

doi:10.13756/j.gtxyj.2019.04.001

特邀稿件

6G 移动通信发展趋势初探(特邀)

陈 亮,余少华

(中国信息通信科技集团有限公司,武汉 430074)

摘要:文章对第六代移动通信系统(6G)的总愿景和发展趋势进行了初步探讨,认为基础信息理论的突破是 6G 发展的源点,发展方向是为人类可持续发展的个性化需求服务。文章将网络主体从“人—网—物”3 个维度拓展至“人—网—物—境”4 个维度,认为未来 6G 将会改变人类广义概念上的“环境”,归纳了 6G 网络至少 4 个新形态:无人不互联、无处不互联、无时不互联和无事不互联。6G 遵循以 TRUST 为原则的网络性能发展趋势,即向 Tbit/s 级以上带宽、超高可靠性、泛在连接、亚毫秒时延和包括太赫兹频谱、可见光通信以及当前正使用频谱在内的更广域频谱等方向演进,形成网络性能更高级发展阶段。最后,文章阐述了 6G 网络不同维度的各子愿景的需求和面临的挑战,后续将会对关键性技术逐步开展研究和修正工作。
关键词:6G;人工智能;人—网—物—境;网络新形态;无人不互联;无处不互联;无时不互联;无事不互联;TRUST 原则
中图分类号:TN929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2019)04-0001-08

Preliminary Study on the Trend of 6G Mobile Communication

CHEN Liang, YU Shao-hua

(China Information Communications Technology Group Corporation, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper makes a preliminary study on the visions and trends of the 6G mobile communication system. It believes that the breakthrough of basic information theory is the starting point of 6G development, and the development direction is to serve the individualized needs of human sustainable development. The paper preliminarily outlines the 6G's total vision and the vision of each dimension. Then, we expand the actors from the three dimensions of “human-network-thing” to four dimensions of “human-network-object-environment”, in the network. It is believed that future 6G will change the “environment” of the broad concept of human beings. We summarize the four new forms of 6G networks: interconnection of whomever, wherever, whenever and wkam. The development trend of 6G network performance should follow TRUST principle, including more than Tbit/s level bandwidth, extreme Reliability, Ubiquitous connectivity, Sub-millisecond delay, Terahertz spectrum, visible light communication and spectrum currently in use (including but not limited). Finally, the paper expounds the representative key theoretical, technical and academic research results from different layer of the 6G network.
Key words: 6G; artificial intelligence; human-network-object-environment; network new forms; interconnection of whomever; interconnection of wherever; interconnection of whenever; interconnection of wkam; TRUST principle

0 引 言

当今世界面临着诸多影响人类可持续发展的紧迫问题,其中蕴涵着一些跨学科的共性和复杂性科学问题,迫使人类谋求科学突破和重大技术变革。这成为推动科技创新的强大驱动力,引领科技创新的方向,推动众多科学领域协同创新和交叉发展^[1]。移动通信领域也从来没有停止过科技创新的步伐,从模拟通信到数字通信(1G~2G),从语音业务到数据业务(2G~3G),从低传输速率到高传输速率(3G~4G),从“人—人”互联到“人—网—物”三元互联(4G~5G),一直伴随着人类可持续发展不断前进。移动通信技术的发展激励着人们对美好生活的向往,同样,人类永无止境的需求是网络与通信领域持续发展的动力,也将是未来下一代移动通信发展努力的方向。

第六代移动通信系统(The Sixth Generation Mobile Communication System, 6G)是继 5G 之后的下一代移动通信网络。相比于 5G 网络,6G 至少具有超高的网络速率、超低的通信时延和更广的覆盖深度,将充分共享毫米波、太赫兹和光波等超高频无线频谱资源,融合地面移动通信、卫星互联网和微波网络等技术,形成一个具备万物群体协作、数据智能感知、安全实时评估和天地协同覆盖的一体化绿色网络。不同于 5G 侧重面向人、车联网和物联网之间通信,6G 将更加侧重于以人类个性化需求为中心,回归到人们所关注的生活、环境和精神层面等各方面要求。数据传输性能已经不再是 6G 网络所关注的主要目标,它将向空天地海外太空、全维度感知世界和网络空间不断延伸,能够使网络更智能、更安全和更灵活,为人类提供无处不在、无时不在、无人不在和无事不在的信息基础设施。同时,随着人工

收稿日期:2019-07-03
作者简介:陈亮(1977—),男,湖北武汉人。高级工程师,硕士,主要研究方向为无线移动通信技术。
通信作者:余少华,中国工程院院士。E-mail: yushaohuawri@sina.cn

