



B5G: 泛在融合信息网络

B5G: Ubiquitous Fusion Information Networks

张平/ZHANG Ping

(北京邮电大学, 北京 100876)
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201901009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190131.1559.012.html>

收稿日期: 2018-12-24

网络出版日期: 2019-01-31

摘要: 延续“线”—“面”—“体”的演进趋势, 超5代移动通信系统(B5G)继续提高通信速率, 拓展通信空间, 完善通信智慧, 演进为泛在融合信息网络。B5G使用更高的频段作为信号载体, 数据速率达到太比特每秒量级。伴随网络性能的增强, B5G的适用空间拓展至陆海空天。与以往移动通信系统不同, 人工智能(AI)成为B5G性能提升的强劲引擎。基于AI的干扰管理、深度学习智能信号处理以及太赫兹技术成为物理层关键技术。基于极化码的中继、多天线、多址技术是传输层关键技术。基于AI的移动网络架构、面向人机物泛在融合的全析网络架构以及认知增强与决策推演的智能定义网络架构等方式的新架构被应用于网络层。

关键词: 泛在融合信息网络; B5G; THz; AI

Abstract: Following the “line-plane-cube” evolution trend, Beyond Fifth Generation (B5G) in mobile communication system aims at improving communication data rate, extending communication dimensions, implementing communication intelligence and is on the way to evolve into ubiquitous fusion information networks. Higher spectrum bands are used in B5G and the peak data rate could be T bits per second. With the enhancement of network ability, the support scenarios of B5G includes the land, the sea, the sky and the aerospace. Different with the existing generations, artificial intelligence (AI) becomes a powerful engine for B5G. The key technologies in the physical layer include the AI-based interference management, deep learning intelligent signal processing and THz technology. The transport layer uses the polar code-based relay, multiple input multiple output (MIMO) and multiple access technologies. The AI-based mobile network framework, the ubiquitous fusion fully-analyzed network framework for human-machine-things and the intelligent definition network framework for cognitive enhancement and decision deduction are used in the network layer.

Key words: ubiquitous fusion information networks; B5G; THz; AI

1 信息通信网络发展历程及5G面临的挑战

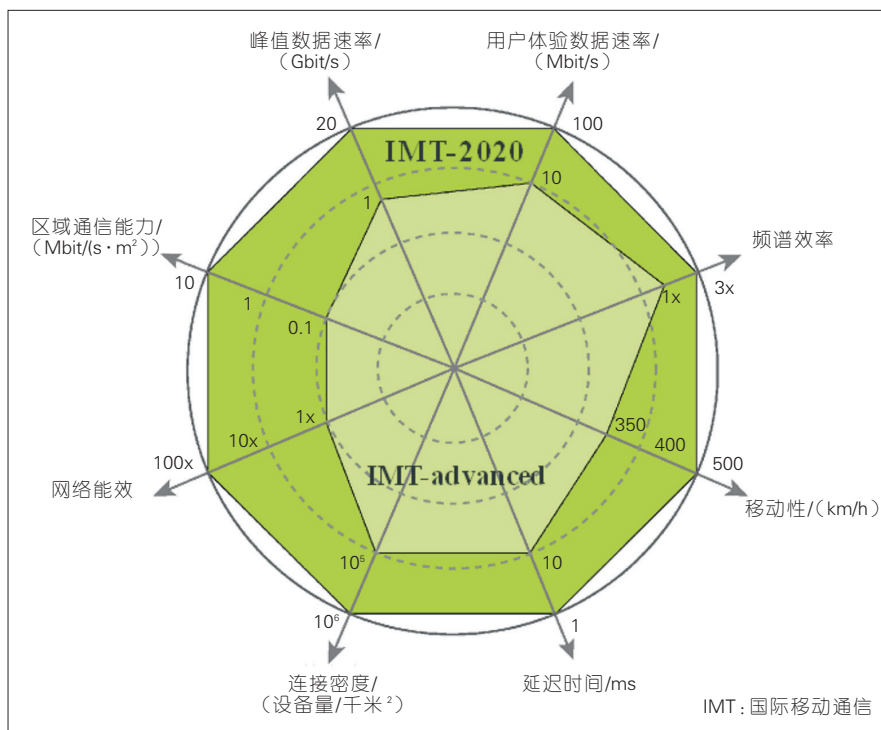
1948年香农发表了《通信的数学原理》, 提出了信息熵的概念, 奠定了信息论和数字通信的理论基础。70年来, 在香农信息论的指导下, 现代无线通信系统从无到有, 不断取得突破性发展, 深刻改变了人们的生活。1978年美国贝尔实验室成功研制出了第1个移动蜂窝电话系统——先进的移动电话系统(AMPS), 它标志着第1代移动

