

6G 移动通信技术展望

张平¹, 牛凯¹, 田辉¹, 聂高峰¹, 秦晓琦¹, 戚琦², 张娇¹

(1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学网络技术研究院, 北京 100876)

摘要: 为满足人类更深层次的人工智能需求, 6G 将实现从真实世界到虚拟世界的延拓。为此提出了 6G 需要解决“人-机-物-灵”的问题, 设计了 6G 演进的双世界架构, 该架构将支持 6G 中存在于虚拟世界的第四元素——灵。进一步给出和分析了支撑 6G 设计与实现的关键理论与技术。

关键词: 6G; 人-机-物-灵; 虚拟世界

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019022

Technology prospect of 6G mobile communications

ZHANG Ping¹, NIU Kai¹, TIAN Hui¹, NIE Gaofeng¹, QIN Xiaoqi¹, QI Qi², ZHANG Jiao¹

1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

2. Institute of Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract: To achieve a deeper level of intelligent communication for human beings, the sixth generation mobile communication system (6G) will realize the extension from the real world to the virtual world. To this end, the “human-machine-thing-genie” problem introduced by 6G was presented, and an evolved dual-world architecture for 6G was proposed. The architecture includes the fourth elements of 6G, genie, in the virtual world. The potential key theories and technologies to support the design and implementation of 6G were proposed and analyzed.

Key words: the sixth generation mobile communication system, human-machine-thing-genie, virtual world

1 引言

用户通信需求提升和通信技术革新是移动通信系统演进的源动力。为了满足“动中通”的业务需求, 第一代移动通信系统(1G, the first generation mobile communication system)实现了“移动”能力与“通信”能力的结合, 成为移动通信系统从无到有的里程碑, 并拉开了移动通信系统的演进序幕。伴随着数字技术的成熟, 第二代移动通信系统(2G, the second generation mobile communication system)完成了从模拟体制向数字体制的全面过渡, 并开始扩展支持的业务维度。在日益丰富的业务需求驱动下, 第三代移动通信系统(3G, the third generation mobile communication system)采用了全新的码分多

址接入方式, 完善了对移动多媒体业务的支持^[1-2]。至此, 高数据速率和大带宽支持成为移动通信系统演进的重要指标。以多入多出(MIMO, multiple-input multiple-output)和正交频分多址接入(OFDM, orthogonal frequency division multiple access)为核心技术的第四代移动通信系统(4G, the fourth generation mobile communication system)不仅获取了频谱效率和支撑带宽能力的进一步提升^[3-5], 还成为了移动互联网的基础支撑。在 4G 获得巨大商业成功的同时, 第五代移动通信系统(5G, the fifth generation mobile communication system)逐渐渗透到垂直行业, 把支持的传统增强移动宽带业务(eMBB, enhance mobile broadband)场景延拓至海量机器类通信(mMTC, massive machine type of

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61421061)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61421061)

communication) 场景和超高可靠低时延通信 (uRLLC, ultra reliable and low latency communication) 场景^[6-9]。基于大规模多入多出 (massive MIMO)、毫米波 (mmWave, millimeter wave) 传输、多连接 (MC, multiple connectivity) 等技术, 5G 实现了峰值速率、用户体验数据速率、频谱效率、移动性管理、时延、连接密度、网络能效、区域业务容量性能的全方位提升^[10-11]。纵观上述的演进历程, 满足用户的通信需求是每代系统演进的首要目标, 而新的通信技术则是每代系统演进的驱动。

到目前为止, 1G 到 5G 的设计遵循着网络侧和用户侧的松耦合准则。通过技术驱动, 用户和网络的基本需求 (如用户数据速率、时延、网络谱效、能效等) 得到了一定的满足。但是受制于技术驱动能力, 1G 到 5G 的设计并未涉及更深层次的通信需求。在未来第六代移动通信系统 (6G, the sixth generation mobile communication system) 中, 网络与用户将被看作一个统一整体。用户的智能需求将被进一步挖掘和实现, 并以此为基准进行技术规划与演进布局。5G 的目标是满足大连接、高带宽和低时延场景下的通信需求。在 5G 演进后期, 陆地、海洋和天空中存在巨大数量的互联自动化设备, 数以亿计的传感器将遍布自然环境和生物体内。基于人工智能 (AI, artificial intelligence) 的各类系统部署于云平台、雾平台等边缘设备, 并创造数量庞大的新应用。6G 的早期阶段将是 5G 进行扩展和深入, 以 AI、边缘计算和物联网为基础, 实现智能应用与网络的深度融合, 实现虚拟现实、虚拟用户、智能网络等功能。进一步, 在人工智能理论、新材料和集成天线相关技术的驱动下, 6G 的长期演进将产生新突破, 甚至构建新世界^[12-13]。