智能理论和技术不断创新变革,其将会与通信网络相互协作赋能,成为 6G 移动通信不可分割的一部分。

本文首先指出基础信息理论突破是 6G 发展的源点,并提出两个著名信息论的限制以及突破设想;然后描述 6G 总愿景趋势,将网络主体趋势拓展至“人—网—物—境”4 个维度,归纳 4 个新形态特征(人、处、时、事互联)、网络技术发展趋势和网络性能趋势;最后阐述 6G 网络不同维度的各子愿景的需求和面临的挑战,后续将会对具有代表性的关键技术逐步开展研究和修正工作。本文所勾勒的美好愿景和技术方向趋势旨在抛砖引玉,希望能引起学界进一步研究,并促进产业发展。

1 基础信息理论突破是 6G 发展的源点

近 20 年来,无线通信理论缺乏革命性的突破,已成为移动通信技术进一步发展的瓶颈,在无线频谱资源日趋枯竭和网络带宽急需进一步大幅提升的需求背景下,期待新的手段、理论和技术创新带来移动通信技术的下一轮跨越发展^[2]。移动通信迫切需要推动到更高的新阶段,基础理论限制是下一代移动通信发展的门坎,其突破注定会是一个漫长的过程,有赖于数学、信息学、物理学、化学、材料科学、仪器科学和脑科学等理论相互结合,实现底层理论创新和变革,否则,未来移动通信发展就是无源之水,无本之木。本文列举两个著名信息理论,以作引玉之砖。

1.1 Gabor 理论

英国伦敦大学教授 Dennis Gabor 在 1946 年提出了一个理论,有限连续时间信号的频率只能以一定的“不准确性”来定义,该“不准确性”与持续时间成反比,反之亦然^[3]。无线通信物理层主要目的是最大化利用时频域资源效率,但正如 Gabor 理论所述,时频域是矛盾的,时域越窄,频域就越宽,反之亦是如此。可以看出,移动通信中最优频谱效率(Maximum Spectral Efficiency)、良好时频域特性(Good Time-and Frequency Localization)和子载波正交性(Orthogonality between Subcarrier)三者无法同时满足,Gabor 理论限制如图 1 所示,其中良好时频域特性包括 3 方面:色散信道(Dispersive Channels)的鲁棒性、低带外辐射和低时延。例如:要满足在正交振幅调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)技术下的最优频谱效率,由于滤波器对任何色散信道都较为敏感,因而不能很好满足时间和频率二域的正交性,所以在同一时间不能实现上述 3 个特性共存。为了突破 Gabor 理论带

来的限制,以牺牲子载波之间正交性换取最优频谱效率和良好时频域特性是当前无线通信基础理论发展的趋势之一。



图 1 Gabor 理论限制

物理波形是无线通信物理层的基础。4G 采用的带循环前缀的正交频分复用(Cyclic Prefix-Orthogonal Frequency Division Multiplexing, CP-OFDM)波形存在频谱利用效率低、无滤波技术、频谱旁瓣衰减慢、带外泄漏高、同步要求严格以及只支持一种参数等缺点,各子载波也必须同时满足正交特性。5G 网络在 CP-OFDM 基础上得到一定程度优化,采用基于子带滤波的 OFDM (Filtered-OFDM) 技术。虽然采用非正交多址 (None-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 技术能够根据不同信号功率区分子载波中同一个符号所对应的同一个资源单元,时频域资源能非正交地让多用户使用,但每个子载波之间仍必须实现正交,也不能很好体现最优频谱效率和良好时频域特性。6G 网络拥有纷繁的应用场景,无线波形参数也不尽相同,如何既能根据场景来动态地选择和配置物理波形参数,又能够提供更高效、更智能的频谱分配和利用,是我们面对的问题。

6G 时代要获得更高频谱效率和更致密的网络容量,打破 Gabor 理论限制是其发展的一个选项。非正交传输理论、光子无线电、量子通信等理论和技术也许是下一代移动通信发展的突破口。而为了使无线覆盖不存在盲区,充分利用频谱碎片,传统移动通信的小区制、蜂窝网络理论也应有所革新,采用动态定向波束赋形组网技术组成的最新智能蜂窝架构也是取代传统移动蜂窝的有效方法之一。

1.2 香农理论

众所周知,美国贝尔实验室的 Claude Shannon 在 1948 年提出了有高斯白噪声干扰的通信信道中理论上的最大传输容量,也就是著名的香农(Shannon)极限。无线通信以开放大气作为传输介质,通信信道噪声干扰不可控。在有限信道带宽和有限信号功率条件下,较难发展到像光纤通信那样逼近香

农极限的数据传输速率。按照理论分析和推测,目前无线通信传输速率已达到香农极限的 90%左右。无论采用多么先进的编码方式和高效的调制解调技术,人类通信技术似乎已接近难以突破的瓶颈。虽然在现阶段,大规模天线阵列(Massive 多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO))技术和相控阵波束赋形(Beam Shaping of Phased Array)技术相结合是提高传输速率的一种有效方式,但需要说明的是,多天线波束赋形技术是在同一频点上形成多个信道,对于单一信道而言也没有突破香农极限。如何进一步逼近香农极限或者突破其限制,是 6G 以及未来移动通信需要面临的挑战。

