,本文提出了通信智能融合(ComAI)的新型框架,对通信与智能融合的路径进行深入思考,阐述了 ComAI 的系统框架、基础理论及方法体系。

1 通信技术的研究现状

1948 年,美国科学家克劳德·艾尔伍德·香农(Claude Elwood Shannon)创立了经典信息论,为语法信息的度量、压缩、传输等指明了发展方向,奠定了

现代信息通信技术的理论基础。以无线/移动通信技术为例,在经典信息论指导下,从 1G 到 5G 的发展历程展现了关键技术与用户体验的重大变革。

20 世纪 80 年代推出的 1G 采用调频(frequency modulation, FM)和频分多址(frequency-division multiple access, FDMA)技术,开创了模拟语音服务的先河。然而,1G 采用的模拟通信和电路交换方式存在显著缺陷:硬切换机制效率低下、语音质量易受干扰、安全隐私保护薄弱。20 世纪 90 年代初问世的 2G 采用时分多址(time-division multiple access, TDMA)与码分多址(code division multiple access, CDMA)数字调制技术,实现了数字化通信飞跃,显著提升语音质量和安全性,同时支持语音与短信服务,传输速率可达数千比特每秒(kb/s),成为移动通信演进的里程碑。

21 世纪初商用的 3G 系统带来了革命性变化:传输速率普遍突破兆比特每秒(Mb/s),支持视频流媒体、移动互联网浏览等多媒体服务,推动移动应用生态爆发式增长,从根本上重塑了用户与技术交互模

1. 北京邮电大学网络与技术交换全国重点实验室,北京 100876

2. 北京邮电大学泛网无线教育部重点实验室,北京 100876

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2026-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(62293481); 北京市自然科学基金项目(L251036)

作者简介: 张平, 中国工程院院士, 教授, 研究方向为无线通信, 电子邮箱: pzhang@bupt.edu.cn; 牛凯(通信作者), 教授, 研究方向为信息论与编码, 电子邮箱: niukai@bupt.edu.cn; 刘宜明(共同通信作者), 副教授, 研究方向为智能信息传输与组网方法, 电子邮箱: liuyiming@bupt.edu.cn

引用格式: 张平, 牛凯, 刘宜明, 等. 通信与 AI 融合的路径思辨[J]. 科技导报, 2026, 44(17): 17-22; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.09.00118

式。其核心技术宽带码分多址(wideband CDMA, WCDMA)显著提升了数据传输能力与服务品质。紧随其后的 4G 技术于 20 世纪 10 年代部署,将数据传输速率提升至数百 Mb/s 量级。该技术支持高清流媒体、在线游戏及大规模互联网接入,极大优化用户体验并催生多元化应用。多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)和正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术是实现高速率与高频谱效率的核心保障。21 世纪 20 年代初兴起的 5G 技术以超高传输速率(可达 10~20 Gb/s)、超低时延和增强连接为特征,不仅实现更高速的移动宽带传输,并且满足物联网(internet of things, IoT)、智慧城市、自动驾驶等新兴应用的严苛需求。这一演进历程折射出持续革新的技术浪潮,为无线通信创新奠定基石。

在移动通信系统演进中,通常采用分离式优化与模块化设计,即信源编码、信道编码、调制、信号处理等模块各自独立优化以实现局部目标,这样做难以达到系统整体性能最优。为满足爆炸式增长的信息传输需求,毫米波/太赫兹通信、大规模 MIMO、智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)等技术相继涌现。尽管潜力巨大,这些技术仍面临硬件成本高和系统复杂度攀升的瓶颈。尤为关键的是,现有单点技术已逼近经典信息论的理论极限。由此可见,尽管传统方法彰显了无线通信技术的成就,但也揭示了制约系统性能与发展的深层缺陷,依靠堆叠技术难以保证移动通信的可持续发展,带来了严峻挑战。