通信系统(1G)正式登上历史舞台^[1]。20世纪七八十年代, 世界各国纷纷建立起了自己的第1代移动通信系统。由于采用模拟蜂窝和频分多址(FDMA)技术, 1G的容量十分有限, 并且通话质量不高, 不能提供数据业务和漫游服务^[1]。为解决上述问题, 在20世纪90年代, 以数字技术和时分多址(TDMA)技术为主体的第2代移动通信系统(2G)研制成功^[2]。与1G相比, 2G具有通话质量高、频谱利用率高和系统容量大等优点; 但是

它对定时和同步精度的要求高, 并且系统带宽有限^[2], 无法承载较高数据速率的移动多媒体业务。为了支持和实现较高速率的移动宽带多媒体业务, 以码分多址(CDMA)技术为核心的第3代移动通信系统(3G)^[3-7]应运而生。相比于前2代移动通信系统, 基于Turbo码和CDMA技术的第3代移动通信系统具有更大的系统容量、更好的通话质量和保密性, 并且能够支持较高数据速率的多媒体业务。然而, 仍受其带宽限制, 3G无法支持超

高清视频等更高质量的多媒体业务^[3-7]。为了追求更大的系统容量和更高质量的多媒体业务,基于正交频分复用多收发天线(OFDN-MIMO)技术和空分多址(SDMA)技术的第4代移动通信系统(4G)应需而来^[8-13]。与3G通信系统相比,4G通信系统数据传输速率更快,并且它能够更好地对抗无线传输环境中的多径效应,系统容量和频谱效率得到大幅提升。随着硬件工艺的提升和成本的下降,无线设备能力不断增强,数量也持续增加。移动网络承载的数据量呈现爆炸式增长的态势。伴随着“万物互联”的提出,4G急需满足支持超高质量的多媒体业务以及高可靠、低时延、低能耗、大连接等新需求。第5代移动通信系统(5G)研究拉开序幕,并逐步从标准走向实现^[14-22]。

图1给出了5G相较于与IMT-Advanced通信系统(也即实际满足4G标准的商用系统)能力的增强。从图中可以看出5G考虑了更多的性能维度提升,包括:(1)在峰值数据速率方面,峰值数据速率提升了20倍,由1 Gbit/s提升至20 Gbit/s;(2)在用户体验数据速率方面,就广域覆盖而言,城区和城郊用户有望获得100 Mbit/s的用户体验数据速率,在热点地区,用户体验数据速率值有望提升至1 Gbit/s;(3)在频谱效率方面,频谱效率较4G提升3倍;(4)在移动性方面,支持更高速的移动,专门为

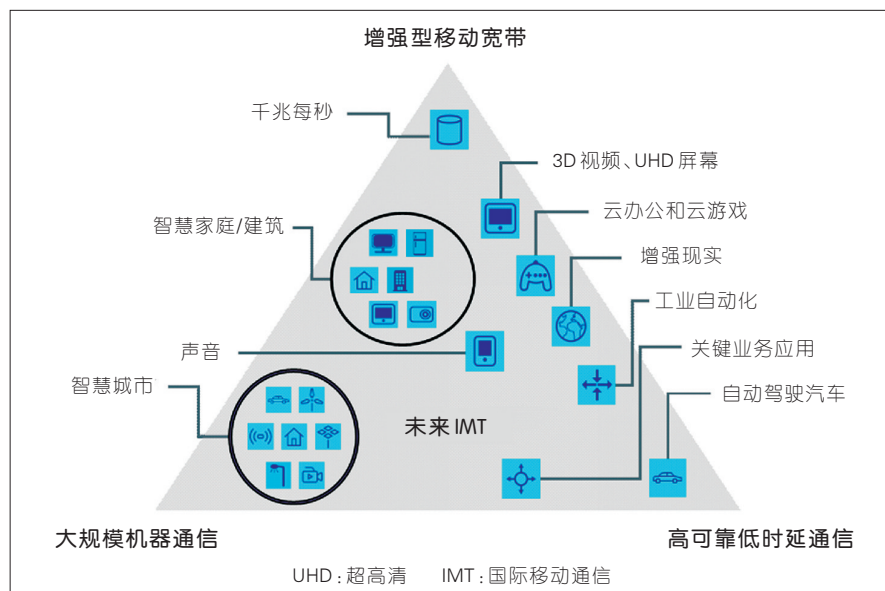


▲ 图1 5G较4G在关键技术方面增强的示意图^[23]