“极限”问题在一定条件下有可能得到优化。香农理论是对通信活动进行抽象建模,如果能够进一步扩展模型蕴含的广度和深度,找出理论建模对象的漏洞,使理论抽象得足够精确、完备,能够获得更好的通信效果,也应是一种尝试。基础理论研究需要更多技术人员做出不懈努力,也许数学家和物理学家比通信和计算机工程师更有话语权。目前,有较多学术文献也讨论过如何突破香农极限的问题,有不同说法,但至今仍未形成统一共识。如何突破香农极限并非本文讨论的重点,在此就不赘述。

基于以上思考,认为底层信息理论突破是 6G 与前几代移动通信较为不同的切入点,是 6G 发展的起点之一。也许还有与 Gabor 和香农理论类似的不同基础理论限制,将数学、物理学和材料科学等基础科学理论与方法与其他领域的结合是新的前沿方向,有可能成为一种新理论。未来通信世界的发展既需要站在巨人的肩膀上,也要摆脱传统固有思想的束缚,才能获得前所未有的发展。除了传统理论有所突破,颠覆性创新的基础理论也必将有所进展,为基础信息理论注入新鲜血液。例如:量子通信理论、超奈奎斯特理论(Faster than Nyquist)等。如此,移动通信才能够找到一条创新发展的源头活水,成为 6G 发展内生性的驱动力。

2 6G 时代的总愿景和不同维度子愿景

2.1 总愿景:为人类可持续发展的个性化需求服务

2030 年的 6G 网络主体、新形态特征和关键性指标发展趋势与之前截然不同,甚至有颠覆性变化,其将充分满足人类在实体和虚拟世界中的各种个性化需求。6G 网络主体的演进趋势将从“人—网—物”3 个维度逐渐向“人—网—物—境”4 个维度转变。其中,“境”是广义概念上的环境(Circum-

stances),指一切影响人类个性化发展的空间、情境甚至是意境,与前 3 个维度实体概念不同,“境”通常指“看得见摸不着”的虚拟抽象概念,例如:生活社会环境、生理心理环境和流程制度环境等,“6G 改变环境”将是较大的时代特征;“物”是 5G 时代主要的网络主体,但在 6G 时代,“物”将从抽象概念(Thing)向具体概念“对象”(Object)转变,主要是指物理世界中任何一种能够自我学习思考并能同环境互相交流的实体,如多智能体、群智能体等,网络中的“物”将会变得更智能和更灵活;6G 的“人”和“网”会拓展 5G 的概念范畴,综合利用人类空间和信息空间与物理世界一起,形成以人类需求为中心的普惠数据、普惠计算和普惠通信以及它们之间的协同。

6G 时代的移动通信网络将呈现出 4 个新形态发展趋势:无人不互联、无处不互联、无时不互联和无事不互联(interconnection of Whomever, Wherever, Whenever and Wkam, 4W),并深深融入到人类所处“境”的方方面面。无人不互联是指,6G 不仅满足人类简单通信需求,更能广泛深入地满足人类物质和精神层面需求,尤其是人类自身感知世界(触觉、视觉、生理和心理等)之间互连;无处不互联是指,6G 将延拓网络在人类生活环境空间方面的广度和深度,进一步向空天地海一体化空间、人类感知世界、虚拟世界空间和智能协作空间等泛在空间不断渗透延伸,网络泛在连接在人类活动中无处不在;无时不互联是指,由于 6G 网络具备亚毫秒级时延和超高可靠性,无论是对用户体验还是对各种延迟敏感应用场景而言,几乎感觉不到迟滞和中断,网络更加安全和稳定;无事(Wkam)不互联是指在人类生产生活中事物之间的流程、过程和步骤等抽象场景中都存在互连,各工作流程内在之间都会实时连接和相互联系,例如芯片制程、化学反应和工作机制等,网络将突破微观、抽象和生物环境限制并延伸至所有物理维度。Wkam 是定义的新词汇,它包含:工作流(Work flow)、知识获取(Knowledge)、内在因果关系(Attribution)和运行机制(Mechanism)等。

文献[4]提出了值得借鉴的网络与通信技术发展趋势:3s-abc 和无线通信技术发展趋势:3Xs-abc。6G 时代的网络技术在此基础之上具有更高层次的需求,将形成 4CXs-a'b'c'的新发展趋势,其中,“4”指人—网—物—境 4 维万亿级 4W 互联;“C”指人类特有的意识、意境和情境(Consciousness)等广义概念上的环境;“X”指在特定电磁环境下超乎寻常的

(eXtreme)无线通信性能;“s”指更高层级的软件定义无线电(Software Defined Radio,SDR)和以网络功能全面虚拟化为基础的软件定义网络(Software Defined Network,SDN);“a”指以神经形态计算和芯片算力为代表的类脑智能;“b”指网络全域协同计算支撑大数据;“c”指全维云化的网络。可以看出,4CXs-a'b'c'是对 3Xs-abc 进一步的继承和发展,简称 4CXs-abc。