2 人工智能的研究现状

人工智能(artificial intelligence, AI)领域经历了前所未有的飞速发展,核心驱动力源于深度学习理论的深化和大语言模型(large language model, LLM)的崛起,深刻改变着科技与社会图景。

深度学习的 3 位先驱杰弗里·辛顿(Geoffrey Hinton)、约书亚·本吉奥(Yoshua Bengio)和杨立昆(Yann LeCun)因在该领域的奠基性贡献,共同荣获 2018 年图灵奖。辛顿等的工作在反向传播算法、卷积神经网络和概率图模型等方面为现代 AI 奠定了基础。2024 年,诺贝尔化学奖和物理学奖均授予了与人工智

能相关的成就,进一步凸显了人工智能在推动科学研究和应用发展中的关键作用。

以 Transformer 架构^[1]为核心,大模型^[2]成为近年最大亮点。模型规模呈指数级增长的趋势: OpenAI 的 GPT-3(1750 亿参数)展示了强大的少样本学习与文本生成能力;随后的 ChatGPT 和 GPT-4 实现了突破性的人机对话交互,推动生成式 AI 普及。谷歌、Meta(如 LLaMA 系列)、Anthropic 等机构也推出具有竞争力的模型,其中 DeepSeek 是低成本高性能大模型的典型代表。

大模型能力从文本扩展至多模态。OpenAI 的图文匹配(CLIP)^[3]和文生图(DALL·E)展示了跨模态理解与生成的潜力。谷歌的 PaLM-E、DeepMind 的 Flamingo 等模型进一步整合视觉、语言乃至机器人控制信号,向通用人工智能(artificial general intelligence, AGI)迈进。

在 AI for Science 方面,代表性的示例是 DeepMind 的 AlphaFold 2^[4]。这一模型成功预测了几乎所有已知蛋白质结构,解决了困扰生物学界 50 年的重大难题,展示了 AI 在基础科学研究中的革命性力量。AI 在新材料发现、药物研发等领域的应用也加速推进。

AI 已从实验室走向产业与生活的核心,其发展由算法创新、算力提升与数据积累共同驱动。大模型作为当前引擎,在多模态理解和具身智能等方向持续突破。

近年来,已有研究提出了通信与 AI 一体化的初步方案,例如, AI-RAN^[5]及欧盟提出的“AI+无线”总体框架^[6]等。这些方案通过引入大算力、移植 AI 模型,以解决无线通信网络中的复杂问题,并展现了一定的技术优势和性能提升。然而,现有 AI-RAN 等技术路线仍属于外挂式 AI 方案,虽可以提升网络性能及效率,但对通信系统提供的增益有限。在此背景下,提出了通信智能融合框架(ComAI),受自然智能启发,将源特征、下游任务与通信过程原生融合,并通过同义映射优化整个系统,实现通信与智能的深度融合,支撑新一代信息通信技术的可持续发展。

3 通信与智能融合的系统框架

1949 年,香农与沃伦·韦弗(Warren Weaver)阐述

了通信问题的3个层次。层次A: 通信符号的传输精确度如何? (技术问题)层次B: 传输符号对预期含义的传达精度如何? (语义问题)层次C: 接收到的含义对行为的预期影响效力如何? (效用问题)

香农提出的经典信息论仅解决了层次A的问题,但对层次B和C依然适用且具有参考价值。韦弗特别强调,尽管香农认为“通信的语义层面与工程层面无关”,但这并不意味着工程层面必然与语义层面隔

绝联系。近年来的语义通信研究表明,通信方法的设计不应局限于层次A的符号精确性,需要进一步聚焦到层次B的语义精度与层次C的效用有效性。

类比于自然智能的工作特点,如图1所示,ComAI融合架构^[7]旨在通过原生AI实现全通信系统的深度协同与整体优化,达成“智能内生、原生简构”的目标。ComAI体系对应从浅层到深层的3级信息处理流——语法层、语义层、语用层。