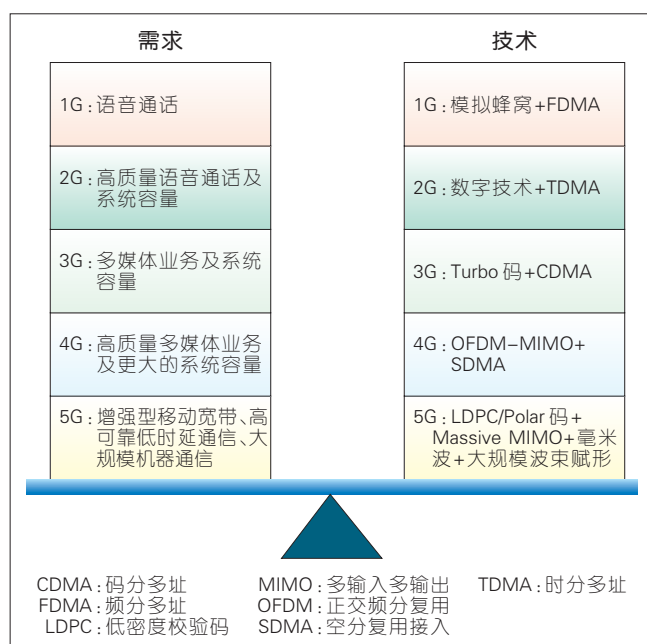
高速铁路设计服务,由350 km/h提升至500 km/h;(5)在延迟时间方面,支持极低延迟要求的服务,延迟时间降低了10倍,由10 ms降低至1 ms;(6)在连接密度方面,支持更多数量的设备连接,适用于大规模机器类型通信场景,连接密度由10⁵设备量/千米²提升至10⁶设备量/千米²;(7)在网络能效方面,较上一代提升100倍;(8)在区域通信能力方面,区域通信能力提升了100倍,由0.1 Mbit/(s·m²)提升至10 Mbit/(s·m²)。基于上述8个方面能力的增强,5G网络开始具备渗透垂直行业的能力,支持的应用场景涵盖增强型移动宽带(eMBB)、超可靠低时延通信(uRLLC)以及大规模机器通信(mMTC)3大场景。图2给出

了5G的3大场景典型支持业务,包括4 K/8 K超高清视频、增强现实(AR)/虚拟现实(VR)、全息技术、智能终端、智慧城市、智慧工业、智慧家庭、智慧农业、无人驾驶、车联网、智慧医疗等。为了实现系统性能的增强,5G借助于毫米波频段,并采用大规模MIMO赋形技术弥补毫米波频段的衰减。采用了低密度校验码(LDPC)编码和Polar码分别作为数据和控制信道编码。

如图3所示,每一代通信系统取得成功的原因在于完美平衡了天平两侧的通信需求和技术能力。一旦一方打破这个平衡,就会促使移动通信系统演进到新的平衡状态。1G到5G的演进呈现如下规律:第一,支持



▲ 图2 5G潜在的业务、服务及应用示意图^[23]



▲ 图3 1G到5G的需求及其关键技术发展示意图

场景逐步多样化,从简单的语音演进至3大场景典型业务;第二,通信速率每代有约1 000倍提升,从2G的千比特每秒量级提升至5G的吉比特每秒量级。按照上述演进规律进行推断,超5代移动通信系统(B5G)将进一步扩展支持的通信场景,同时数

据速率将达到太比特每秒。当前,5G基本上满足了陆地通信系统面向个人终端的基本通信需求。随着国家信息疆域战略扩展部署,5G通信系统尚不能满足全方位、立体化的多域覆盖,尤其在空天通信、空地通信,及海洋通信的能力严重不

足;因此,5G之后的移动通信系统面临如下挑战:

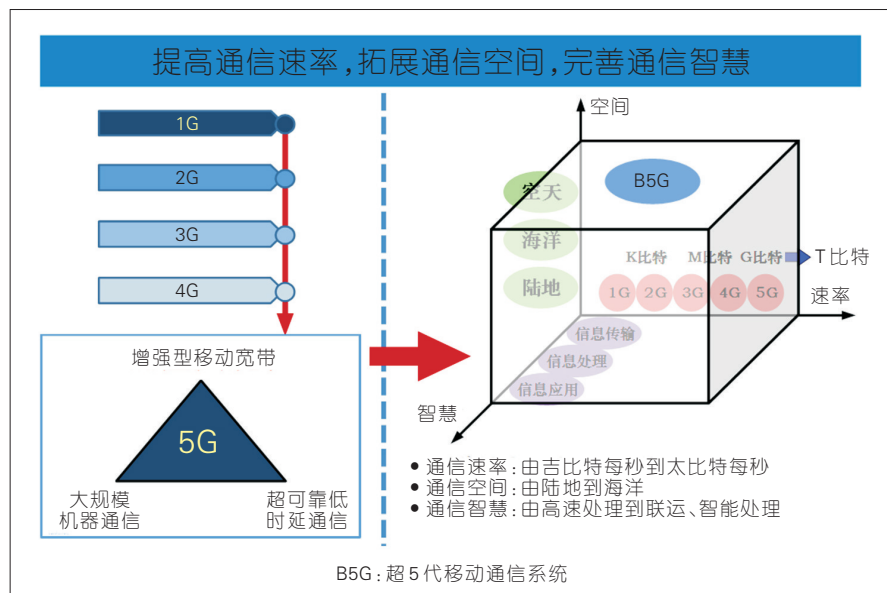
(1)数据的速率将难以达到1 Tbit/s量级以上;