6G 遵循以 TRUST 为原则的网络性能发展趋势,即向 Tbit/s 级以上带宽(Tbit/s level band-

width)、超高可靠性(extreme Reliability)、泛在连接(Ubiquitous connectivity)、亚毫秒时延(Sub-millisecond delay)和包括太赫兹频谱(Terahertz spectrum)、可见光通信以及当前正使用频谱在内的更广域频谱等方向演进,形成网络性能指标更高级发展阶段。在明确 6G 网络主体、4W 新形态、4CXs-abc 技术方向和 TRUST 原则等基础上,我们勾勒出 6G 愿景、技术方向和网络性能的发展趋势,如图 2 所示,同时也需明晰不同维度子愿景的必要内涵和其所面临的挑战。

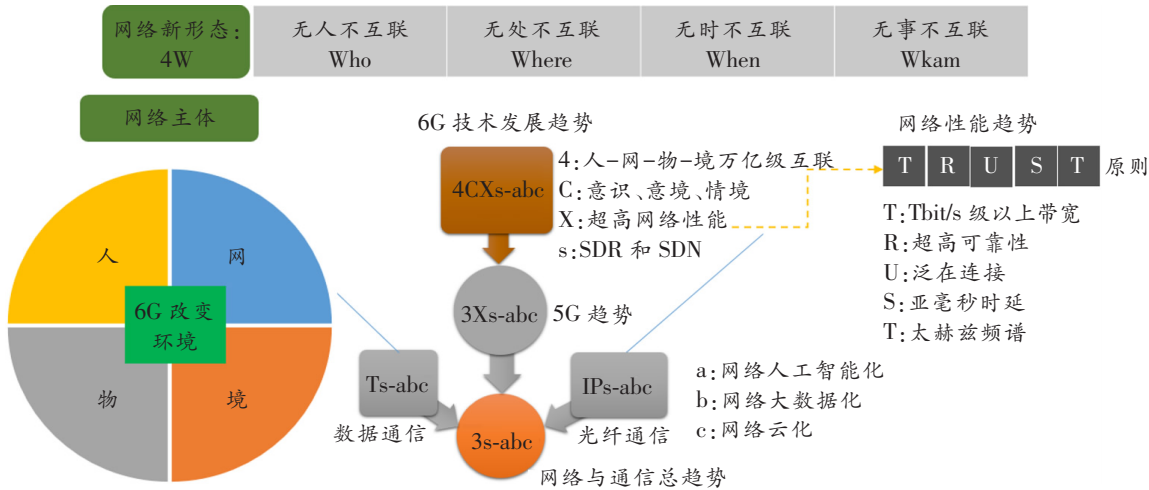


图 2 6G 愿景、技术方向和网络性能的发展趋势

2.2 子愿景 1:超高网络性能和全新概念网络架构

6G 网络性能指标遵循 TRUST 原则,并积极探索各种其他未知的关键性指标,将超过之前任何一代移动通信系统。随着极高频(100 GHz 以上)毫米波和太赫兹技术得到广泛应用,无线传输速率将更高,频谱利用将更高效。6G 用户体验速率能达到 100 Gbit/s,峰值速率超过 1 Tbit/s^[5],最小时延<0.1 ms,误码率<百万分之一(可靠性 99.999 9%),频谱效率测算方式从二维的面积频谱效率(bit/s/Hz/m²)到三维体积频谱效率(bit/s/Hz/m³),利用率能够高达 100 bit/s/Hz,6G 网络的性能将提升到一个前所未有的高度,5G 和 6G 关键性指标和要素对比如表 1 所示,同时 6G 在支撑大数据的网络全域协同计算、人工智能芯片算力和新意境/情境等方面也将有与众不同的表现,其具体量化指标还有待进一步研究。文献[5]提出了一种蜂窝网络峰值速率的计算模型,定量预测了 2020 年~2030 年峰值速率所需要的带宽和趋势。其研究成果表明,到 2025 年,蜂窝网络峰值速率将超过1 Tbit/s,而 2030 年将超过10 Tbit/s。由于太

赫兹脉冲宽度仅为皮秒量级,网络传输时延会低于毫秒级,达到亚毫秒级,使得网络的响应时间更短,实时性更高。

表 1 5G 和 6G 关键性指标和要素对比		
关键性指标和要素	5G	6G
用户体验速率/Gbit/s	1	10~100
峰值速率	20 Gbit/s	> 1 Tbit/s ^[5]
最小时延/ms	1	< 0.1
移动性/km/h	500	1 000
连接数/个/km ²	100 万	同 5G
误码率(可靠性)	< 十万分之一	< 百万分之一
频谱效率/bit/s/Hz	30	100
工作频段	3~300 GHz	>1 THz
网络全域协同计算(支撑大数据)	美国 Summit: 每秒 200 PFlops (20 亿亿次)浮点运算峰值,有 2.7 万个 GPU 芯片。	指标待研究
人工智能芯片算力	用于训练和推断的 Google TPU3.0 芯片,每秒 100 PFlops 算力,是 2.0 的 8 倍,芯片功率 200 W。	指标待研究
新意境和情境	无	指标待研究