本文首先分析 6G 演进趋势, 探讨人工智能与人类用户的关系, 然后基于 6G 业务需求框架提出新的通信元素——灵(Genie), 并在此基础上预测 6G 移动通信的使能技术。

2 AI——6G 演进趋势分析的出发点

虽然, AI 在 6G 的应用是大势所趋, 但是简单地把 AI 当作 6G 里的一种与移动通信简单叠加的技术是不正确的。只有深入挖掘用户的需求, 放眼智能、通信与人类未来的相互关系, 才能揭示 6G 移动通信的技术趋势。以色列历史学家尤瓦尔·赫拉

利在《未来简史》^[14]中预测了 AI 与人类之间关系的 3 个递进阶段: 1) AI 是人类的超级助手 (oracle), 能够了解与掌握人类的一切心理与生理特征, 为人类提出及时准确的生活与工作建议, 但是接受建议的决定权在人类手中; 2) AI 演变为人类的超级代理 (agent), 并从人类手中接过了部分决定权, 它全权代表人类处理事务; 3) AI 进一步演进为人类的君王 (sovereign), 成为人类的主人, 而人类的一切行动则听从 AI 的安排^[15]。

基于上述预测, 6G 应当遵循 AI 与人类关系的发展趋势, 达到关系演进的第一阶段, 也即 oracle 阶段。图 1 给出了 6G 业务需求框架。作为 oracle 阶段的重要实现基础, 6G 承载的业务将进一步演化为真实世界和虚拟世界这 2 个体系。真实世界体系的业务后向兼容 5G 中的 eMBB、mMTC、uRLLC 等典型场景, 实现真实世界万物互联的基本需求。虚拟世界体系的业务是对真实世界业务的延伸, 与虚拟世界的各种需求相对应。6G 创造的虚拟世界能够为每个用户构建 AI 助理 (AIA, AI assistant), 并采集、存储和交互用户的所说、所见和所思。虚拟世界体系使人类用户的各种差异化需求得到了数字化抽象与表达, 并建立每个用户的全方位立体化模拟。具体而言, 虚拟世界体系包括 3 个空间: 虚拟物理空间 (VPS, virtual physical space)、虚拟行为空间 (VBS, virtual behavior space)、虚拟精神空间 (VSS, virtual spiritual space)。

VPS 基于 6G 兼容的典型场景的实时巨量数据传输, 构建真实物理世界 (如地理环境、建筑物、道路、车辆、室内结构等) 在虚拟世界的镜像, 并为海量用户的 AIA 提供信息交互的虚拟数字空间。VPS 中的数据具有实时更新与高精度模拟的特征, 可为重大体育活动、重大庆典、抢险救灾、军事行动、仿真电子商务、数字化工厂等应用提供业务支撑。

VBS 扩展了 5G 的 mMTC 场景。依靠 6G 人机接口与生物传感器网络, VBS 能够实时采集与监控人类用户的身体行为和生理机能, 并向 AIA 及时传输诊疗数据。AIA 基于对 VBS 提供数据的分析结果, 预测用户的健康状况, 并给出及时有效的治疗解决方案。VBS 的典型应用支撑是精准医疗的普遍实现。

基于 VPS、VBS 与业务场景的海量信息交互与解析, 可以构建 VSS。由于语义信息理论的发展以及差异需求感知能力的提升, AIA 能够获取用户的各种心理状态与精神需求。这些感知获取的需求不

