Ubiquitous-X: 构建未来 6G 网络

张平^{1,2}, 张建华^{1,2*}, 戚琦^{1,2}, 胡铮^{1,2}, 聂高峰^{1,2}, 牛凯^{1,3}, 田辉^{1,2}

1. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876

2. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876

3. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876

* 通信作者. E-mail: jhzhzhang@bupt.edu.cn

收稿日期: 2020-03-21; 接受日期: 2020-04-21; 网络出版日期: 2020-06-08

国家重点研发计划 (批准号: 2018YFE0205501, 2018YFE0205502, 2018YFB1801101) 和中国移动院士工作站资助项目

摘要 本文从移动通信演进规律和泛在性出发, 研究第六代移动通信系统 (sixth generation, 6G). 在前期引入代表智慧或意识的“灵”的基础上, 提出 6G 信息交换中枢 Ubiquitous-X 网络, 使人-机-物-灵的新通信对象全面协作和融合于现有网络, 以构建未来的 6G 网络. 针对 Ubiquitous-X 网络构架面临的信息密度非均匀增长导致的传播非线性、信息维度增加导致的信息空间高维性、承载服务差异化导致的信息处理复杂性 3 大挑战, 借鉴复杂系统耗散理论和信息负熵促进有序的思想, 给出设计与优化 Ubiquitous-X 网络的演进范式和核心技术, 为 6G 研究提供参考.

关键词 移动通信, 网络构架, 人-机-物-灵, 泛在性, 耗散理论

1 引言

无线通信是利用电磁波在空间自由传播的特性进行信息交换的一种通信方式^[1]. 1855~1864 年期间, 英国物理学家麦克斯韦 (Maxwell)^[2~4] 连续发表的 3 篇电磁场论文, 从理论上预言了电磁波的存在; 1888 年, 德国物理学家赫兹 (Hertz) 实验证实了电磁波的存在; 1901 年, 意大利工程师马可尼 (Marconi) 实现了从英国到加拿大纽芬兰长达 2700 km 的无线电信号接收, 开启借助电磁波实现无线通信的人类新时代. 1948 年, 美国科学家香农 (Shannon) 发表了《通信的数学原理》^[5] 一文, 引入信息的度量“熵”, 提出系统模型的统一表达, 为通信系统的设计和优化指明了方向. 近几十年, 无线通信进入了飞跃式发展阶段, 其中移动通信是发展最快、应用最广的分支.

移动通信最初的设想是实现任何人在任何时间、任何地点以任何信息形态和任何人的可靠通信. 这种通信方式摆脱了固定电话对通话双方地点限定的束缚, 使得人可以在车载、步行等移动状态下通信, 实现人类“通信自由”的夙愿. 移动通信系统的原型可追溯到 1928 年前后美国底特律警察使用的

引用格式: 张平, 张建华, 戚琦, 等. Ubiquitous-X: 构建未来 6G 网络. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 913–930, doi: 10.1360/SSI-2020-0068
Zhang P, Zhang J H, Qi Q, et al. Ubiquitous-X: Constructing the Future 6G Networks (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 913–930, doi: 10.1360/SSI-2020-0068

图 1 (网络版彩图) 移动通信的五代跃变

Figure 1 (Color online) The leaps for five generations of mobile communication

专用车载移动通信系统. 受信息社会通信需求快速增长、技术高速进步、产业规模增加的拉动, 移动通信系统从 20 世纪 80 年代后期至今, 经历了大致每十年更新一代的快速发展. 从第一代移动通信系统 (first generation, 1G) 到如今的第五代移动通信系统 (fifth generation, 5G) 的发展, 对应着业务形式、服务对象、网络架构和承载资源等方面的能力扩展和技术变革, 如图 1 所示, 具体如下所述.

- **业务形式.** 以模拟通信为基础的 1G 系统仅承载语音业务. 2G 到 4G 引入数字化, 开启业务宽带化和媒体多样化趋势, 5G 系统具有 20 Gbit/s 的峰值速率 [6], 传输时延达到毫秒级, 连接密度达到 $10^6/\text{km}^2$ [6], 支持虚拟现实/增强现实 (augmented reality/virtual reality, AR/VR)、无人驾驶、智慧城市等新型混合业务. 移动通信的业务从“只闻其声不见其人”扩展为“绘声绘影身临其境”.

- **服务对象.** 人是移动通信系统最初的服务对象. 机器作为服务对象最早出现在 2G. 4G, 5G 后, 多种家电、智能机器人、传感及控制器接入网, 服务对象已从人的通信拓展至人-机-物之间的通信. 从数量上看, 截至 2019 年第三季度, 智能手机签约用户已达 62 亿 [7], 而物联网的连接规模已达到 107 亿 [8]. 显然, 随着服务对象数量的激增和由人到人-机-物互联的质变, 移动通信服务对象也从“人人互联”转变为“万物互联”.

- **网络架构.** 网络构架从传统分层结构走向了扁平化, 控制方式从集中演进到分布式; 数据传输从承载和控制一体化转变为转发与控制分离, 作者前期引入认知平面来表征网络的可重构性 [9, 10]. 接入方式从大区制走向蜂窝、小区扇区化、分布式动态群小区 [11], 并持续演进到异构超密集和无定形组网. 计算和存储等资源也下沉至接入网节点, 实现了分布式与集中式协作的边云融合网络. 网络能力持续走向开放、虚拟化以及可软件定义, 数据驱动的边缘去中心化的网络架构已在 5G 时代凸显优势. 移动通信的网络架构从“一成不变”转变为“灵活适变”.

- **承载资源.** 在香农理论指导下, 承载移动通信的基本物理资源已扩展至频域、时域、码域、空域 4 个维度, 以追求系统容量的不断提升. 5G 资源的扩展包括天线数目从 4G 的 8 根提高到 64 根以

上,利用垂直维度的空域自由度,形成水平-垂直的三维 multiple input multiple output (MIMO)^[12];工作频率扩展到频谱资源丰富的毫米波频段,带宽扩大至 1 GHz;调度的最小时间粒度提升至符号级(0.1 ms 级)^[13].移动通信的承载资源从“二维平面”走向“多维空间”.