注:GPU 为图形处理器。

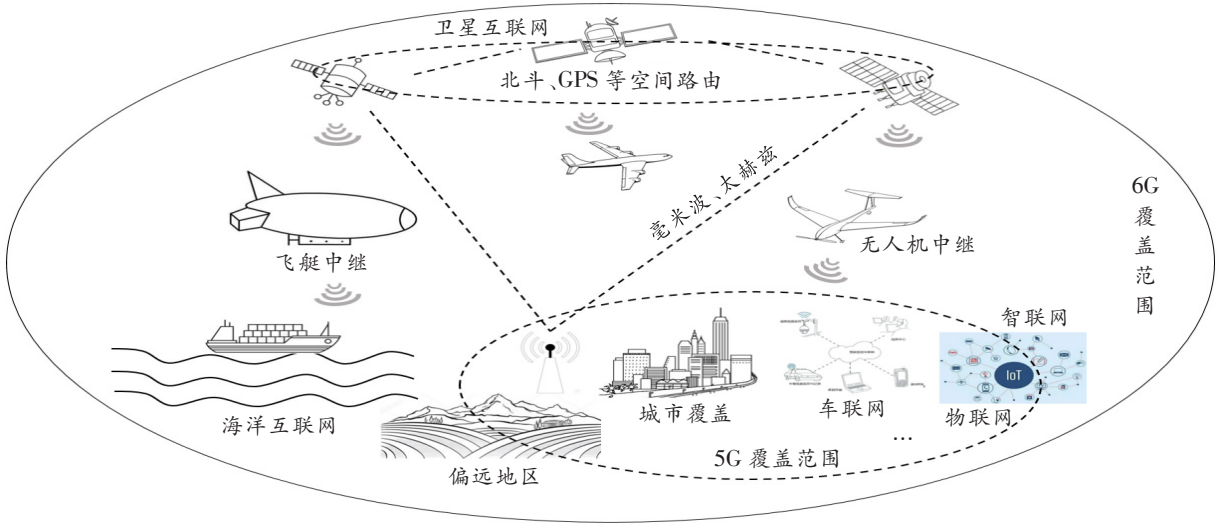
6G 核心网是具有全新理念、全新架构和最佳保障服务的新型数据传输网络。网络能实现多维度确定性,提供具有高精度边界的网络服务等级,为海量数据传输提供精确性保障。全世界移动通信用户之间的数据交换与网络峰值速率一样呈指数爆发式增长,预计到 2030 年,全球总流量会达到 4 394 EB/月,而每位用户消费 257 GB/月流量^[6]。其中包括各种不同类型的移动通信数据,例如:全息视频数据、生产生活数据、卫星数据、多智能体通信数据以及满足一切人类需求的数据。如此万亿级数据需要 6G 具备面向未来 2030 年的内生性安全及支持多种异构网络互连的全新网络架构。

为了获得超高传输速率、超大网络容量和大连续频谱带宽,毫米波甚至太赫兹等超高频谱资源成为 6G 网络建设的必要选项。毫米波和太赫兹传输定向通信性能较好,但覆盖面积较小、传输距离较短(目前太赫兹仅有 10 m 左右),其大尺度衰落特性让很多应用场景难以忍受,而且由于太赫兹需要超高采样频率,降低无线射频设备功耗也成为网络所要面临的严峻挑战。5G 时代,我国在 6 GHz 以下中低频段的系统和终端技术处于全球前列,但在毫

米波以上频段技术仍处于落后,主要差距在于核心射频器件的研发和制造^[7]。前几代移动通信系统的积累证明了中国不仅可以提出技术创新方案,而且最终能够实现,这为我国后续移动通信发展奠定了坚实的基础。

2.3 子愿景 2:覆盖空、天、地、海等所有人类活动的物理空间

空间特征是未来网络与通信的主要特征之一,体现在网络通信可以突破空间、位置、微观世界和生物环境限制,网络互联从目前地面上的平面二维互联向陆海空天互联、微观世界互联以及外太空和星际互联不断延伸,会延伸到地球的所有物理维度^[8]。6G 时代的无线网络覆盖将会向空、天、地、海泛在融合的物理空间拓展,将人类的“数字鸿沟”缩小到极致。采用空间复用技术的 6G 陆地移动通信系统将与卫星通信系统协同组网,集地面无线通信、高中低纬度卫星互联网和海洋互联网于一体,形成具有最大化容量、密集泛在连接和高致密频谱的全覆盖空间,如图 3 所示。6G 网络几乎能够覆盖到所有人类活动的区域,例如:人迹罕至的偏远地区、广袤的海洋甚至平流层,体现无处不互联的网络特征。