(2)多域网络之间相对独立,没有完整的协同传输框架,难以满足全方位、立体化的多域、跨域传输及覆盖,空天通信、空地通信及海域通信能力严重不足;

(3)随着大数据、互联网、智慧城市、智慧产业和信息物理与社会融合空间的兴起,对网络的创新、智慧、安全融合提出了更高的要求,例如,情景再现与融合、智慧城市神经网络、智能无人网络等。

2 B5G 演进: 泛在融合信息网络

目前移动通信系统的演进趋势可以归纳为:由“线”到“面”的演进趋势。线是指演进所围绕的增强移动宽带性能这条主线,即每一代移动通信系统演进的首要目标是大幅提升数据传输速率和网络容量。而面是指从4G到5G的演进逐步开始考虑支持多种业务需求矛盾的场景,而不仅限于增强型移动宽带,例如,5G支持的高可靠低时延通信以及大规模机器通信业务等。基于已有演进规律,B5G通信系统将由一维的线、二维的面拓展演进为三维的体,如图4所示。具体而言,这个三维的“体”包括:速率维度、空间维度以及智慧维度。通过3个维



▲ 图4 “线”—“面”—“体”的演进趋势示意图

度的不断完善, B5G 通信系统最终演进为泛在融合信息网络。泛在融合信息网络旨在进一步提高通信速率, 达到 1 Tbit/s 量级以上; 进一步拓展通信空间, 由目前的陆地覆盖拓展至海洋、天空、太空场景下的多域和广域覆盖; 进一步加强和完善通信智慧, 由目前单一设备的智能处理演进至多设备、多网络之间的协同跨域联动智能处理, 并且从信息传输、处理及应用层面进一步加强和深化通信智慧。

3 泛在融合信息网络中的使能关键技术

泛在融合信息网络包括泛在化、社会化、智慧化、情境化等新型应用形态与模式, 蕴含“网络资源按需即用”的核心技术特征。现有的 5G 网络技术难以在信息广度、信息速度及信息深度上支持人、机、物三元空间

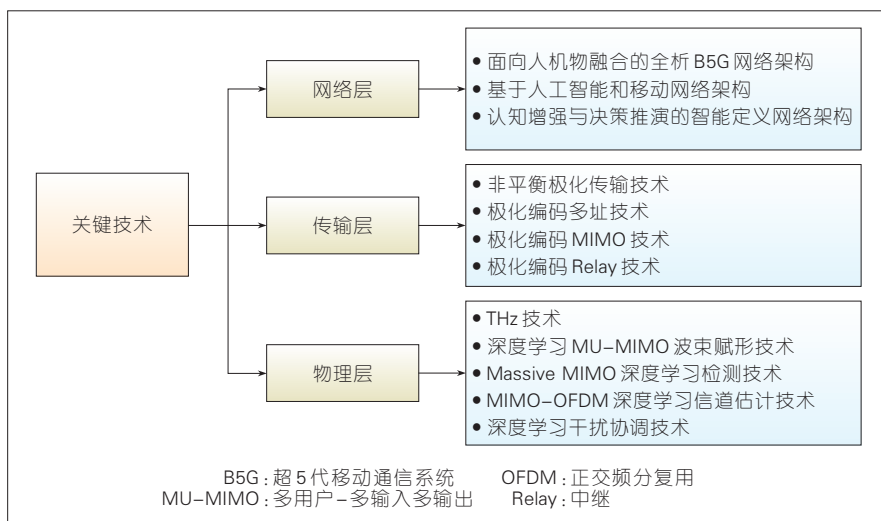
的深度融合与应用, 需要在网络架构和核心技术方面加以突破, 支撑未来应用的业务需求。如图 5 所示, 为了满足 B5G 网络的泛在化、社会化、智能化、情景化、广域覆盖及多域融合的需求, 结合 5G 网络技术的发展以及演进过程, 我们从理论及技术等多个方面探索并研究 B5G 网络可实现的物理层关键技术、传