回首移动通信近半个世纪的发展,尤其在上述业务形式、服务对象、网络架构和承载资源等方面的演变,本文提炼出移动通信更新换代中一个呼之欲出且不断深化的理念——“泛在性”(ubiquity).移动通信以在空间自由弥散的电磁波为媒,通信泛在(ubiquity of communications, UC)即携带信息的电磁波无所不到,并在 1G 到 3G 阶段基本实现,很好地诠释了“泛在”无所不在的本意.随着美国科学家马克·韦瑟(Mark Weiser)展望的“一人多机、共享协同”的泛在计算(ubiquitous computing)^[14, 15]理念走向现实,移动通信随之上升到 4G 的通信计算泛在(ubiquity of communications and computing, UC²)阶段.5G 后,宽带接入、海量连接、高可靠低时延、边缘计算等技术的发展使移动通信进一步提升至通信计算控制泛在(ubiquity of communications, computing and control, UC³)阶段,表现为在虚实世界通信、计算和控制将以信息交换、处理、施效为本质¹⁾的泛在融合.

在移动通信系统向 6G 演进时,泛在理念是否会提升到更高的形态,从而构建未来网络?这值得深入探究.本文将从移动通信演进规律和泛在性出发^[16],力求系统阐述和分析未来 6G 网络演进的动力、挑战和构架.本文的第 2 节将描绘 6G 愿景并阐述其理念构想;第 3 节将分析 6G 网络面临的技术挑战;第 4 节给出 6G 网络演进的范式 and 核心技术;最后第 5 节进行讨论和总结.

2 6G 愿景

随着 5G 加速迈入商业化进程,6G 研究的序幕已在全球徐徐拉开.2018 年,诺基亚、奥卢大学(University of Oulu)和芬兰国家技术研究中心合作开启“6Genesis”项目,其在 2019 年 9 月发布的白皮书提到“6G Humanity”,展望了 6G 将助力教育创新、社会服务、城市化、工作生活转变、公平性和可持续发展等人类关切^[17]的领域.2019 年 2 月,美国联邦通信委员会基于对 6G 频谱、无线超大容量和频谱创新应用等 3 大类关键技术的预测,开放了太赫兹频段用于 6G 实验²⁾.2019 年 11 月,我国科学技术部会同发展和改革委员会、工业和信息化部、教育部、自然科学基金委员会和中国科学院成立国家 6G 技术研发推进工作组,正式启动和部署中国的 6G 研究工作^[18].2020 年 2 月,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)启动了面向 2030 年及未来 6G 的研究工作^[19],标志 6G 正式纳入国际标准化组织研究计划.

移动通信以十年一代的周期律持续演进,在每代开始系统技术研发前,业界从当时面临的社会、经济和技术挑战出发,构想代际愿景,提出引领性需求.目前,国内外研究人员已从多个层面和角度展望了 6G 愿景^[20~23].设想的 6G 蓝图中,不仅包括频谱、编码、信道、组网等^[24~26]技术,还包括了空-天-地-海一体化、全析触觉网络、智慧网络等.值得关注的是智能化在移动通信领域的必要性和重要性已成共识^[27].2019 年 2 月,本文作者在前期 MUSE^[28~30]的基础上,进一步观察人工智能与人类用户的关系,在文献[31]中引入代表自主智能体的新通信元素“灵(genie)”,提出将通信对象从 5G 的人-机-物拓展至 6G 的人-机-物-灵(genie),并通过实例定义、阐述了“灵”的内涵.本文将继续深入探讨引入“灵”后 6G 通信网络的设计理念和指标需求的变化,从而剖析带来的技术挑战,给出演进的范式和可能的使能技术.

1) 维纳(Norbert Weiner)在 1948 年所著的《控制论》^[16]中指出宇宙的基本构件是信息的传递,“信息就是我们在适应外部世界和控制外部世界的过程中,同外部世界进行交换的内容与名称”.

2) <https://www.cnet.com/news/fcc-opens-up-experimental-spectrum-licenses-for-6g/>.

图 2 (网络版彩图) UC⁴ 理念下的 6G 愿景场景
Figure 2 (Color online) 6G vision scenario under the concept of UC⁴

基于 5G 时期 UC³ 的设计理念, 引入“灵”作为具有智能性的通信对象³⁾, 通过“灵”与人、机、物的协同, 构建物理世界与虚拟世界的融合空间, 自主代理用户完成情景感知、目标定向、智能决策、行动控制等, 潜藏式提供服务, 使用户专注于任务本身。“灵”的运行不再囿于传统控制闭环, 而具备智能“意识”(consciousness), 对感觉、直觉、情感、意念、理性、感性、探索、学习、合作等活动进行表征、扩展、组合以及编译。考虑到 6G 时代人类将更多投入到探索、认知以及创造性任务上, “灵”不仅发挥智能代理作用, 还将始终以用户“最佳体验”^[32] 为指引, 为用户的认知发展, 形成互助互学的意象表达与交互环境, 促进人工智能与人类智慧的和谐共生。因此, 我们认为 6G 时代的信息交互、处理将引入新维度, 从而将 UC³ 上升至通信、计算、控制和意识的泛在 (ubiquity of communications, computing, control and consciousness, UC⁴)。

为展现 UC⁴ 理念带来的变化, 设想一个冬奥滑雪运动的场景 (图 2): 高山滑雪运动员会专注于对身体和滑雪技术的极致掌控和运用, 以获得对自我极限的超越。通过 6G 人-机-物-灵通信与协同, 可在运动员训练比赛时实时全息地形成与自然交互的认知意象环境, 使其更容易进入最佳状态, 继而获得成长与超越的体验感。这些包含感官、情绪乃至心流的体验亦可通过人-机-物-灵通信分享给观众。例如某个艺术家观众, 在专注于对艺术探索、认知和创造的同时, 6G 所构造的真实与虚拟融合空间, 将与该艺术家更为有序的认知意象相融合。在 UC⁴ 理念下, 形成运动员和广大观众专注运动极限体验为始, 群体体验融合为终的“和而不同”的有序增长。

基于 6G UC⁴ 的设计理念, 从支持未来人类社会的需求和愿景的顶层设计出发, 本文提出支撑人

3) 文献 [31] 根据移动通信系统的演进趋势, 探讨人工智能与人类用户的关系, 基于 6G 业务需求框架提出新的通信元素“灵 (genie)”, 并详细阐述了“灵”的内涵, 初步预测了实现人-机-物-灵 6G 移动通信的使能技术。