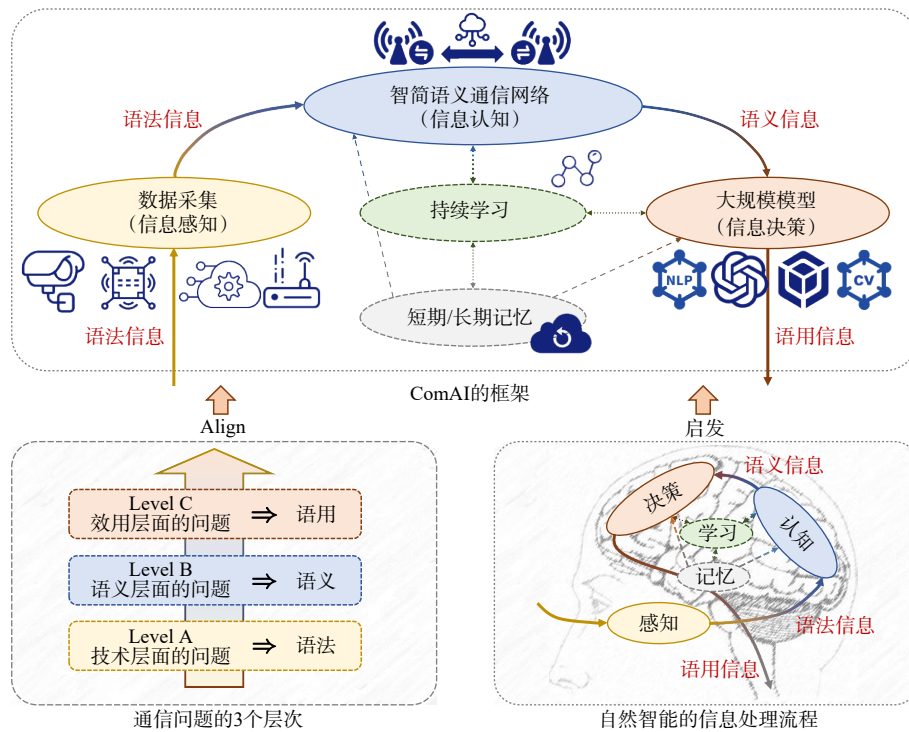


图1 ComAI系统架构

(1) 语法层(信息感知): 在数据采集过程中,主要考虑感知信息的精确获取。(2) 语义层(信息认知): 在信息传输过程中,关注输入数据的含义被精准理解。(3) 语用层(信息决策): 在推理过程中,基于接收含义的自然判断能否被有效执行。

基于此,ComAI致力于构建更智能、自适应的网络生态,为新型分布式智能体奠定基础,并提升无线网络功能与效率。需强调的是,ComAI体系的3个信息处理层次具有包容性关联而非完全割裂。例如语义层的认知必然涉及语法符号分析,语用层的决策也需涵盖语义特征理解。在此框架下,ComAI可提供定制化服务,并推动网络环境自优化与自演进。

具体而言,ComAI框架主要包括下列处理步骤。

1) 数据驱动的信息感知: 对应自然智能的“感

知”过程。未来各类传感设备将持续监测环境、社会及个体,通过先进传感技术将物理观测转化为数据信号。例如,移动群智感知(mobile crowd sensing, MCS)利用智能手机等移动物联网设备采集语法数据,经通信网络传输至云/边缘服务器。数据采集频率与方法直接影响后续通信与AI流程的性能。

2) 智简通信网络的信息认知: 对应“认知”过程。感知的语法数据通过无线/有线链路传输至接收端。借助智简通信网络,系统可对数据进行处理、压缩与传输。ComAI不追求比特/符号级精确度,而侧重向智能体传递内容含义,提升通信效率与有效性。通过在复杂场景中运用内生智能优化通信系统,ComAI将实现系统级“智简”,显著提升通信性能。