输层关键技术以及网络层关键技术。

3.1 物理层关键技术

(1) 太赫兹技术。

为了支持超高速数据传输, B5G 系统必然采用超宽带体制, 太赫兹通信被认为是未来 B5G 通信的潜在关键技术之一。由于太赫兹频段相比微波频段, 带宽更宽, 可提供数十吉比特每秒甚至更高的无线传输速率。同时, 其波束窄, 方向性更好, 还可采用扩频、调频技术^[24-27], 实现更好的通信保密性和抗干扰能力, 因此, 普遍认为太赫兹适合于中、近距离通信或太空无线通信。然而要研究太赫兹频段在移动通信的可行性及相应技术, 首要任务就是要掌握太赫兹频段在多样环境中的无线信道传播特性。由于传播环境中分子共振引起的能量损失可能会引起太赫兹波在传播过程中经历极大的衰减, 因此, 研究雨、雾,



▲ 图5 泛在融合信息网络中的关键技术

甚至空气中的水蒸气对太赫兹传播规律的影响,对其通信的可覆盖范围具有极大的意义。另外,由于太赫兹波段的粒子性强,穿透能力低,在传播环境中的穿透和反射特性与微波频段的规律有较大区别,传统模型难以准确刻画,因此,有必要研究太赫兹在受到不同材质阻挡的情况下反射和穿透的特性。太赫兹信号带宽一般在吉赫兹以上,系统在时延域的分辨率达到纳秒级。同时太赫兹由于波长短,天线尺寸极小,一般会组成超大规模的天线阵列,从而使得多径在时延和空间角度方向的可分离程度极高,而传统信道模型的分辨精度无法支持;因此,对太赫兹频段的超大规模天线和超大带宽的信道特性研究是其在未来 B5G 系统中具体采用何种编码、调制等一系列技术的重要基础。

(2)深度学习智能信号处理技术。

B5G 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)或最大后验检测(MAP)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。深度学习为最优信号检测理论提供了新的研究思路。首先,深入分析多用户 MIMO 的波束赋形信

号优化问题^[28],以卷积神经网络(CNN)构建优化模型,研究具有普适性与通用性的波束赋形算法,并建立算法的收敛性分析和理论。其次,分析大规模 MIMO 信号特征,设计深度信号检测算法网络,分析算法收敛性,构建高性能、低复杂度的检测算法体系。进一步分析 MIMO-OFDM 信道模型特征,以循环神经网络(RNN)模型为指导,设计高性能的信道估计算法,适应 B5G 移动通信的动态时变特征。最后,利用 CNN 与 RNN 组合模型,对多小区、复杂干扰场景的信号样本进行训练,获取信号的高维度特征,设计通用普适的干扰协调深度学习模型。

3.2 传输层关键技术

(1)非平衡极化传输。

极化码是信道容量可达的新型编码,已经被接纳为 5G 标准。极化设计思想就是利用编码与信号传输的联合优化,充分放大链路传输中的可靠性差异,最终达到通信系统的非平衡态优化。这种思想是方法论的革新,可以应用于 B5G 移动通信的各种场景:多址接入、广播、中继、MIMO 等。在各种场景下,极化传输都可严格证明达到相应的容量极限。

(2)基于极化码的多址、MIMO 及中继(Relay)技术。

目前,非正交多址接入(NOMA)已成为 5G 通信系统的代表性技术。NOMA 充分利用

多用户自由度,有效提升多址接入系统的容量,可以预见它也将成为 B5G 移动通信的核心技术。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。主要研究与现有多址接入方式的组合优化,例如,研究多用户极化码与非正交多址的混合接入技术,简化信号发射机结构,优化用户、子载波的选择准则,设计低复杂度的检测译码算法。此外,MIMO 系统引入了空间维度,为通信系统优化提供了更多的空间自由度,但也对信道极化码的设计带来了诸多挑战,针对 MIMO 系统的 2 种典型结构:空间复用/预编码与空间调制,针对性研究了极化编码 MIMO 传输的优化方案,逼近单小区 MIMO 传输的容量极限。最后,在 Relay 系统中,由于引入了 Relay 节点,为信源到信宿链路的传输速率/可靠性提升提供了更多的优化空间。我们重点研究基于极化码构造的协作编码中继方案:解码转发(DF)与压缩转发(CF)中的极化码实用构造方案。

3.3 网络层关键技术

我们提出 3 种网络层架构:

(1)面向人、机、物融合的全析 B5G 网络架构;(2)基于人工智能的移动网络架构;(3)认知增强与决策推演的智能定义网络架构。其中,(1)为总体架构,

是面向人、机、物的全方位、立体化的泛在融合网络架构,而(2)和(3)可以作为(1)在人工智能以及机器学习等多个方面的增强型架构,起到扩展及补充等作用。

(1)面向人、机、物融合的全析B5G网络架构。

B5G网络架构将支持以人为中心的社会空间、以机器连接人的信息空间、以物体为载体的物理空间等三元空间的深度融合,从而实现“物质世界信息化”到“信息世界物质化”的转变。通过原理性抽象建立泛在化的人、机、物融合要素,研究通过人、机、物三元空间的语义衔接、业务适配、协作编排,构建一套面向人、机、物三元空间的信息传输、边缘智能、协同计算等B5G网络架构,支撑人、机、物要素跨界融合,实现陆海空天一体化的全析网络发展。我们需要研究B5G网络在设备功能趋同基础上的去中心化无线接入体制,并重点研究在无线接入网络控制平面与数据平面基础上引入计算平面后的协议结构、计算任务及存储任务的分布式处理,以及各设备计算能力、存储能力、能量信息及位置等信息的高效获取与交互机制等。我们还需要进一步研究不同层级设备在功能趋同基础上的去中心化组网关键技术;研究终端协同通信、终端协同计算、终端协同存储与终端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,以用户的业务感受质量为核心,灵活利用多连接技术,提供针对连接的专属服务供给及质量保障。此外,与传统基于数据流、控制流和状态空间的经典融合技术不同,面向B5G网络的人、机、物融合技术将构建人、机、物多维、多空间资源的统一表示,人、机、物一体化融合的模式构造和执行。我们需要研究面向人、机、物融合的统一知识本体构建、表示、推理和学习等适配机制;研究基于网络多维可编程的人、机、物融合组装方法;研究人、机、物融合的状态监测控制、同步控制、一致性检查等网络容错机制。将传统集中、局部、层次式的网络管理与调度演进至人、机、物融合的三元网络协同管理,支持边缘智能和适配优化,实现全网资源的多级协同调度。我们需要针对人、机、物融合要素的多样性,研究基于通信协议特征分析的接入融合技术、基于无线信道状态的跨协议融合技术;针对人、机、物融合的资源不确定性,研究资源的需求感知和预测技术,基于边缘智能的资源管理策略,实现协同通信、协同计算、协同存储,提高服务质量。B5G网络需要满足更加多样化的业务需求,同时无线环境、业务环境、网络环境将更加复杂,因此需要研究基于智能推荐的网络适配机理和组网技术。

(2)基于人工智能的移动网络架构。

如果通信网络缺乏对大数据的科学利用,那么它是无法满足智能时代的需求的。目前,业务、网络和服务融合体系缺乏对多维度数据的共享与合理利用,导致业务网络无法自主依据不同类型业务的流量选择路径和调整带宽分配模式,不能满足智能时代用户的需求。人工智能技术的突破是网络智能优化的重要技术基础,同时,软件定义网络(SDN)技术的发展为网络智能优化提供了海量基础数据与架构支持^[29]。如何利用软件定义的可定制特性,设计一套新的业务网络是未来无线网络亟待解决的关键问题。未来异构无线网络拓扑复杂多变,如何高动态地采集网络信息并大规模合理布置SDN控制器,对于网络整体性能至关重要。目前SDN协议中流量基本特征较少,流量识别困难,有必要研究流量自身的统计特征、标量特征,基于业务特征提取的高级特征,设计新的深度学习识别算法,为实现网络资源智能分配提供依据。网络中存在大量的历史数据,业务网络应自主学习资源分配模式,实时动态地加载最优的业务调度方案,充分发挥SDN动态应用策略和管理网络的能力。基于人工智能技术实现软件定义的业务网络是一种崭新的视角,其研究对于未来机器学习和网络发展具有重大的科学意义。未