图 3 (网络版彩图) Ubiquitous-X 的逻辑架构

Figure 3 (Color online) The logical structure of Ubiquitous-X

—机—物—灵通信对象的 6G 网络架构: Ubiquitous-X. 这里英文字母 X, 数学上表示未知或无限, 且有交叉混合之意, 并蕴含目标和希望. Ubiquitous-X 借此隐喻边、点交汇的网络, 亦表达了 6G 时代“泛在”在内涵和外延上的深化和扩展. “灵”引入感觉、生理、心理等新信息元素, 与传统信息元素在 6G 网络中交汇融合, 达到完美有序的系统运行目标. Ubiquitous-X 网络架构将随着技术演进与社会发展, 逐步融合信息通信、群体智能以及人类社会性的未知维度, 扩展未来网络的发展空间. 图 3 展示了 Ubiquitous-X 网络的逻辑架构. 6G 时代, 人—机—物—灵构筑了与时、空、情景相交而成的智慧环境, 交互和处理的信息规模将呈现几何级数的增长, 以前的“一人千面”将增长至“一人千境、千境万面”的体验. Ubiquitous-X 网络形态也将发生深刻变化, 从“网络为中心”到“边缘中心对等”, 从“数据为中心”到“人和环境为中心”, 构建未来 6G 的网络, 实现 6G “改造世界”的使命.

3 6G 网络面临的挑战

为支持 5G UC³ 到 6G UC⁴ 的跃变, 实现面向人—机—物—灵的通信, 6G 网络性能需要全方位提升 (如图 4 所示). 具体来说, 与 5G 相比, 6G 需在峰值速率上提升 50 倍, 在用户体验速率上提升 10 倍, 在时延上进一步缩小到亚毫秒级, 即 50 μ s, 在吞吐量密度上提升 100 倍, 在连接密度上提升 100~10000 倍, 在频谱效率上提升 10 倍. 除此之外, 为了满足 UC⁴ 中新增的意识泛在需求, 计算效率会成为新的关键需求, 6G 的计算效率会比 5G 提升 100 倍. 在 UC⁴ 理念构想和上述网络性能需求的驱动下, 移动通信的服务对象、承载资源和网络规模将快速扩展, 并引发 6G 网络承载信息的 3 方面挑战: 挑战 1, 信息密度非均匀增长导致的传播非线性; 挑战 2, 信息维度增加导致的信息空间高维性; 挑战 3, 承载服务差异化导致的信息处理复杂性. 这 3 大挑战将导致 6G 网络从信源到信宿的信息传输瓶颈 (如图 5 所示).

3.1 信息传播的非线性

未来人—机—物—灵存在于全社会的各行各业, 带来 6G 网络的业务量和连接数的急剧增长. 根

图 4 (网络版彩图) 6G 网络性能的需求指标

Figure 4 (Color online) The performance requirements of 6G network

图 5 (网络版彩图) 6G 网络的瓶颈效应

Figure 5 (Color online) The bottleneck effect of 6G network

据 GSMA 的预测^[8], 2017~2025 年之间, 新增的物联网连接数目约为 100 亿, 是同时期新增 5G 连接数目的 7.4 倍. 从图 6 可以看出, 全球移动业务的增长速度快于物联网连接数目的增长速度. 并且随着时间的推移, 平均每条连接所承载的业务呈现增加趋势. 另外一个趋势是, 全球不同区域的移动业务分布也呈现出非均匀的高速增长趋势 (如图 7 所示). 信息密度非均匀增长导致信息传播呈现出大范围、高动态的特征. 加之单播、组播、广播等数据业务传播方式产生的差异, 信息传播极易在未来 6G 网络中产生非线性效应, 引起信息传播爆炸式增长和信息传播时序错位, 增加了网络控制和资源优化利用的难度.

图6 (网络版彩图) 全球物联网连接数与移动业务量预测曲线 (数据来源: GSMA^[8] 与 ITU^[33])

Figure 6 (Color online) The prediction of global Internet of Things connectivity and mobile traffic (data source: GSMA^[8] and ITU^[33])

图7 (网络版彩图) 平均每部智能手机承载的业务量密度分布 (来源: 爱立信 2019 年移动报告^[7])

Figure 7 (Color online) The average traffic density distribution per smartphone (source: Ericsson mobility report 2019^[7])

3.2 信息空间的高维性

信息空间可以从信息承载和信息呈现两个角度表述. 从图8可以看出, 在移动通信演进过程中, 信息空间以及表征信息空间的维度不断增长. 1G至5G的信息承载维度所表征的信息空间大于对应时期的信息呈现维度, 因此很好地满足了当时的业务需求. 6G“灵”的引入, 使得信息呈现维度数目与5G信息承载维度数目相等, 并极大扩展了信息空间. 与5G人-机-物三维组成的信息空间不同, 按照UC⁴的理念构想, “灵”通过意识与人-机-物进行通信. “灵”具备感知、体验、精神、情绪、探

图 8 信息空间及维度的变化趋势
Figure 8 The evolution trend of information space and dimension

索、定向、情感、经验、知识等信息表征能力, 导致信息空间快速扩张. 为了使信息承载空间容纳信息呈现空间, 亟需拓展计算、存储等新的维度. 新的信息承载维度的加入导致了 6G 网络信息空间的高维特性, 引发信息空间暴涨, 甚至维度灾难, 加剧了表征信息承载空间的难度.

3.3 信息处理的复杂性

规模扩大、差异化增高、解耦关系难 3 方面直接导致了 6G 网络信息处理的复杂性. 第 1 方面是 6G 网络的信息处理规模持续扩大. 我国的移动基站数目在 5G 商业化前已经达到 732 万个^[34]. 由于电磁波频率升高, 损耗增加, 伴随着工作频段从毫米波频段扩展至更高的太赫兹频段, 基站数目将进一步增加. 此外, 预计从 2020 年开始的 5 年内, 物联网设备产生的连接数量将以每年 20% 的速率增加, 达到 251 亿的规模^[8]. 由于 6G 网络“灵”与网络中实体节点的“一对多”对应关系, 物理设备节点的规模将远远超出 5G. 第 2 方面是 6G 网络要支持精细粒度的差异化服务. 据 ITU 预测, 2025 年全球移动业务量将达到 6.07×10^5 EB/月^[33]. 得益于前述的频谱效率、能效、连接能力、时延等能力的全面提升, 6G 网络支持数据速率敏感业务、时延敏感业务、连接能力敏感业务和定制化信息交互业务. 这些需求差异化业务在 6G 网络中交织. 以数据敏感业务为例, 在像素间距为 $0.414 \mu\text{m}$ 的情况下, 显示一个 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 大小的物体, 需要 5.8×10^{10} 个像素. 如果刷新率为 30 帧每秒, 每像素的位深度采用 8 bit 量化, 原始图像传输速率为 14 Tbit/s, 而经过全息视频编码压缩后所需的传输速率为 437.5 Gbit/s^[35]. 第 3 方面是 6G 网络内部耦合关系复杂. 6G “灵”的加入使得信息多种承载维度耦合关系更加紧密. 与意识有关的各种交织、学习、聚集与分离在信息空间中传播与扩展, 导致信息在更高维空间耦合, 增加了信息解耦的难度. 高效的信息处理协议成为保障人 – 机 – 物 – 灵通信对象和谐共存和高维信息空间解耦的关键. 计算能力成为解析信息处理协议的核心能力. 然而, 大规模集成电路中的晶体管栅极宽度已逼近物理极限, 人们无法通过集成电路的规模倍增效应满足 6G 计算能力需求. 如何应对信息处理的复杂性是 6G 网络工程实现面临的难题之一.