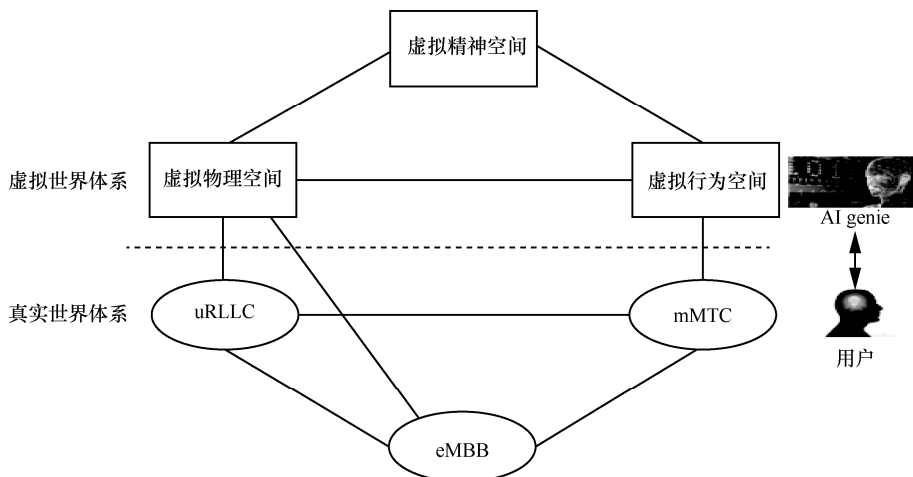


图 1 6G 业务需求框架

仅包括求职、社交等真实需求，还包括游戏、爱好等虚拟需求。基于 VSS 捕获的感知需求，AIA 为用户的健康生活与娱乐提供完备的建议和服务。例如，在 6G 支撑下，不同用户的 AIA 通过信息交互与协作，可以为用户的择偶与婚恋提供深度咨询，可以对用户的求职与升迁进行精准分析，可以帮助用户构建、维护和发展更好社交关系。

3 Genie——6G 灵魂

6G 不仅包含 5G 涉及的人类社会、信息空间、物理世界（人、机、物）这 3 个核心元素，还包含本文定义的第四维元素—灵（Genie）。Genie 存在于图 1 中的虚拟世界体系，不需要人工参与即可实现通信和决策制定。Genie 基于实时采集的大量数据和高效机器学习技术，完成用户意图的获取以及决策的制定。Genie 可以作为 6G 用户的 AIA，提供强大的代理功能。由于不受智能终端的具体物理形态的限制，Genie 凌驾于 VPS 并包含 VBS 和 BSS 的完备功能，具备为用户构建个性化自主沉浸式立体代理的能力。Haddadin 等^[16]提出触觉机器人网络作为人类虚拟世界的多维度代理，以各类触觉方式，采集和识别人类意图。Genie 存在于人-机-物全方位融合的基础之上，可以覆盖任意物理空间的实体，包含可作为通信与计算节点的物理实体，如具备传输与计算能力的智能设备以及建筑、植物等。Genie 通过物理空间资源感知用户与环境的多维度信息，实时构建虚拟精神空间中的用户行为特征、决策偏好模型等信息。通过人-机-物-灵协作，Genie 可为用户提供实时虚拟业务场景，并代理用

户实现相应的需求。

6G 的应用场景主要包括虚拟现实和虚拟用户。在虚拟现实场景中，6G 需要实时感知环境的变化，高效处理海量传感器反馈的数据，并快速完成终端与云中心的信息交换。虚拟用户场景是指借助人工智能、移动计算等技术产生虚拟对象，并通过全网无线接入与传输技术将 Genie 准确地“部署”于真实环境中，为用户提供虚拟世界与物理世界融合的应用场景。以图 2 所示的真实环境中的实体花店为例说明 6G 人-机-物-灵协作业务场景。该真实环境中部署多种 6G 网络传感设备和网络设备，可实时采集店内物品画面、气味、温度、湿度、光线等信息。Genie 根据用户需求，远程为用户重构沉浸式花店场景。同时，用户可授权给 Genie，由其依据用户的意识、需求、物品等条件，代替用户进行决策。

6G 的应用场景具有虚实结合、实时交互等全新的网络特点，这将给 5G 网络带来巨大的传输压力。因此，迫切需要研究支撑 6G 演进的基础理论和核心关键技术。当前，5G 以行业特色业务为导向，分别解决了 eMBB、uRLLC、mMTC 场景面临的问题。然而，为了支撑未来网络中第四元素—灵，6G 不仅需要兼容 5G 中的三大场景，而且要进一步实现三大场景增强融合，调和不同场景中的业务需求矛盾，实现虚拟世界的更深层次的智能通信需求。