来业务网络与物联网的发展急需人工智能技术提升服务能力和效率。

(3) 认知增强与决策推演的智能定义网络架构。

人工智能技术通过自学习状态和特征从而不断迭代优化输出结果,为解决复杂多变的未来 B5G 网络服务提供了新的解决思路;因此,迫切需要针对 B5G 网络面向认知增强与决策推演的智能定义网络基础理论开展研究工作,基于人工智能技术,使未来 B5G 网络自主认知网络环境变化以及服务特性,智能调度网络计算、缓存、带宽等资源,实现资源融合的动态决策推演,不断优化网络资源的适配与管理,持续改善网络服务质量。未来网络下的用户行为个性化,服务需求多样化,网络拓扑频繁变化,而传统网络中服务请求处理缺乏灵活性,数据传输缺乏自适应,导致网络资源浪费。在全面感知网络海量信息的基础上,利用人工智能技术深度挖掘用户、服务及网络之间的关联关系,建立面向服务特征—用户特性—网络环境的质量评估机制,并对网络中动态变化的多维信息进行快速、准确的预测,为资源融合的网络动态决策提供立体化的认知信息。此外,未来网络环境动态复杂,而传统网络中路由、缓存等策略静态僵化,导致网络资源与用户服务适配困难。在海量信息和动态变化的环境下,利用人工智能技术对立

体化的认知信息进行融合,对网络资源分布情况与变化规律进行动态建模分析,并结合集中管控的思想,实现网络中路由、缓存等策略的自适应推演。智能协调不同用户的服务需求,提高用户个性化服务体验质量,深度优化网络资源调配,提高网络资源利用率。同时,依据业务的服务质量、网络能力等需求,基于增强学习等人工智能技术,构建网络功能和服务等资源的编排调度方案;生成网络需求、演进态势、协同策略等相关规则,对网络资源调度有效性进行自主评估,获取正向的资源调度柔性进化方案,以最大化网络的效能和可靠性。

4 结束语

B5G 是一个泛在信息融合网络。与已实现的通信系统相比,B5G 的数据速率达到太比特每秒量级,适用场景涵盖陆海空天,并且其网络的智能化水平进一步提升。得益于软硬件提升带来的大数据及 AI 技术的潜力释放,AI 将为 B5G 关键技术实现提供新思路。在物理层,采用基于学习理论的干扰管理、调制、信道估计波束赋形技术;在传输层,基于极化编码技术将会进一步提升传输效率;而在网络层,采用基于人机物融合、人工智能及机器学习等方式的新架构,进一步提升网络整体效率。B5G 的关键技术储备正日趋完善,实现的时间也将离我们越来越

接近。

参考文献

- [1] 彭小平. 第一代到第五代移动通信的演进[J]. 中国新通信, 2007, 9(4): 90-92. DOI:10.3969/j.issn.1673-4866.2007.04.030
- [2] 曹淑敏. 第二代移动通信向第三代移动通信的演进[J]. 中兴新通讯, 1999, 5(4): 30-32
- [3] 尤肖虎, 曹淑敏, 李建东. 第三代移动通信系统发展现状与展望[J]. 电子学报, 1999, 27(21): 3-8. DOI:10.3321/j.issn:0372-2112.1999.21.002
- [4] 张平. Beyond 3G 移动通信系统关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2002, 25(3): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1007-5321.2002.03.001
- [5] 张平. WCDMA 移动通信系统[M]. 2004
- [6] 谢显中. TD-SCDMA 第三代移动通信系统技术与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [7] 黄标, 彭木根, 王文博. 第三代移动通信系统干扰共存研究[J]. 电信科学, 2004, 20(7): 34-39. DOI:10.3969/j.issn.1000-0801.2004.07.008
- [8] 刘海文, 李征帆. 第四代移动通讯技术的构架及其关键技术[J]. 微电子学与计算机, 2002, 19(3): 34-39
- [9] SAMPATH H, TALWAR S, TELLADO J, et al. A Fourth-Generation MIMO-OFDM Broadband Wireless System: Design, Performance, and Field Trial Results [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 143-149. DOI:10.1109/mcom.2002.1031841
- [10] 任立刚, 宋梅, 乔强国, 等. MIMO+OFDM: 新一代移动通信核心技术[J]. 中国数据通信, 2003, 5(10): 102-105. DOI:10.3969/j.issn.1673-4866.2003.10.023
- [11] 何琳琳, 杨大成. 4G 移动通信系统的主要特点和关键技术[J]. 无线电技术与信息, 2005 (1): 34-36
- [12] 李钊, 韦玮. 第四代移动通信系统中的多天线技术[J]. 电子技术, 2005, 34(12): 39-42
- [13] BOUDREAU G, PANICKER J, GUO N, et al. Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(4): 74-81. DOI:10.1109/mcom.2009.4907410
- [14] 余莉, 张治中, 程方, 等. 第五代移动通信网络体系架构及其关键技术[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(4): 427-433, 560. DOI:10.3979/j.issn.1673-825X.2014.04.001
- [15] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G Be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082. DOI:10.1109/JSAC.2014.2328098
- [16] 赵国锋, 陈婧, 韩远兵, 等. 5G 移动通信网络关键技术综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(4): 441-452. DOI:10.3979/j.issn.1673-825X.2015.04.003
- [17] 雷秋燕, 张治中, 程方, 等. 基于 C-RAN 的 5G 无线接入网架构[J]. 电信科学, 2015, 31(1): 106-115. DOI:10.11959/j.issn.1000-0801.2015028
- [18] 贾亚男, 岳殿武. 面向 5G 的小蜂窝网络研究综述[J]. 电讯技术, 2015, 55(11): 1296-1303. DOI:10.3969/j.issn.1001-893X.2015.11.019
- [19] IMT-2020(5G)推进组发布 5G 技术白皮书[J]. 中国无线电, 2015(5): 1-15
- [20] GUPTA A, JHA R K. A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies [J]. IEEE Access, 2015, 3: 1206-1232. DOI:10.1109/