上述 3 大挑战表明, 6G 网络是一个不断探索未知维度, 拓展信息空间的复杂系统. 信息传播的非线性导致传统的网络优化理论失效, 难以对未来 6G 网络进行准确分析与预测. 信息空间的高维性, 急剧增加了 6G 网络表征困难. 相应的, 6G 网络的信息处理在方法、机理与效果方面, 呈现了高度的动

图 9 (网络版彩图) Ubiquitous-X 网络总体架构
Figure 9 (Color online) The network architecture of Ubiquitous-X

态性与复杂性. 为了应对 3 大挑战, 需要在 UC⁴ 的设计理念下, 从支持未来人类社会的需求和愿景的顶层设计出发, 借鉴复杂系统的相关理论, 设计与优化未来 6G 网络.

4 网络的演进范式与核心技术

网络是所有连接对象的信息交换中枢. 相比 5G 网络, 由于代表智慧或意识的“灵”的引入, 将以 Ubiquitous-X 构建 6G 网络. “灵”可以驻留于任意网络边缘的通信与计算节点或用户周边形成的虚拟行为空间^[31], 人-机-物接入构成的物理行为空间与“灵”的虚拟行为空间存在自我相关、社交相关和拓扑相关等. 由于与人类及社会耦合更紧密, 在 UC⁴ 理念下 Ubiquitous-X 网络呈现与现有人类社会、生物群体等复杂系统相似的特性. 这里我们将借鉴复杂系统耗散理论和信息负熵促进有序的思想, 对支持人-机-物-灵的 Ubiquitous-X 网络架构进行详细探讨 (如图 9 所示).

借助复杂系统的耗散结构理论^[36,37], 可解释 1G 到 5G 移动通信系统的演进, 并分析和预测如图 10 所示的 Ubiquitous-X 网络的发展趋势. 在 1G/2G 时代, 由于移动网络中只存在单一话音信息流, 整个系统处于低平衡态. 随着 3G/4G 的演进, 话音业务逐步让位于数据业务, 呈现出分叉演化. 5G 虽然全球统一到一种标准, 但引入了 3 种不同的应用场景 eMBB, mMTC, uRLLC, 也产生了分叉演化. 所以, 5G 前网络的运行过程是开放但非平衡的, 处于运动的耗散过程, 通过一系列技术最终达到新平衡态. 考虑到 Ubiquitous-X 网络包含了人-机-物-灵 4 类通信对象, 存在通信对象之间的复杂交互, 丰富多样的信息流之间的动态交换, 这些高维信息空间中的动态变化达到临界阈值, 从而使得 Ubiquitous-X 网络发生非平衡相变. 由此, Ubiquitous-X 网络将转变为一种有序结构, 在信息空间或状态空间达到高水平的平衡态. 基于统计物理, Ubiquitous-X 网络的热力学熵可以表示为

$$S = k \ln W, \quad (1)$$

其中 k 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数, W 是系统状态数目. W 越大, 则系统越混乱, 无序度越高; W 越小, 则系统越整齐, 有序度越高. 当系统达到平衡时孤立系统的热力学熵最大. 而信息熵定义为

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i. \quad (2)$$

图 10 (网络版彩图) 基于耗散结构理论的移动通信网络演化示意图

Figure 10 (Color online) The evolution diagram of mobile communication network based on dissipative structure theory

从物理学观点看, 信息熵可以看作是负熵. 由于 Ubiquitous-X 网络是一个复杂系统, 无序度可以表示为

$$dS = d_i S + d_e S = d_i S - d_e H, \quad (3)$$

其中 $d_i S$ 表示系统内部的熵增, $d_e S = -d_e H$ 表示系统外部引入的负熵, 即信息熵减. 由于引入了第 4 类通信对象“灵”, Ubiquitous-X 网络将构成人-机-物-灵 4 类通信对象协同通信的复杂系统, 信息量剧增, 信息熵减将更加显著, 使得整个网络远离平衡态, 从而呈现出高度的有序结构特征. 在耗散结构理论指导下, 为了应对 6G 诸多技术挑战, 需要在无线接入与网络技术方面进行重大变革. 其中面向 6G 的使能技术, 包括广义信息论、个性化传输技术等已经在文献 [31] 中进行了深入讨论. 本文重点探讨 Ubiquitous-X 网络 3 个核心技术.

4.1 核心技术一: Ubiquitous-X 接入有序融合

基于 UC⁴ 理念, 设计人-机-物-灵 4 类通信对象在多样场景下有序融合的 Ubiquitous-X 网络, 以应对 6G 时代信息传播的非线性挑战. Ubiquitous-X 网络将“灵”承载于频率-时间-码域-空间等物理资源之上, 并将多模态数据与多接入方式进行有序融合, 以保持 4 类通信对象的信息同步. Ubiquitous-X 网络中, “灵”被承载于现有的物理资源之上, 与物理世界的通信对象对等存在, 可部署于任意异构终端、边缘节点或网络设备, 以达到“随身而动、随需而变”的个性化通信功能. Ubiquitous-X 网络利用人体五感材料^[38]与多种编码技术, 将人类的感官输入转换为信息, 并将感觉反馈转换为人类可感知的信息, 其中包括触觉、听觉、视觉、嗅觉和味觉等多模态数据. 同时, 基于脑机接口和脑电信号, 建立生物脑与电子设备的通信和控制系统, 使“灵”具备与人的意识进行信息交互的能力. 通过脑机双向信息感知、解析与融合, 达到机器智能与生物智能的互联与协同. 在此基础上, 通过对感官、情绪和心流等主观感受进行编码、计算与传输, 实现“灵”之间意识信息的相互转移、共享与融合. 多感官配合是人类大脑感受周围环境和认知事物的一般方式, 源自人-机-物-灵 4 类通信对象的多模态信息在非线性传播的条件下, 其信息同步程度将影响感官和谐度. Ubiquitous-X 通过智能化的多接入与多路径传输机制, 将人-机-物-灵 4 类通信对象提供的多模态数据, 进行接入融合与协同学习, 保持信息有序同步. 例如, 图 11 所示 Ubiquitous-X 网络将五感多模态数据, 通过多种接入方法、