注:GPS 为全球定位系统。

图 3 6G 全维度覆盖网络

陆地通信、卫星通信和海洋通信三者相互融合成为未来网络发展的趋势之一。6G 网络将会立足陆地、拥抱海洋、谋划空天,利用高通量卫星建立轨道卫星通信星座(天基),整合海洋互联网通信各种载荷平台(海基)与陆地移动通信(陆基)相互协作融合,形成覆盖全球范围的高精度和高可靠性网络。天基、海基和陆基通信标准实现统一,才能使其在网络各个层面开展有效互联互通,其中移动性管理也

将包含从大型卫星到小型地面基站的所有范围^[9]。联合国已将美国 GPS、中国北斗、俄罗斯格洛纳斯和欧盟伽利略确定为全球 4 大导航系统,因此 6G 需要相应实现 4 大卫星通信的互连技术、架构和标准,才能满足人类在任意两种卫星网络之间进行漫游和切换^[10]。

卫星通信虽然在空间覆盖上有较大优势,但由于卫星到地面距离较远(中低轨道卫星高度通常在

700~1 500 km),传输延迟相对较大,加之受天气和气候影响较为敏感,不适合对延迟和可靠性有较高要求的应用场景,而且过大的时延也会给系统带来很多难以预测的问题。海洋通信面临的最大挑战是深海通信(即水下通信),电磁波在海水中传播衰减损耗较大,无法长距离传输,并不是深海传输的优秀介质。水声通信是深海传输中的一种可行性方案,相比电磁波的横波,声波属于纵波(机械波),在水下传输距离较远,但在复杂水声噪音干扰环境下存在多径衰落特性,使其传输时延差较大,可靠性不高。

2.4 子愿景 3:不断向人类感知的虚拟世界拓展

6G时代,数字虚拟感知将会与每一个人息息相关。未来人类的生理、心理和病理等特征性数据都会抽象成为人的情境数字模型,以“虚拟身”、“数字人”等形式存储在网络空间,数据随着时间不断更新。6G网络能够传达人类自身数据,包括味觉、触觉、病痛、习惯、心情以及多种感官数据,使虚拟应用能够达到“可触摸”的全息感知状态,各种与人类生活需求密不可分的服务也都会诞生。例如:全息视频应用、远程遥感诊断、远程心理介入、虚拟数据统计预测和数字舆情分析等等。

触觉互联网(Tactile Internet)能够通过网络实时传输人类的各种触觉信息,极低的时延外加超高可用性、可靠性和安全性就是触觉互联网的特征^[11-12]。根据测算,人类听觉感受响应时间是100 ms,视觉是10 ms,而触觉响应时间则达到1 ms。当网络时延超出人类感受响应时间时,大脑就能感知延迟,进而影响用户体验。因此,具备传输速率更高、时延更小特性的6G网络才能让这些新兴应用成为现实。配合相应的传感器,类似触觉互联网和视觉互联网通过无线网络就能实现实时性交互。触觉机器人也将是人类感知应用的延伸,异构机器人通过触觉互联网形成跨越不同领域的虚拟人物集合(Avatar Collectives)^[13]。文献[6]和[11]提出了技能互联网络(Internet of Skill, IoS)的概念,能够将某些特定人群(钢琴家、画家等)的技能“存储”到云服务器中,形成全局技能集合(Global Skill Sets),并将其通过无线网络实时共享给其他想学习的用户。这些新兴概念将成为6G使能服务的一部分,而且还能对它们进行进一步拓展。触觉互联网只是网络渗透到人类感知世界的开端,人类一切生理和心理数据都能通过网络进行实时传输和存储,在6G基础设施之上形成各种子感知移动网络,让其成为通向人类感知世界的桥梁。

如何精准获取人类感知世界的各种数据是需要面临的挑战之一。与5G环境下的物联网不同,不可能给人们身上安装过多传感器,在生物医学和伦理角度也有很大限制,因此触觉机器人也许会是感知互联应用的第一步。6G网络必须在强安全性和高可靠性的约束下实现感知数据超低时延传输,网络延迟能稳定保持在毫秒乃至亚毫秒级很有必要。文献[14]提出了一种利用SDR的方式实现物理层和媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层信号处理的触觉感知演示,其往返延迟能低于1 ms,值得未来6G应用场景借鉴。移动边缘计算也是减少往返延迟的重要手段,文献[15]介绍了一种基于云的多层次蜂窝系统,为移动边缘设备提供微型云单元(Micro-Clouds),以减少往返延迟和网络拥塞。