3) 大模型支撑的信息决策: 对应“决策”过程。

接收的语义信息经智能体处理以实现特定目标,涉及分析语境与用户意图以生成响应或行动。大模型赋予 ComAI 理解复杂场景与精准决策的能力,支持海量数据高效处理及跨场景快速决策,具备强大的语用层处理能力。

4) 长短时记忆与持续学习: 对应“记忆”与“学习”功能。作为智能信息处理的基石,它们使 ComAI 系统面对新场景时具有自适应能力。短时记忆与自适应调整赋予语义通信系统短期连续性预测与深度语义认知能力,增强系统适应性及自演进性;长时记忆与持续学习则助力大模型从现实世界学习规律与新知识,维持高效决策并实现持续进化,最终构建出满足多元需求的智能系统。

综上所述,ComAI 架构以语义信息处理为起点、自然智能处理模型为优化导向,深度融合通信与 AI 实现全流程智能信息处理,涵盖信息感知、认知与决策等环节,并依托长短时记忆与持续学习实现系统级持续优化与演进,突破传统系统在资源开销与能耗方面的瓶颈。其中,智简语义通信网络^[8]驱动的信息认知作为框架核心步骤,通过智能认知物理环境和应用场景,分析用户意图、业务特征、网络态势等,执行智简推断、决策、管理、控制等,实现智简业务承载、智简网络组织、智简信息传输和智简信号处理等多个层面的整体调控,对整体通信性能、资源开销及能耗的关键瓶颈作用至关重要。

ComAI 体系架构需要在基础理论与关键技术方面取得突破。(1) 基础理论创新: 以语义信息理论为切入点,探索支撑 ComAI 的基础信息理论,包括语义信息核心思想、基本度量、编码定理与理论极限,为 ComAI 发展提供理论指引。(2) 关键技术突破: 以 AI 与深度学习为突破口,研究智能语义通信的通用技术框架,涵盖点对点、多址接入及全双工场景的物理模型与传输机制,挖掘 ComAI 性能潜力。

4 通信与智能融合的基础理论

自从 1948 年经典信息论诞生以来,在其指导下,现代通信技术已经逼近了理论性能极限,例如信息熵,信道容量以及率失真函数。长期以来,由于经典信息论只研究语法信息,限制了通信科学的进一步发

展。近年来,研究语义信息处理与传输的通信技术获得了学术界的普遍关注,语义通信开辟了未来通信技术发展的新方向,但还缺乏一般性的数学指导理论。为了解决这一难题,张平院士团队^[9]构建了语义信息的理论框架,对语义信息的度量体系与语义通信的理论极限进行了系统性阐述。

首先,通过深入分析各类信源的数据特征,以及各种下游任务的需求,总结归纳出语义信息的普遍属性——同义性。由此指出语义信息是语法信息的上级概念,是许多等效或相似语法信息的抽象特征,表征隐藏在数据或消息背后的含义或内容。语义信息与语法信息之间的关系命名为同义映射,这是一种“一对多”映射,即一个语义符号可以由许多不同的语法符号表示。基于同义映射 f 这一核心概念,引入语义熵作为语义信息的基本度量指标,表示为信源概率分布与同义映射的泛函。在此基础上,引入上/下语义互信息,语义信道容量以及语义率失真函数,从而构建了完整的语义信息度量体系。这些语义信息度量是经典信息度量的自然延伸,都由同义映射约束,如果采用“一对一”映射,则可以退化为传统的信息度量。由此可见,语义信息度量体系包含语法信息度量,前者与后者具有兼容性。

其次,证明了 3 个重要的语义编码定理,即语义无失真信源编码定理、语义信道编码定理和语义限失真信源编码定理。类似于经典信息论,这些基本编码定理皆为存在性定理,但它们指出了通信与智能融合的理论性能极限,在语义信息论中起着关键作用。由同义映射和这些基本编码定理可以推断,语义通信系统的性能优于经典通信系统,即语义熵小于信息熵,语义信道容量大于经典信道容量,以及语义率失真函数小于经典率失真函数。