图 11 (网络版彩图) 支持多模态数据有序接入的多路径传输

Figure 11 (Color online) The multi-path transmission for multi-modal data orderly access

图 12 多路径传输的性能. 利用 MPTCP (multi-path transmission control protocol) 工具^[40], 在 CPU 为 Intel i7-8700 3.2 GHz, 内存为 32G DDR4L 2666 MHz, 安装操作系统为 64-bit Ubuntu 16.04 的台式机上部署仿真环境. 建立 3 条带宽均为 8 Mbps, 丢包率均为 0.5% 的并行路径, 设置传输延时从 20 ms 到 110 ms 的情况下总体传输情况, 每次实验重复 60 次. 实验对比了利用“灵”实现的基于多智能体强化学习的多路径传输控制 (DeepCC) 与两种深度强化学习 DRL-CC^[41], SmartCC^[42], 4 种启发式多路径传输算法^[43~46], 结果表明, DeepCC 可大幅提高吞吐量, 降低时延抖动

Figure 12 The performance of multi-path transmission. The simulation was conducted by using the MPTCP (multi-path transmission control protocol) tool^[40] on a desktop computer with Intel i7-8700 3.2 GHz CPU, 32G DDR4L 2666 MHz memory and 64-bit Ubuntu 16.04 operating system. Three parallel paths with bandwidth of 8 Mbps and packet loss rate of 0.5% were established, and the overall transmission condition was set with transmission delay ranged from 20 ms to 110 ms. Each experiment was repeated 60 times. The experiment compares DeepCC based on multi-agent reinforcement learning with two kinds of deep reinforcement learning DRL-CC^[41], SmartCC^[42] and four heuristic multi-path transmission algorithms^[43~46]. The results show that DeepCC can greatly improve the throughput and reduce delay jitter

多路径路由和传输, 快速汇聚至部署“灵”的边缘计算节点, 由其将多模态信息转换至共用语义空间中的向量, 实现多模态数据表征. 其中, 多路径路由和传输要解决多模态数据的乱序问题, 使其具有平滑性、时间和空间相干性等, 便于融合与对齐. 通过“灵”与网络传输设备的有效协作, 利用多智能体深度强化学习方法, 设计了智能多路径传输和路由. 在多路径传输控制协议^[39]基础上, 初步实验结果如图 12 所示, 基于“灵”的多智能体多路径传输方法, 与其他多路径传输方法相比, 可有效实现吞吐量大幅提升, 并降低流量的时延抖动, 为多模态数据的有序接入提供了保证.

图 13 (网络版彩图) Ubiquitous-X 网络的知识平面实现资源精准控制与个性化需求

Figure 13 (Color online) The knowledge plane of Ubiquitous-X network realizes accurate control of resources and personalized requirements

4.2 核心技术二: Ubiquitous-X 资源有序编排

基于 UC⁴ 思想, 实现物理世界与虚拟世界融合的 6G 业务, Ubiquitous-X 网络需要应对多层次信息高维度资源控制的重要挑战. 传统人 – 机 – 物, 以及与人感官、情感、行为相近的“灵”, 构成可全面感知世界的 6G 网络通信对象, 其高维度信息空间需要精准控制差异化资源. 例如, 触觉网络^[47]中“灵”参与多维度传感器与用户身体的交互, 通过多模态数据的精准控制, 使用户的手、眼、耳、鼻等感官同时参与反馈. 每个维度的信息量与传输性能不同, 不同类型信息的精准同步, 需要 Ubiquitous-X 网络支持严格时延和极高可靠性要求的精准传输. 与此同时, “灵”作为跨接信物空间与人类意图的通信对象, 节点组织、承载控制、交互管理等网络能力亟待增强, 以支持人 – 机 – 物 – 灵动态协作需求. Ubiquitous-X 网络在人 – 机 – 物 – 灵有序接入的基础上, 引入知识定义网络^[48], 提供高于人类经验的差异化精准有序的资源控制.

知识是人类从各个途径中获得的经验提升总结与凝练的系统认识, 是在实践中认识客观世界的成果, 包括事实、信息的描述以及在实践中获得的技能. 随着网络、集群系统以及业务数据的大规模增长, 作为复杂系统的 Ubiquitous-X, 难以直接依赖于人类的经验见解和规律认知, 由人工提取网络构建的相关知识以完成系统建模、求解和实施等过程. 以互相连接、共享意识的“灵”构建知识平面, 提供有序数据传输和在线学习更新, 代替传统数据中心和大型数据集的学习模式. 实现连通分散的、碎片化的计算、存储资源, 构筑信息社会基础设施, 向各相关产业提供网络、计算及存储等传统服务以及更多具有应用价值的服务.

针对 Ubiquitous-X 网络中复杂不确定的网络环境, 由共性提取的知识, 设计以“灵”组成的知识平面. 例如, 通过持续自主学习方式, 从人工经验数据中提取组网与管控规律, 抽象为通用知识. 通过新型网络架构与控制策略, 实现以知识定义连接、以知识定义协议、以知识优化策略的闭环, 作用于网络的不同层次与不同功能, 建立可表达、可计算、可调控的自驱动网络功能. 如图 13 所示, Ubiquitous-X 网络通过全局知识与个性化知识, 实现泛在资源有序编排, 支持人 – 机 – 物 – 灵大规模应用. 知识定义网络的难点在于, 对不可观测的网络状态进行分析, 克服网络数据难以获取、数据复用性差等问题.