为了实现人-机-物-灵协作应用场景，满足人类用户精神与物质的全方位需求，应当追求主观感受和客观技术性能两方面优化，构建 6G 使能技术体系。

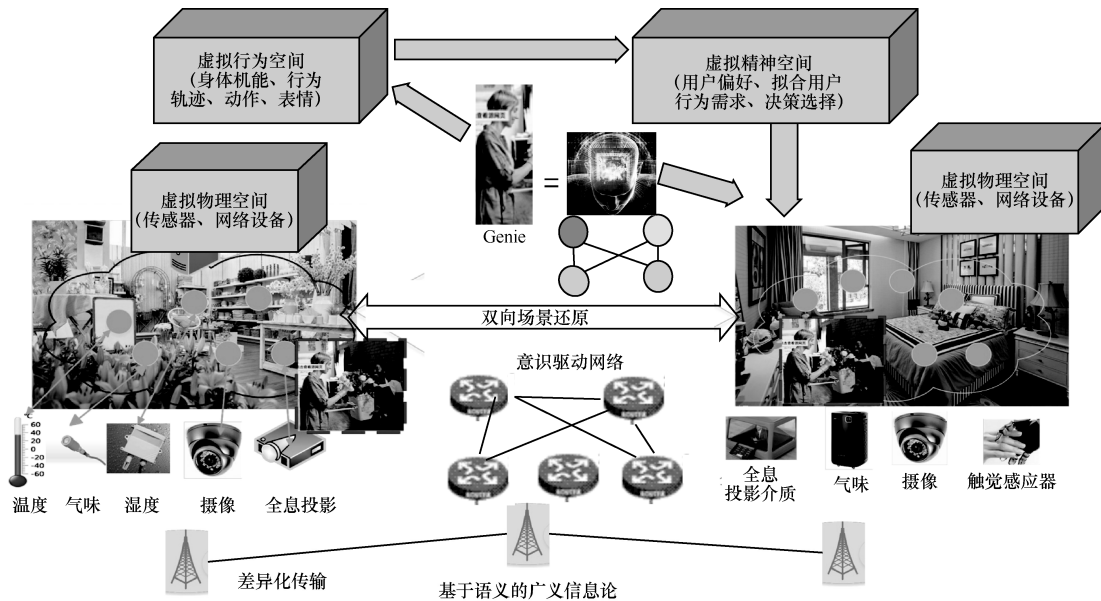


图 2 面向花店应用的 6G 人-机-物-灵协作业务场景示例

4 6G 使能技术

虚拟世界体系业务的虚实结合、实时交互等网络特点，给当前的 5G 网络带来了巨大的挑战。为支撑 6G 这些应用需求，需要从基础理论和支撑技术出发，开展广义信息论、个性化传输技术和意念驱动网络技术的研究。

4.1 广义信息论

为了支持 AI Genie 的语义感知与分析，6G 不仅要采集与传输数字信息，也要处理语义信息，这就要求必须突破经典信息论的局限^[17]，发展广义信息论^[18-20]，构建语义信息与语法信息的全面处理方案，这也是实现人机智能交互的理论基础。面向 6G 的广义信息论的研究内容包括以下 3 个方面。

1) 融合语法与语义特征的信息定量测度理论

与基于概率测度的经典信息论不同，广义信息论需要对语义信息进行主观度量，构建融合语法与语义特征的联合测度理论。首先，以模糊数学为工具^[19-20]，对 6G 移动业务的用户体验、感受评价等语义信息进行隶属度建模与测度。然后，进一步扩展经典信息量的概率度量方法，建立广义信息量的主客观联合度量模型。