2.5 子愿景 4:具有智慧大脑的智能移动通信 2.0

当前人工智能的发展还处于初级阶段,但随着GPU、张量处理器(Tensor Processing Unit, TPU)和分支处理单元(Branch Processing Unit, BPU)等硬件计算能力的不断提升,逼近人脑信息处理能力的神经形态计算和跨媒体智能计算等类脑科学计算模式日益强大,未来全新业务类型将会不断涌现,能够为6G网络提供超级智慧大脑。移动通信与人工智能两者之间并非完全独立的技术领域,存在相互交叉、相互协同和相互赋能的关系。从最初通信网络为人工智能提供服务支撑,到人工智能不断为网络提供优化手段,最后逐步形成两者持续相互协作赋能与提升,并以多智能体互连的方式构成移动物联网。人与智能体和谐共处,一种群智能体间互连的数据传输类型将会诞生,6G将会向智能移动通信2.0阶段迈进,进而推动人类社会从“万物互联”演变为“万智互联”,形成真正意义上的“智慧互联”时代。

脑功能连接组是破解大脑功能、揭示人脑工作机理奥秘的关键,能够极大地带动人工智能、复杂网络理论与技术的发展。类脑计算是计算机科学和通信科学向更高层次迈进的方向,也是人工智能发展的终极目标之一。据2018年世界人工智能大会预测,在未来10年内,1 000美元能够买到1 000 T的算力,相当于人脑的计算能力,足以支撑5级无人驾驶所需要的算力。随着技术不断进步,6G将会利用人工智能技术强大的算力和创新的模型架构,形成具有以人类需求为中心、结合多元知识进行类脑智能训练与推理的能力。从现阶段初级智能应用,例

如：语音识别、图像识别和机器翻译等，向人类社会所需要的高级智能应用演进，例如：全自动驾驶、无人快递、精准医疗和自动欺诈检测等。通过深度学习、上下文感知和上下文过滤的方法，许多令人兴奋的网络服务和应用将成为可能^[16]。6G 时代的网络面向万智互联，将形成具备一定自我意识的智能移动网络，达到无线网络的更高阶段。

人工智能某些理论和技术（如深度学习）的发展已接近现阶段天花板，应用还只局限于语音和图像识别，对 6G 网络亟需的智能频谱感知和智能信道估计等需求还缺乏有效应对手段。将人工智能技术融入到 6G 网络，很可能会使网络架构过于复杂，对网络服务质量（Quality of Service, QoS）、维护难度和用户体验带来一定挑战。网络需要有更简洁的协议、更扁平的架构和更敏捷的运维，文献^[17]研究表明，将超密集组网、SDN、网络功能虚拟化和移动边缘计算等技术相结合，是一种有效的解决方案，可以减轻网络负荷，改善资源分配和优化系统效率。如此，网络才能真正洞悉人们的多种意图，满足人类个性化需求。

2.6 子愿景 5：信息安全级别更高的网络

自从互联网诞生以来，网络安全和个人隐私一直是人们关心的重要问题。尤其是 6G 网络面向人类诸多个性化需求，各种应用场景的用户隐私数据都会存储在网络和云空间，除了用户基本信息以外，人类感知世界的的数据、生理心理数据和人工智能分析数据等，都将面临前所未有的安全隐患，从来没有哪一代移动通信技术对用户隐私和数据安全肩负着如此重要的责任。

6G 网络需要考虑的安全问题与 5G 差别不大，只是涉及层面更广泛，采用的技术更为先进。从应用层面来看，6G 的网络主体“境”所涉及的数据和隐私种类更多，数据量更大，数据结构也更复杂。从技术层面来看，涉及到无线空口安全、用户层完整性、网络内生安全、用户漫游安全和基础设施安全等几个方面^[18]，网络架构越复杂，漏洞也就会越多。从用户层面来看，美国隐私问题专家 Alan F. Westin 在 1967 年的著作《Privacy and Freedom》中给出了个人隐私的定义，该定义涉及多种自主性的因素，包括决定分析什么、如何收集个人信息和选择信息交流的方式^[19]；对于网络环境而言，用户主要的隐私担忧可能来自数据、位置和身份^[20]。6G 的智慧网络能够针对安全隐患迅速做出自我决策、及时响应，

避免人为干预，网络的信息安全级别也将达到更高层次。

网络安全和隐私保护还需面对一些非技术因素的挑战。未来的移动通信网络不仅有运营商建造的基础设施，还有来自包括用户、社区和广泛的第三方提供者^[21]所建立的网络。面对差异巨大的网络环境和不同网络时代遗留下来的习惯，用户必须抛弃固有思维方式，适应全新网络行为方式和规则。网络安全也绝非只通过技术手段就能解决，还需要通过政策、法律和道德等各个社会层面对其进行约束。

如上所述，6G 时代呈现出来的愿景多姿多彩，需求林林总总，挑战也如影随形，所有美好愿景都围绕着人类个性化的需求展开。未来移动通信将以基础信息理论突破作为起点，进入一个全新的发展空间和时代，网络主体以“人—网—物—境”为中心，“无人不互联、无处不互联、无时不互联、无事不互联”成为鲜明的网络特征，6G 改变人类可持续发展的环境将成为最终目标。