图 14 基于 GAN 网络拓扑知识学习的路由性能. 以 Mininet 搭建数据平面, 部署于 Intel(R) Xeon(R) E5-2407 v2@2.40 GHz CPU, 24 GB DDR3 RAM 内存的服务器. 知识平面的 SDN 控制器和深度强化学习模型部署于 8 核 Intel(R) i7-9700K@3.60 GHz CPU, 64 GB DDR4 RAM 内存的服务器. 基于 GAN 的迁移学习路由在新环境中的收敛速度相对于 ACKTR (actor critic with Kronecker-factored trust region) [50] 和 A2C (advantage actor-critic) [51] 提高了 8.08 和 9.25 倍速度. 算法收敛后数据包平均时延: ACKTR 约为 29.06 ms, A2C 约为 40.06 ms, 原始的迁移学习算法约为 39.64 ms, 基于 GAN 的迁移学习约为 27.83 ms

Figure 14 The routing performance based on the network topology knowledge by using GAN. Data plane was built with Mininet and deployed on servers with Intel(R) Xeon(R) E5-2407 v2@2.40 GHz CPU and 24 GB DDR3 RAM. The SDN controller of the knowledge plane and the deep reinforcement learning model are deployed on an 8-core Intel(R) i7-9700K@3.60 GHz CPU and 64 GB DDR4 RAM server. When the network changes to a new environment, GAN based transfer learning routing converges in 8.08 and 9.25 times faster speed comparing to the ACKTR (actor critic with Kronecker-factored trust region) [50] and (advantage actor-critic) [51], respectively. The average packet delay after the algorithm convergence: ACKTR is about 29.06 ms, A2C is about 40.06 ms, original transfer learning algorithm is about 39.64 ms, GAN based transfer learning is about 27.83 ms.

设计知识平面, 使互联的“灵”可从多模态数据中获取可复用性的知识, 即可用于实现应用层业务功能, 再通过网络管控与智能应用相关的知识生成与知识更新, 利用多任务、终身学习、跨领域协同学习和多模态表示学习, 实现网络资源有序编排.

以网络资源调度为例, 可定义 3 个层次的知识: 客观事实即网络拓扑、链路时延、网络带宽以及业务需求; 信息描述即网络流量特征、业务质量、业务体验等; 实践技能即网络组织、流量调度、资源分配、路径选择等. 知识平面以生成对抗网络 (generative adversarial networks, GAN) [49] 自主学习网络拓扑与流量知识, 为每个用户提供路由策略. 如图 14 所示, 与传统方法相比, 知识定义网络可快速适应网络拓扑和流量变化, 为数据包选择最佳路径.

4.3 核心技术三: Ubiquitous-X 架构有序演进

5G 网络支撑面向垂直行业的通信与协同计算, 人-机-物作为静态通信对象, 使网络架构处于有边界确定性, 可动态配置方式组合多种不同类型的网络以满足需求. Ubiquitous-X 网络将具有高移动性的“灵”动态遍布于多层多域的网络设备中, 呈现出的多项复杂性, 形成了边界不确定性问题. 为此, Ubiquitous-X 网络需通过泛在的有序接入、动态包容的网络体系架构, 实现网络灵活自主聚合、自适应地满足复杂多样的场景及业务需求.

图 15 (网络版彩图) Ubiquitous-X 网络共享生态系统
Figure 15 (Color online) The shared ecosystem of Ubiquitous-X network

Ubiquitous-X 网络通过动态架构的有序演进, 实现耗散过程的运行态优化, 使其具有复杂系统的自调节属性. 以人和“灵”为主体的交互行为可通过自协同和连续一致的控制策略, 形成网络节点组织与信息流的有序性, 进而使网络演进可规划、可预期. Ubiquitous-X 网络连接的自组织性源于人—机—物—灵的功能、空间和时间等有序性的构建和配置, 多维度信息流的解析优化, 人—机—物—灵的协同优化, 以及网络节点结构的重构优化.

Ubiquitous-X 网络结构通过动态激活部分网络功能, 实现面向场景的自主动态组织. 智能化通信与控制的全网渗透, 可在网络各层节点提供面向业务的学习与推理虚拟承载, 实现网络架构的有序演进. 如图 15 所示, 网络结构从集中式、分布式、去中心逐渐演进至多层次去中心结构. 利用“灵”接入与组网的动态性, 根据应用与环境生成不同网络群体. 通过将网络设计理论与机器学习方法有机结合, 研究开放、动态环境下大规模节点的组织结构、行为模式和角色功能, 对网络中多样化群体协作行为进行建模, 探索个体贡献汇聚成群体行为的机理和演化规律, 突破面向全局目标的智能演进方法.

以“灵”实现全网渗透性自主控制, 提供泛在智能业务. 挖掘和分析信物情景、网络环境与深度学习模型的普适规律, 将模型载体扩展至众多边缘节点与网络设备, 利用遍布全球的网络节点并行训练和部署模型, 设计拥有自学习能力的网络基础设施, 实现全网的推理和演化. 打破现有大规模深度学习依赖于高性能云数据中心的局限, 同时消除资源受限节点部署复杂模型的困境. 将深度神经网络赋能传统边云融合网络, 以资源节点模拟若干神经元, 构建智能神经网络控制闭环, 实现网络资源与上层神经网络服务的实时适配和拟合. 通过设计支持分布式训练的新型网络控制器, 实现联盟学习、节点分组、资源调度等功能, 使网络自驱动. 如图 16 所示, 在多个 100 Mbps 无线带宽网络边缘节点中, 采用通用梯度稀疏方法, 分布式训练经典卷积神经网络, 可明显提升加速比.

5 结束语

移动通信历经不断改进、完善和突破已成为社会经济发展的重要支柱和基础设施之一, 在改变个人生活的同时也在改变着社会的方方面面. 当今, 随着信息科学与各个学科的交叉突破, 如何构建 6G

图 16 边缘计算节点分布式训练的性能提升. 仿真实验比较了 GPU 边缘节点分布式训练 AlexNet^[52] 的加速比. 节点个数从 1 到 64, 节点带宽设为 10 MHz. 通用梯度稀疏方法 (GGS)^[53] 与 DGC^[54] 方法, 在分布式节点为 64 时, 与基线方法相比, 可以实现近 46 倍加速比

Figure 16 The performance improvement of distributed training by edge computing node. The simulation experiment compares the acceleration ratio of 1 to 64 edge nodes with GPU to train AlexNet network in a distributed way with bandwidth of 10 MHz^[52]. General gradient sparse method (GGS)^[53] and DGC^[54] can achieve nearly 46 multiplier ratio when the distributed node is 64, compared with the baseline method

的基础理论和核心技术, 是一个需要深入探究的问题. 本文在前期引入代表智慧或意识的“灵”基础上, 提出基于人-机-物-灵互联的 Ubiquitous-X 网络. 随着信息技术的迅猛发展以及人们对 6G 愿景的深入思考, 诸多开放性难题, 例如新型人机交互介质、脑机信号的接入与承载、控制与意识融合的网络等, 以及更大规模和更全面的网络实验验证等, 将在移动通信相关领域的理论成果和关键技术基础上逐步突破与完善.