2) 基于语义辨识的信息处理理论

6G 移动通信需要支持各种类型的人机物通信，通信质量与效果有显著的主观体验差异。在定量测度语义信息的基础上，针对 6G 移动通信的多源广

播业务特征，研究基于语义辨识的信息处理理论，为 6G 移动业务的数据处理提供指导。

3) 基于语义辨识的信息网络优化理论

6G 移动通信需要满足各种真实与虚拟场景的网络通信，因此，需要结合 AI 理论，研究真实与虚拟通信重叠的通信网络优化。

4.2 个性化传输技术

生物多样性是自然界的普遍规律，需求差异性也是人类社会的普适定律。1G~5G 并没有充分满足人类用户的个性化需求，6G 移动通信则需要对人的主观体验进行定量建模与分析，满足差异性需求的信息处理与传输^[21]，从而构建智能通信网络。这方面，极化编码传输、massive MIMO、基于 AI 的信号处理等技术都是有竞争力的前沿技术。

4.2.1 面向 6G 的极化码传输理论与技术

1) 面向个性化的极化码构造与优化

尽管 5G 移动通信的信道编码标准已经确定采用极化码^[22-23]，但极化码的编码构造与译码算法还存在很大的优化空间。由于极化码是基于差异化原理进行编码，非常适合未来 6G 移动通信灵活多变的业务需求，因此，需要进一步对极化码的设计构造理论展开研究^[24]，以及对高性能低复杂度编译码算法展开研究^[25-27]。

2) 极化编码 MIMO 系统的设计与优化

为了构建 VPS 空间，6G 需要支持超高速数据传输，极化编码 MIMO 系统具有显著的性能优势^[28]，

可以满足未来数据传输的需求。因此,有必要针对 MIMO 系统的 2 种典型结构——空间复用/预编码与空间调制,进行极化传输的优化方案研究。

3) 极化多址接入系统的设计与优化

多址接入是移动通信系统的标志性技术,可以预见,非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)将成为 5G/6G 移动通信的代表性多址接入技术^[29]。将极化编码引入非正交多址系统,需要深入分析 NOMA 的系统结构,从广义极化的观点出发,优化信道极化分解方案^[30]。针对 6G 移动通信业务需求,设计与优化极化编码多用户通信的构造准则。针对人-机-物-灵共存的多用户场景,设计低复杂度的广义干扰抵消多用户检测算法。

4.2.2 massive MIMO 技术

6G 将面临真实与虚拟共存的多样化通信环境,业务速率、系统容量、覆盖范围和移动速度的变化范围将进一步扩大,传输技术将面临性能、复杂度和效率的多重挑战。

针对 6G 无线信号的传输特征, massive MIMO^[31-32]包括如下内容的研究。

1) 多域信号联合调制与解调技术

Genie 的引入提供了额外的信号处理域,人类用户的业务数据与 Genie 提供的业务数据具有深层相关性。利用多维相关性,进一步挖掘空间维度,设计多域信号的联合调制与解调方案,提升链路传输效率。

2) 广义 MIMO 联合设计及优化技术

在 Genie 的辅助下,研究基于深度学习的多用户多入多出(MU-MIMO, multiple user MIMO)波束成形技术,具有通用性与普适性。Genie 可以提供准确可靠的信道估计与业务源的先验信息,基于这些信息,能够快速调整 MU-MIMO 的波束,提高链路传输效率。另外,针对 massive MIMO 接收机,Genie 也可以辅助实现基于深度学习的检测算法,优化整个接收机性能。

4.2.3 人工智能信号处理技术

6G 移动通信是多用户、多小区、多天线、多频段的复杂传输系统,信号接收与检测是高维优化问题。最优的最大似然(ML, maximum likelihood)或最大后验(MAP, maximum a posteriori)检测是指数复杂度算法,性能优越但难以普遍应用。深度学习理论另辟蹊径,通过大量离线训练,获得高性能的深度神经网络模型,从而逼近 ML/MAP 检测。

针对 6G 无线信号特征,基于深度学习的信号处理包括如下研究内容。

1) 基于深度学习的信道估计技术

Genie 为 6G 移动通信中的应用深度学习开辟了新的技术路径^[33-34]。Genie 可以在虚拟物理空间中对人类用户所经历的无线信道与传播环境进行大数据分析 with 智能预测,进一步深入研究基于卷积神经网络(CNN, convolutional neural networks)或长短期记忆网络(LSTM, long short-term memory)模型的空-时-频三维信道估计算法,从而为移动终端的接收检测提供更加准确可靠的信道估计。