3 结束语

与 5G 网络主要面向人和物联网之间通信不同，6G 时代的移动通信网络将会侧重于人与多智能体之间的通信。网络传输性能已不再是网络所关注的唯一目标，网络全域协同计算的支撑大数据、人工智能芯片算力和新意境/情境等指标也有待进一步研究。6G 将以人类可持续发展的个性化需求为中心，回归人们所关注的各方面需要。到那时，网络主体将演化为“人—网—物—境”4 个维度，并以“无人不互联、无处不互联、无时不互联、无事不互联”的网络新形态深深融入到人们的生产生活环境中。网络不断地向空天地海泛在空间、人类感知空间和数据虚拟空间渗透，为用户提供更智能、更安全、更方便的网络基础设施。随着人工智能理论和技术的不断创新变革，两者相互协作赋能，6G 网络将成为智能移动通信 2.0。为实现本文所描绘的美好愿景，需要对 6G 关键性基础技术进行持续不断地研究，这正是我们后续工作的重点。如今 5G 已经商用，6G 离我们也并不遥远，任何人为的阻碍和压制都不能停止人类科技前进的步伐，我们要遵循网络与通信发展规律，以开阔的心胸和崭新的视野回望过去、立足当下、迎接未来。

（本刊后续将继续刊登作者 6G 关键性技术的相关文章）

参考文献：

[1] 中国科学院. 科技发展新态势与面向 2020 年的战略选择[M]. 北京:科学出版社,2013.

[2] 余少华. 网络通信七个技术墙及后续趋势初探[J]. 光通信研究, 2018(5): 1—7.

[3] Gabor D. Theory of Communication. Part 1: The Analysis of Information [J]. IET Journals & Magazines,1946,93(26):442—445.

[4] 中国信息与电子工程科技发展战略研究中心. 中国电子信息工程科技发展研究 2017(蓝皮书)[M]. 北京:科学出版社,2017.

[5] Raghavan V, Li J. Evolution of Physical-Layer Communications Research in the Post-5G Era [J]. IEEE Access, 2019(7):10392—10401.

[6] Yastrebova A, Kirichek R, Koucheryavy Y, et al. Future Networks 2030: Architecture & Requirements [C]//2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Moscow,Russia;IEEE,2018:18439558.

[7] 邬贺铨. 5G 商用:机遇与挑战[EB/OL]. (2019-06-05) [2019-07-03]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1635493707694648154&wfr=spider&for=pc>.

[8] 余少华. 网络通信技术呈十大特征[N]. 人民邮电报, 2018-08-16(005).

[9] Evans B, Onireti O, Spathopoulos T, et al. The Role of Satellites in 5G [C]//2015 23rd European Signal Processing Conference. Nice, France: IEEE, 2015: 15681624.

[10] Li X C, Gani A, Salleh R, et al. The Future of Mobile Wireless Communication Networks[C]// 2009 International Conference on Communication Software and Networks. Macau, China: IEEE, 2009: 10720130.

[11] Varsha H S, Shashikala K P. The Tactile Internet [C]// 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications. Bangalore. India: IEEE, 2017: 17029336.

[12] ITU-T. The Tactile Internet(R) [EB/OL]. (2014-08-11) [2019-07-03]. https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf.

[13] Haddadin S, Johannsmeier L, Díaz L F. Tactile Robots as a Central Embodiment of the Tactile Internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 471—487.

[14] Pilz J, Mehlhose M, Wirth T, et al. A Tactile Internet Demonstration: 1 ms Ultra Low Delay for Wireless Communications Towards 5G[C]//2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops. San Francisco,CA,USA;IEEE,2016:16285737.

[15] Ateya A A, Vybornova A, Kirichek R, et al. Multi-level Cloud based Tactile Internet System[C]// 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology. Bongpyeong, South Korea: IEEE, 2017: 16777200.

[16] 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.

[17] Siddique U, Tabassum H, Hossain E, et al. Wireless Backhauling of 5G Small Cells: Challenges and Solution Approaches[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 2(5): 22—31.

[18] Ahmad I, Kumar T, Liyanage M, et al. 5G Security: Analysis of Threats and Solutions [C]// 2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking. Helsinki, Finland: IEEE, 2017: 17315290.

[19] Westin A F. Privacy and Freedom [M]. New York: Athenum,1967.

[20] Kumar T, Liyanage M, Braeken A, et al. From Gadget to Gadget-Free Hyperconnected World: Conceptual Analysis of User Privacy Challenges[C]// 2017 European Conference on Networks and Communications. Oulu, Finland: IEEE, 2017: 17042858.

[21] Sorensen L T, Khajuria S, Skouby K E, et al. 5G Visions of User Privacy[C]// 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference. Glasgow, UK: IEEE, 2015: 15288113.