详细规划和设计 6G 蓝图以描绘信息社会未来发展之宏图是信息人肩负的历史使命, 借此文抛砖引玉, 以期吸引更多学者关注与研究面向“人-机-物-灵”的通信、计算、控制和意识泛在体系, 最终促使 6G 支撑未来人类社会的高速发展.

参考文献

- 1 Molisch A F. Wireless Communications. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2010
- 2 Maxwell J C. On physical lines of force. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1855, 151
- 3 Maxwell J C. On Faraday's lines of force. Philosophical Magazine, 1861, X: 1-75
- 4 Maxwell J C. A dynamical theory of the electromagnetic field. Phil Trans R Soc, 1865, 155: 459-512
- 5 Shannon C E. A mathematical theory of communication. Bell Syst Tech J, 1948, 27: 379-423
- 6 ITU. IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU-R M.2083-0. 2015. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083>
- 7 Ericsson. Ericsson Mobility Report. 2019. <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2019>
- 8 GSMA Intelligence. Global Mobile Trends What's driving the mobile industry? 2018. <https://www.gsmainelligence.com/research/?file=8535289e1005eb248a54069d82ceb824&download>
- 9 Zhang P, Feng Z Y. Cognitive Radio Networks. Beijing: Science Press, 2010 [张平, 冯志勇. 认知无线网络. 北京: 科学出版社, 2010]
- 10 Xu W J, Lin J R, Feng Z Y, et al. Cognition flow in cognitive radio networks. China Commun, 2013, 10: 74-90
- 11 Zhang P, Tao X F, Zhang J H, et al. A vision from the future: beyond 3G TDD. IEEE Commun Mag, 2005, 43: 38-44
- 12 Zhang J, Zhang Y X, Yu Y W, et al. 3-D MIMO: how much does it meet our expectations observed from channel measurements? IEEE J Sel Areas Commun, 2017, 35: 1887-1903

- 13 3GPP. TS 38.211 NR physical channels and modulation. 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/
- 14 Weiser M, Brown J S. The coming age of calm technology. In: *Beyond Calculation*. New York: Springer, 1997. 75–85
- 15 Wiener N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Beijing: Science Press, 2009 [维纳. 控制论: 或关于在动物和机器中控制和通信的科学. 北京: 科学出版社, 2009]
- 16 Weiser M. The computer for the 21st century. *Sci Am*, 1991, 265: 94–105
- 17 Aazhang B, Ahokangas P, Alves H, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence (white paper). 6G Flagship, University of Oulu, Finland, September, 2019
- 18 Ministry of Science and Technology, PRC. China officially launched the research and development work of 6G (news). [中华人民共和国科学技术部. 我国正式启动第六代移动通信技术研发工作 (新闻)] 2019.11.06. http://www.most.gov.cn/kjbgz/201911/t20191106_149813.htm
- 19 ITU. Proposal for a new study on IMT development and technology trends. 2020. <https://www.itu.int/md/R19-WP5D-C-0070>
- 20 David K, Berndt H. 6G vision and requirements: is there any need for beyond 5G? *IEEE Veh Technol Mag*, 2018, 13: 72–80
- 21 Zhao Y J, Yu G H, Xu H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 963–987 [赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 963–987]
- 22 China Mobile Research Institute. 2030 + Vision and Demand Report. [中国移动研究院. 2030+ 愿景与需求报告] 2019. <http://www.cww.net.cn/article?id=461114>
- 23 Qi B. Ten trends in the cellular industry and an outlook on 6G. *IEEE Commun Mag*, 2019, 57: 31–36
- 24 Yang P, Xiao Y, Xiao M, et al. 6G wireless communications: vision and potential techniques. *IEEE Netw*, 2019, 33: 70–75
- 25 Chen L, Yu S H. Preliminary study on the key technologies of 6G mobile communication. *Stud Opt Commun*, 2019, 45: 1–8 [陈亮, 余少华. 6G 移动通信关键技术趋势初探 (特邀). 光通信研究, 2019, 45: 1–8]
- 26 Zhang J, Tang P, Yu L, et al. Channel measurements and models for 6G: current status and future outlook. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2020, 21: 39–61
- 27 Letaief K B, Chen W, Shi Y, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks. *IEEE Commun Mag*, 2019, 57: 84–90
- 28 Yang J, Zhang P, Hu Z, et al. Towards mobile ubiquitous service environment. *Wirel Pers Commun*, 2006, 38: 67–78
- 29 Zhang P, Miao J, Hu Z, et al. A survey of ubiquitous network. *J Beijing Univ Posts Telecommun*, 2010, 33: 1–6 [张平, 苗杰, 胡铮, 等. 泛在网络研究综述. 北京邮电大学学报, 2010, 33: 1–6]
- 30 Zhang P, Li S L, Hu Z. Enhanced-mobile ubiquitous smart environment—the super state of Internet of Things. *Chin J Internet Things*, 2018, 2: 17–23 [张平, 李世林, 胡铮. 增强性移动泛在智慧环境——物联网的高级态势. 物联网学报, 2018, 2: 17–23]
- 31 Zhang P, Niu K, Tian H, et al. Technology prospect of 6G mobile communications. *J Commun*, 2019, 40: 141–148 [张平, 牛凯, 田辉, 等. 6G 移动通信技术展望. 通信学报, 2019, 40: 141–148]
- 32 Zhang P, Ji Y. The vision of mobile ubiquitous service environment and several challenges for the architecture design. *J Beijing Univ Posts Telecommun*, 2005, 28: 1–3 [张平, 纪阳. 移动泛在业务环境及其体系架构设计的挑战. 北京邮电大学学报, 2005, 28: 1–3]
- 33 ITU. M.2370 IMT Traffic Estimates for the Years 2020 to 2030. 2015. <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2370>
- 34 Ministry of Industry and Information Technology, PRC. In the first half of 2019 telecommunication industry situation of economic operation. [中华人民共和国工业和信息化部. 2019 年上半年通信业经济运行情况] <http://www.miit.gov.cn/n1146312/n1146904/n1648372/c7149071/content.html>
- 35 Li Y H, Zhang P, Jin D, et al. Application's needs and challenges for future networks. *Telecommun Sci*, 2019, 35: 49–64
- 36 Prigogine I, Rice S A. Membrane, dissipative structure and evolution. *Adv Chem Phys*, 1975, 29