- access.2015.2461602
- [21] 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. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2016130
- [22] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617–1655. DOI:10.1109/comst.2016.2532458
- [23] ITU–R. ITU–R: IMT Vision–Framework and overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond: Recommendation ITU–R M.2083-0[R]
- [24] FRICKE A, KUMER T. Interference Study for THz Intra–Device Communication Systems with Multiple Links[C]//12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London: EuCAP, 2018:1–5
- [25] RAIMUNDO X, HAJJI M, KLEIN A, et al. Channel Characterisation at THz Frequencies for High Data Rate Indoor Communications[C]//12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London: EuCAP, 2018:1–2
- [26] POMETCU L, D'ERRICO R. Characterization of Sub–THz and mmwave Propagation Channel for Indoor Scenarios[C]//12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London: EuCAP, 2018:1–2
- [27] GONZALEZ–GUERRERO L, SHAMS H, FATADIN I, et al. Comparison of Optical Single Sideband Techniques for THz–Over–Fiber Systems [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9 (1): 98–105. DOI:10.1109/tthz.2018.2884736
- [28] 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. DOI:10.1109/tmc.2018.2859395
- [29] LYU X, REN C, NI W, et al. Multi–timescale Decentralized Online Orchestration of Software–Defined Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(12):2716–2730. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2871310

作者简介



张平, 北京邮电大学教授、博士生导师, 网络与交换技术国家重点实验室主任, IEEE Fellow, 《通信学报》主编; 长期从事先进移动通信系统的研究与实践; 多次获国家技术发明奖、国家科技进步奖、光华工程科技奖、何梁何利基金科学与技术奖等; 出版专著 10 部, 发表论文 352 篇, 获授权发明专利 278 项。

← 上接第 28 页

- [22] HUSSAMI N., KORADA S. B., URBANKE R. Performance of Polar Codes for Channel and Source Coding [C]//2009 IEEE International Symposium on Information Theory, 2009. USA: IEEE, 2009: 1488–1492. DOI:10.1109/ISIT.2009.5205860
- [23] NIU K, CHEN K, LIN J R. Low–Complexity Sphere Decoding of Polar Codes Based on Optimum Path Metric [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(2): 332–335. DOI:10.1109/lcomm.2014.010214.131826
- [24] CHEN K, NIU K, LIN J R. An Efficient Design of Bit–Interleaved Polar Coded Modulation [C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013. USA: IEEE, 2013: 693–697. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666225
- [25] Qualcomm. LDPC Rate Compatible Design Overview: 3GPP TSG R1–1610137[S]. Portugal, 2016
- [26] NIU K, CHEN K, LIN J R, et al. Polar Codes: Primary Concepts and Practical Decoding Algorithms [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 192–203. DOI: 10.1109/mcom.2014.6852102
- [27] ARIKAN E, TELATAR E. On the Rate of Channel Polarization [C]//2009 IEEE International Symposium on Information Theory, 2009. USA: IEEE, 2009: 1493–1495. DOI:10.1109/ISIT.2009.5205856
- [28] KORADA S B, SASOGLU E, URBANKE R. Polar Codes: Characterization of Exponent, Bounds, and Constructions [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(12): 6253–6264. DOI:10.1109/tit.2010.2080990
- [29] 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. DOI:10.1109/tsp.2017.2786273

- [30] DAI J C, NIU K, LIN J R. Polar–Coded MIMO Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 6170–6184. DOI:10.1109/tvt.2018.2815602

作者简介



牛凯, 北京邮电大学教授、中国电子学会信息论分会副主任委员; 主要研究方向为信息论与信道编码, 在极化码的高性能译码算法以及实用化构造方面, 取得了诸多开创性成果, 设计的极化码高性能编译码算法成为 5G 标准主流方案; 先后主持多项国家自然科学基金项目与“863”项目; 发表论文 200 篇, SCI 检索 45 篇。