最后,讨论了连续条件下的语义信息度量。此时同义映射转换为连续随机变量分布区间的划分方式。相应地,划分后的子区间被命名为同义区间,其平均长度定义为同义长度 S 。特别是对于限带高斯信道,得到了一个新的信道容量公式

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

式中,平均同义长度 S 表征了信息的辨识能力。这一容量公式是经典信道容量的重要扩展,当 $S = 1$ 时,该

公式退化为著名的香农信道容量公式。

文献^[9]提出的语义信息论,依据同义映射这一语义信息的本质特征,构建了语义信息的度量体系,引入新的数学工具,证明了语义编码的基本定理,论证了语义通信系统的性能极限,奠定了 ComAI 的理论基础,揭示了未来通信与智能融合的巨大性能潜力。

5 通信与智能融合的方法体系

5G 升级至 6G,支持泛在智能,是对传统通信的极大挑战。在语义信息论指导下,依据信息处理的步骤,通信与智能融合的各种关键技术,可以概括为语义信息表征与传输 2 大类技术。其中,语义信息表征主要包括语义基^[10](Seb)物理模型和同义变分推断^[11](synonymous variational inference, SVI),语义传输技术主要包括非线性信源信道编码^[12](nonlinear transmission source-channel coding, NTSCC)、模分多址^[13](model division multiple access, MDMA)和语义全双工^[14](semantics-division duplexing, SDD)技术。

语义基^[10]构成了 ComAI 技术框架的信息处理基石。在同义映射的指导下,对于不同模态的数据,语义基构成了语义信息表征的基本单元,类似于传统通信系统中的“比特”。语义基通常被描述为高维空间向量,包含信源的显式和隐式语义特征。这种向量化的表示方式支持了基于模型的传输概念,即涉及 AI 语义模型的传递。这一过程反映了 AI 驱动的语义通信能力。在语义信息论指导下,构建了 SVI 分析框架^[11],定义了最优语义基表征的理想条件,构建典型的同义映射关系,并指导语义编解码器的优化。

为解决普遍存在的端到端传输挑战,文献^[12]提出了一种基于 NTSCC 方案,通过通信与智能的深度融合,实现更精确的速率分配,显著提升了语义通信系统的性能。针对多用户通信,引入了开创性技术——MDMA 技术^[13],通过引入语义域,显著提升了多用户通信的系统容量。此外,提出了 SDD 技术^[14],进一步在语义域内抑制自干扰信号,提升全双工系统整体传输性能。

ComAI 采用整体优化方法,随通信意图、背景知识等柔性可变,将多模态信源语义特征与无线信道特性适配,通过信源信道联合编码的贯通式优化设计,

显著提升传输效率,大幅度节省了功率、带宽、天线等物理资源,为 6G 发展提供了创新的“拐点”技术。

语义通信基础理论和核心技术的突破带来了通信系统设计的变革,不再是模块分离设计的碎片化创新,而是通信与智能的深度融合设计,获得了巨大的系统性能增益。张平院士团队开发的国际首个面向 6G 的智能通信融合外场试验网,展示了语义通信在智慧模型传输、沉浸式视频传输、无人车联、无人机网络、泛在连接卫星通信及大规模物联网等场景中的优异性能。

6 总结与展望

展望未来,通信与 AI 的深度融合,将会对通信领域和 AI 领域的发展都带来革命性变化。对于通信领域而言,通过与 AI 技术的深度融合,将会在基础理论、设计方法与业务应用方面,都取得突破与创新。ComAI 为通信系统的设计提供了新的思路,为未来通信系统与网络的发展提供了新的途径,有望打破经典信息论的桎梏,开辟通信技术可持续发展的新路。对于 AI 领域而言,通过与通信技术的深度融合,可以为算力网或大模型的部署提供可靠的通信支撑,可以将人工智能的应用与通信业务紧密绑定,提供新型的 AI 服务,由此构建以智能体为核心单元的智能通信融合网络,奠基智能时代的信息基础设施。可以预见,通信与 AI 的深度融合,必将成为未来信息技术发展的核心驱动力,推动信息技术新的变革。