2) 基于深度学习的干扰检测与抵消技术

面对未来 6G 的复杂多小区场景,干扰检测与抵消是非常重要的关键技术。在虚拟物理空间中,Genie 可以对多小区场景的各种干扰进行大数据分析 with 智能预测,从而快速准确地估计与重建干扰信号。进一步研究 CNN、LSTM 等经典神经网络模型,设计自适应的干扰抵消深度学习算法,可以大幅度提高链路接收性能。

4.3 意念驱动网络

人工智能助理的建立与发展,需要依赖于按需即用智能网络。针对 6G 移动通信的技术发展趋势,需要开展支持人-机-物-灵融合的全新 6G 网络架构、分布式边缘网络智能、认知增强与决策推演的智能定义网络等理论与核心技术的前瞻性研究。

4.3.1 面向人-机-物-灵融合的全新 6G 网络架构

研究人-机-物-灵四元空间的语义衔接、业务适配、协作编排^[35-37],构建一套面向人-机-物-灵四元空间的信息传输、边缘智能^[38-40]、协同计算等 6G 网络架构,支撑人-机-物-灵四要素跨界融合。研究终端的协同通信、协同计算、协同存储与协同供能等关键技术,支持终端对无线网络的全面协同,实现去中心化的通信、计算、存储及供能的分布式服务;研究基于网络多维可编程的人-机-物-灵融合组装方法;研究人-机-物-灵融合的状态监控、同步控制、一致性检查等网络容错机制;研究人-机-物-灵融合的四元网络协同管理技术,支持边缘智能和适配优化,实现全网资源的多级协同调度。

4.3.2 认知增强与决策推演的智能定义网络关键技术

人工智能技术通过自学习状态、特征从而不断迭代优化输出结果^[41-43],为解决复杂多变的未来 6G 网络服务提供了新的解决思路。针对当前边缘网络

缺乏自主化能力,设备异构性难以屏蔽等特征,构建以业务需求为核心的分层分域功能架构;针对未来网络环境动态复杂的特点,利用人工智能技术对网络资源分布情况与变化规律以及业务服务质量进行监控和建模分析,结合集中管控的思想,实现网络中路由、传输、缓存、资源分配等策略的自适应推演以及自动化运维^[44-49]。

4.3.3 安全可靠的网络传输技术

在全面感知 6G 移动业务需求的基础上,针对大规模、低延时的流媒体服务^[50-51],通过网络编码技术^[52-54],将流媒体内容按块转化为编码数据进行传输和缓存,在提高数据传输效率的同时,保障用户服务的隐私以及内容的安全。另外,针对高安全性的用户服务,利用人工智能和边缘计算技术,对服务内容进行特征信息提取,并将提取的特征信息回传至云计算中心,在保证用户信息安全的同时,降低 6G 回程网络压力,提高用户服务质量。

5 结束语

网络和用户的通信性能不是后 5G 网络演进的唯一目标。为了实现人类更深层次智能通信需求,6G 将实现从真实世界体系到虚拟世界体系的延拓。虚拟世界体系源于对真实世界体系的采样、传输、分析和重构。为了实现 6G,需要在信息理论、传输和组网方面实现理论和技术突破。其中,在基本信息理论方面,6G 将拓展传统信息理论,从理论上保证基于语义信息度量、压缩、传输和网络的优化;在传输关键技术方面,6G 将进一步挖掘极化相关理论,获取极化编解码、极化 MIMO、极化多址、极化中继等关键技术突破,实现差异化传输。在组网技术方面,6G 将采用人-机-物-灵的全新网络架构,满足认知增强与决策推演的智能定义网络需求,保证安全可靠的网络传输,实现意念驱动网络。

参考文献:

- [1] ZHANG P, TAO X F, ZHANG J H, et al. A vision from the future: beyond 3G TDD[J]. IEEE Communications Magazine, 2005,43(1): 38-44.
- [2] LIU G G, ZHANG J H, ZHANG P, et al. Evolution map from TD-SCDMA to FuTURE B3G TDD[J]. IEEE Communications Magazine, 2006,44(3):54-61.
- [3] QIN C, NI W, TIAN H, et al. Radio over cloud (RoC): cloud-assisted distributed beamforming for multi-class traffic[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018:1.
- [4] NIE G F, TIAN H, SENGUL C, et al. Forward and backhaul link optimization for energy efficient OFDMA small cell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 1080-1093.
- [5] FAN B, TIAN H, JIANG L, et al. A social-aware virtual MAC protocol for energy-efficient D2D communications underlying heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(9): 8372-8385.
- [6] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017,35(6):1201-1221.
- [7] LYU X C, TIAN H, JIANG L, et al. Selective offloading in mobile edge computing for the green internet of things[J]. IEEE Network, 2018,32(1):54-60.
- [8] LIU D T, WANG L F, CHEN Y, et al. User association in 5G networks: a survey and an outlook[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016,18(2):1018-1044.
- [9] LYU X C, NI W, TIAN H, et al. Optimal schedule of mobile edge computing for internet of things using partial information[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(11): 2606-2615.
- [10] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J].通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y Z, ZHANG Z. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016,37(7):15-29.
- [11] 田辉, 范绍师, 吕昕晨, 等.面向 5G 需求的移动边缘计算[J].北京邮电大学学报. 2017(2): 5-14.
TIAN H, FAN S S, LYU X C, et al. Mobile edge computing for 5G requirements[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017(2):5-14.
- [12] DAVID K., BERNDT H. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G?[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018,13(3):72-78.
- [13] GATHERER A. What will 6G be?[C]// IEEE Communication Society Technology News, 2018: 1.
- [14] 尤瓦尔·赫拉利. 未来简史[M].林俊宏,译.北京:中信出版集团, 2017: 307.
DEUS H. A brief history of tomorrow[M]. Lin Junhong, Translation. Beijing: CITIC Group press, 2017:307.
- [15] BOSTROM N. Superintelligence: paths, dangers, strategies[M]. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [16] HADDADIN S, JOHANNISMEIER L, LEDEZMA F D. Tactile robots as a central embodiment of the tactile internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2018.
- [17] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948,27(3).
- [18] 吴伟陵. 广义信息源与广义熵[J]. 北京邮电大学学报,1982,(1): 29-41.
WU W L. General information source and general information entrop-