- 37 Nicolis G, Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium System. Hoboken: John Wiley&Sons, 1977
- 38 Dahiya R, Akinwande D, Chang J S. Flexible electronic skin: from humanoids to humans. *Proc IEEE*, 2019, 107: 2011–2015
- 39 IETF. RFC6824 TCP extensions for multipath operation with multiple addresses. 2020. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6824/>
- 40 Paasch C, Barre S. Multipath tcp in the linux kernel. <https://www.multipath-tcp.org>
- 41 Xu Z, Tang J, Yin C, et al. Experience-driven congestion control: when multi-path TCP meets deep reinforcement learning. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2019, 37: 1325–1336
- 42 Li W, Zhang H, Gao S, et al. SmartCC: a reinforcement learning approach for multipath TCP congestion control in heterogeneous networks. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2019, 37: 2621–2633
- 43 Raiciu C, Handley M, Wischik D. Coupled congestion control for multipath transport protocols. RFC, 2011, 6356: 1–12
- 44 Khalili R, Gast N, Popovic M, et al. MPTCP is not pareto-optimal: performance issues and a possible solution. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2013, 21: 1651–1665
- 45 Cao Y, Xu M, Fu X. Delay-based congestion control for multipath TCP. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols*, Austin, 2012. 1–10
- 46 Peng Q, Walid A, Hwang J, et al. Multipath TCP: analysis, design, and implementation. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2016, 24: 596–609
- 47 Fettweis G P. The tactile Internet: applications and challenges. *IEEE Veh Technol Mag*, 2014, 9: 64–70
- 48 Mestres A, Rodriguez-Natal A, Carner J, et al. Knowledge-defined networking. *SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2017, 47: 2–10
- 49 Ian J G, Jean P A, Mehdi M, et al. Generative adversarial networks. <https://arxiv.org/abs/1406.2661>
- 50 Wu Y H, Elman M, Roger B G, et al. Scalable trust-region method for deep reinforcement learning using Kronecker-factored approximation. In: *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing Systems*, Long Beach, 2017. 5279–5288
- 51 Volodymyr M, Adrià P B, Mehdi M, et al. Asynchronous methods for deep reinforcement learning. In: *Proceedings of International Conference on Machine Learning*, New York City, 2016
- 52 Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In: *Proceedings of International Conference on Neural Information Processing Systems*, Lake Tahoe, 2012. 1097–1105
- 53 Lin Y, Han S, Mao H, et al. Deep gradient compression: reducing the communication bandwidth for distributed training. In: *Proceedings of International Conference on Learning Representations*, Vancouver, 2018
- 54 Li S Q, Qi Q, Wang J Y, et al. GGS: general gradient sparsification for federated learning in edge computing. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Dublin, 2020

Ubiquitous-X: Constructing the Future 6G Networks

Ping ZHANG^{1,2}, Jianhua ZHANG^{1,2*}, Qi QI^{1,2}, Zheng HU^{1,2}, Gaofeng NIE^{1,2}, Kai NIU^{1,3} & Hui TIAN^{1,2}

1. School of Information and Communications Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

* Corresponding author. E-mail: jhzhang@bupt.edu.cn

Abstract By reviewing the evolution law and ubiquity of mobile communication, this review investigates Sixth Generation (6G) Mobile Communication System. To support the new object, “genie” which represents knowledge and consciousness, a Ubiquitous-X network is proposed. The proposed network is a 6G information exchange hub network that enables cooperation and integration between the human-machine-thing-genie communication objects and the existing networks in terms of access, resources, and structure. To construct the future 6G network, Ubiquitous-X network architecture faces three challenges: nonlinear propagation caused by non-uniform propagation of information, high information space dimensionality caused by increased information dimensions, and complex information processing caused by service differentiation. To address these challenges and offer insights for 6G research, this review relies on dissipative theory as applied to complex systems and the idea that information negative entropy promotes order, and provides the evolution paradigm and core technologies for designing and optimizing the 6G Ubiquitous-X network.

Keywords mobile communication, network architecture, human-machine-thing-genie, ubiquity, dissipative theory

Ping Zhang received his Ph.D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 1990. He is a professor in the School of Information and Communication Engineering at Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), the director of the State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, a fellow of the IEEE, and a member of the Chinese Academy of Engineering. He has received many awards and honors

for his pioneering contributions in the development of mobile communication systems, including the Grand Prize for the National Science and Technology Progress Award, Second Prize for the National Technology Invention Award (twice), and Second Prize for the National Science and Technology Progress Award (twice). He was a medalist for the National Innovation Pioneer Award by the Central Government of the PR China in 2017. He was awarded the Guanghua Engineering Science and Technology Prize, and the He Liang and He Li Prize for Science and Technology Progress in 2018. His research interests include mobile communications, IoT, AI and information systems.

Jianhua ZHANG received a B.S. degree from North China University of Technology in 1994 and a Ph.D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), Beijing, China, in 2003. She is currently a professor with the Information and Engineering College, BUPT. She has authored and coauthored more than 70 journal papers and nearly 200 conference papers. She received the China Communications Best Paper Award in

2016 and shared the VTC 2015 spring and JCN2009 Best Paper Awards. She has continuously contributed to channel model standards from ITU-R M.2135 to 3GPP 36.873, 900/901, and she was the Drafting Group Chairwoman of ITU-R IMT-2020 Channel Model. Her research interests include 5G and 6G transmission techniques, massive MIMO, millimeter wave, and THz channel modeling, and channel emulators.

Qi Qi received a Ph.D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, China, in 2010. She is currently an associate professor with the State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications. She has authored or coauthored more than 30 papers published in international journals and is the recipient of two National Natural Science Foundations of China. Her research

interests include network intelligence, edge computing, cloud computing, ubiquitous services, distributed deep learning, and deep reinforcement learning.

Zheng HU received a B.S. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2002 and a Ph.D. degree in circuits and systems from Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), Beijing, China, in 2008. He is currently working with the State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, BUPT. His current research interests include cyber space user behavior modeling, analyzing, cognition, and intelligent application systems.