参考文献(References)

- [1] Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, et al. Attention is all you need[C]//31st Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook, NY: Curran Associates Inc., 2017: 30.
- [2] Brown T, Mann B, Ryder N, et al. Language models are few-shot learners[C]//34th Conference on Neural Information Processing Systems. Vancouver, BC: Curran Associates, Inc., 2020, 33: 1877-1901.
- [3] Radford A, Kim J W, Hallacy C, et al. Learning transferable visual models from natural language supervision[C]//International conference on machine learning. San Diego, CA: PmLR, 2021: 8748-8763.
- [4] Jumper J, Evans R, Pritzel A, et al. Highly accurate protein

- structure prediction with AlphaFold[J]. *Nature*, 2021, 596(7873): 583–589.
- [5] AI-RAN Alliance. Vision and mission white paper[EB/OL]. [2025-09-03]. <https://ai-ran.org/documents/AI-RAN-Alliance-Whitepaper.pdf>.
- [6] Hexa-X. AI-driven communication and computation co-design: final solutions[EB/OL]. [2025-09-03]. https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2023/05/Hexa-X_D4.3_v1.0.pdf.
- [7] Zhang P, Niu K, Wang X, et al. ComAI: The convergence of communication and artificial intelligence[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2026, 28: 2163–2197.
- [8] Zhang P, Xu W, Liu Y, et al. Intellicise wireless networks from semantic communications: A survey, research issues, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, 27(3): 2051–2084.
- [9] Niu K, Zhang P. A mathematical theory of semantic communication[J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(6): 7–59.
- [10] Zhang P, Xu W, Gao H, et al. Toward wisdom–evolutionary and primitive–concise 6G: A new paradigm of semantic communication networks[J]. *Engineering*, 2022, 8: 60–73.
- [11] Liang Z, Niu K, Wang C, et al. Synonymous variational inference for perceptual image compression[C]//International Conference on Machine Learning. Vancouver, BC: ICML, 2025: 37339–37369.
- [12] Dai J, Wang S, Tan K, et al. Nonlinear transform source–channel coding for semantic communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(8): 2300–2316.
- [13] Zhang P, Xu X, Dong C, et al. Model division multiple access for semantic communications[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2023, 24(6): 801–812.
- [14] Niu K, Liang Z, Dong C, et al. Semantics–division duplexing: A novel full–duplex paradigm[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(4): 307–314.

The path of the convergence of communication and artificial intelligence

ZHANG Ping¹, NIU Kai^{2*}, LIU Yiming^{1*}, XU Xiaodong¹, XU Wenjun¹, MA Nan¹

1. National Key Laboratory of Network 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

Abstract The convergence of communication and intelligence is initiating a revolutionary and disruptive transformation of the communication system. This paper first analyzes the current research of communication and artificial intelligence technologies, highlighting the necessity of their deep integration. It then presents an original paradigm called ComAI, and discusses on its guiding theory, namely semantic information theory, which reveals that synonymy is the essential characteristic of semantic information. Starting from the concept of synonymous mapping, a semantic information measurement system is constructed, and the semantic source coding theorem, semantic channel coding theorem, and semantic rate-distortion coding theorem, semantic channel coding, and semantic rate-distortion coding are proved. Furthermore, a series of key technologies of the ComAI system are discussed. Finally, it outlines the future application prospects of ComAI. To support the construction of China's intelligent communication infrastructure system, it is imperative to achieve breakthroughs in core technologies and enhance China's overall competitiveness in the field of information and communication.

Keywords semantic information theory; ComAI; semantic communications ●



(责任编辑 王微)