- py[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1982, 1: 29-41.
- [19] DE LUCA A, TERMINI S. A definition of a non-probabilistic entropy in the setting of fuzzy sets[J]. Information and Control, 1972,20(4): 301-312.
- [20] DE LUCA A, TERMINI S. Entropy of L-fuzzy sets[J]. Information and Control, 1974,24(1):55-73.
- [21] RAGHAVAN V, LI J. Evolution of physical-layer communications research in the post-5G era[J]. IEEE Access, 2019.
- [22] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [23] 3GPP. Multiplexing and channel coding: 3GPP TS 38.212 V.15.1.0[S]. The 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [24] NIU K, CHEN K, LIN J R, et al. Polar codes: primary concepts and practical decoding algorithms[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 55(7):192-203.
- [25] NIU K, CHEN K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012,16(10):1668-1671.
- [26] CHEN K, NIU K, LIN J R. Improved successive cancellation decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 6(8): 3100-3107.
- [27] CHEN K, NIU K, LIN J R. An efficient design of bit-interleaved polar coded modulation[C]//IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 2013.
- [28] DAI J C, NIU K, LIN J R. Polar-coded MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018,67(7):6170-6184.
- [29] LIU Y W, QIN Z J, ELKASHLAN M., et al. Nonorthogonal multiple access for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12): 2347-2381.
- [30] DAI J C, NIU K, SI Z W, et al. Polar-coded non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(5): 1374-1389.
- [31] YANG S, HANZO L. Fifty years of MIMO detection: the road to large-scale MIMOs[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015,17(4):1941-1988.
- [32] LARSSON E G, EDFORS O, TUFVESSON F., et al. Massive MIMO for next generation wireless systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014,52(2):186-195.
- [33] WANG T, WEN C K, WANG H, et al. Deep learning for wireless physical layer: Opportunities and challenges[J]. China Communications, 2017, 14(11): 92-111.
- [34] O'SHEA T, HOYDIS J. An introduction to deep learning for the physical layer[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017,3(4):563-575.
- [35] VILALTA R, MAYORAL A, PUBILL D, et al. End-to-end SDN Orchestration of IoT services using an SDN/NFV-enabled edge node[C]//Optical Fiber Communication Conference & Exhibition. 2016.
- [36] MECHTRI M, GHRIBI C, SOUALAH O, et al. NFV orchestration framework addressing SFC challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017,55(6):16-23.
- [37] LYU X C, REN C S, NI W, et al. Multi-timescale decentralized online orchestration of software-defined network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018,36(12):2716-2730.
- [38] SHI W, CAO J, ZHANG Q, et al. Edge computing: vision and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016,3(5):637-646.
- [39] SATYANARAYANAN M. The emergence of edge computing[J]. Computer, 2017, 50(1): 30-39.
- [40] SHI W, DUSTDAR S. The promise of edge computing[J]. Computer, 2016, 49(5): 78-81.
- [41] CHEN J K, QIU X P, LIU P F, et al. Meta multi-task learning for sequence modeling[C]//The Advancement of Artificial Intelligence, 2018:5070-5077.
- [42] LI D, YANG Y X, SONG Y Z, et al. Learning to generalize: meta-learning for domain generalization[C]//The Advancement of Artificial Intelligence, 2018:3490-3497.
- [43] LI Y, ZHANG J G, ZHANG J G, et al. Discriminative learning of latent features for zero-shot recognition[EB]. arXiv:1803.06731.
- [44] CHEN L, LINGYS J, CHEN K, et al. AuTO: scaling deep reinforcement learning for datacenter-scale automatic traffic optimization[C]//SIGCOMM, 2018.
- [45] MAO H Z, NETRAVALI R., ALIZADEH M. Neural adaptive video streaming with pensieve[C]//The Special Interest Group on Data Communication, 2017.
- [46] KATO N, FADLULLAH Z M, MAO B M, et al. The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: Proposal, challenges, and future perspective[J]. IEEE wireless communications, 2017, 24(3): 146-153.
- [47] WANG M W, CUI Y, WANG X, et al. Machine learning for networking: Workflow, advances and opportunities[J]. IEEE Network, 2018, 32(2): 92-99.
- [48] GOODALL J R, RAGAN E D, STEED C A, et al. Situ: identifying and explaining suspicious behavior in networks[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2019, 25(1): 204-214.
- [49] MOHANTY S, VYAS S. IT Operations and AI in: How to compete in the age of artificial intelligence[M]. Berkeley: Apress, 2018.
- [50] FOULADI S, EMMONS J, ORBAY E, et al. Salsify: low-latency network video through tighter integration between a video codec and a transport protocol[C]//Networked Systems Design and Implementation, 2018.
- [51] MAO H Z, NETRAVALI R., ALIZADEH M. Neural adaptive video streaming with pensieve[C]//The Special Interest Group on Data Communication, 2017.
- [52] DAI Y Y, LIU D, WU F. A convolutional neural network approach for post-processing in HEVC intra coding[C]//MultiMedia Modeling. 2017.
- [53] TODERICI G, VINCENT D, JOHNSTON N, et al. Full resolution

image compression with recurrent neural networks[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017: 5435-5443.

[54] YAN N, LIU D, LI H Q, et al. A convolutional neural network approach for half-pel interpolation in video coding[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems .2017: 1-4.

[作者简介]



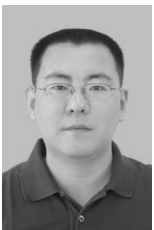
张平 (1959-)，男，陕西汉中，人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为先进移动通信系统。



聂高峰 (1988-) 男，河南周口人，博士，北京邮电大学讲师，主要研究方向为超密集网络无线资源管理、移动通信关键技术。



秦晓琦 (1988-)，女，北京人，博士，北京邮电大学讲师，主要研究方向为下一代无线网络基础理论及性能分析、智能化物联网中基于信息价值的通信、计算资源优化策略与算法设计。



牛凯 (1976-)，男，山西文水人，博士，北京邮电大学教授，主要研究方向为信息论与信道编码、智能信号处理。



戚琦 (1982-)，女，河北廊坊人，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为智能边缘计算、业务网络智能化、网络资源优化。



田辉 (1963-)，女，河南郑州人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为无线资源管理、智能边缘计算、移动社交网络。



张娇 (1986-)，女，河北保定人，博士，北京邮电大学副教授，主要研究方向为云数据中心网络、网络功能虚拟化、软件定义网络、未来网络体系架构。