6G 研究白皮书

6G 无线网络:愿景、使能技术与新应用范式

2020年8月14日

编写说明

编写作者:

尤肖虎^{1,2}, 王承祥^{1,2}, 黄杰^{1,2}, 高西奇^{1,2}, 张在琛^{1,2}, 汪茂^{1,2}, 黄永明^{1,2}, 张川^{1,2}, 蒋雁 翔^{1,2}, 王家恒^{1,2}, 朱敏^{1,2}, 盛彬^{1,2}, 王东明^{1,2}, 潘志文^{1,2}, 朱鹏程^{1,2}, 杨旸^{3,4}, 刘泽宁³, 张平⁵, 陶小峰⁶, 李少谦⁷, 陈智⁷, 马新迎⁷, 易芝玲⁸, 韩双峰⁸, 李可⁸, 潘成康⁸, 郑智 民⁸, Lajos Hanzo⁹, 沈学民¹⁰, 郭英杰¹¹, 丁志国¹², Harald Haas¹³, 童文¹⁴, 朱佩英¹⁴, 杨 刚华¹⁵, 王俊¹⁶, Erik G. Larsson¹⁷, Hien Quoc Ngo¹⁸, 洪伟^{19,2}, 王海明^{19,2}, 侯德彬^{19,2}, 陈 继新^{19,2}, 陈喆^{19,2}, 郝张成^{19,2}, 李烨²⁰, Rahim Tafazolli²¹, 高跃²¹, H. Vincent Poor²², Gerhard P. Fettweis²³, 梁应敞²⁴

参与单位:

1东南大学,信息科学与工程学院,移动通信国家重点实验室,南京 210096,中国 ²紫金山实验室,南京 211111,中国 ³上海科技大学,上海雾计算实验室(SHIFT),上海 201210,中国 4.鹏城实验室,网络通信研究中心,深圳 518000,中国 5北京邮电大学,网络与交换技术国家重点实验室,北京 100876,中国 6北京邮电大学,移动互联网安全技术国家工程实验室,北京 100876,中国 7电子科技大学,通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 611731,中国 8中国移动研究院,北京 100053,中国 ⁹南安普敦大学,电子与计算机科学学院,南安普敦 SO17 1BJ,英国 ¹⁰ 滑铁卢大学, 电气与计算机工程系, 滑铁卢 ON N2L 3G1, 加拿大 ¹¹ 悉尼科技大学,全球大数据技术中心,悉尼 NSW 2007,澳大利亚 ¹² 曼彻斯特大学, 电气与电子工程学院, 曼彻斯特 M13 9PL, 英国 ¹³爱丁堡大学,工程学院,数字通信研究所,Li-Fi研发中心,爱丁堡 EH9 3JL,英国 ¹⁴加拿大华为技术有限公司, 渥太华 K2K 3J1, 加拿大 15上海华为技术有限公司,上海 201206,中国 16杭州华为技术有限公司,杭州 310007,中国 17林雪平大学, 电气工程系, 林雪平 581 83, 瑞典 ¹⁸贝尔法斯特女王大学, 电子、通信与信息技术研究所 (ECIT), 贝尔法斯特 BT3 9DT, 英国 19东南大学,信息科学与工程学院,毫米波国家重点实验室,南京 210096,中国 ²⁰佐治亚理工学院, 电气与计算机工程学院, 亚特兰大 GA 30332, 美国 ²¹ 萨里大学, 5G 创新中心, 古尔福德 GU2 7XH, 英国 ²² 普林斯顿大学, 普林斯顿 NJ 08544, 美国 ²³德累斯顿工业大学, Vodafone Chair Mobile Communications Systems, 德累斯顿 01069, 德国 ²⁴ 电子科技大学,智能网络与通信研究中心 (CINC),成都 611731,中国

编者注:本文主体内容源于 YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. Sci China Inf Sci, vol. 64, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11432-020-2955-6.

前言

自 2020 年起,第五代(5G)无线通信网络开始在全球范围内大规模部署, 更多的关键能力正在标准化的进程中,例如大规模连接、高可靠性和有保障的低 时延。但是,5G并不能满足 2030 年及之后的未来网络需求,第六代(6G)无线 通信网络的研究正在全球兴起。

与 5G 无线通信网络相比, 6G 无线通信网络期望引入新的性能指标与应用 场景,例如提供全球覆盖、更高的频谱/能量/成本效率、更高的智能化水平与安 全性等。为了满足这些需求, 6G 无线通信网络将依赖于新的使能技术,并将出 现新的四大范式转换。新颖的空口与传输技术、网络架构至关重要,包括波形设 计、多址接入、信道编码、多天线技术、软件定义网络、网络功能虚拟化以及云 /雾/边缘计算等。四大范式转换可以概括为"全覆盖、全频谱、全应用、强安全"。 为了满足全球覆盖的需求,6G 无线通信网络将不仅仅局限于陆地无线通信网络, 需要通过卫星、无人机(UAV)等非陆地网络作为有效补充,构建空天地海一体 化网络。全频谱资源将被充分挖掘来进一步提升数据传输速率和连接数密度,包 括 sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段。由于超异构网络、多种通信场景、大 量天线单元、大带宽、新的服务需求的出现将产生海量数据,6G 将借助人工智 能与大数据技术实现一系列智能化应用。网络安全在建设 6G 网络之初就要被考 虑在内并加强,称为强安全或内生安全。

基于上述研究背景,由紫金山实验室首席科学家、东南大学移动通信国家重 点实验室主任尤肖虎教授领衔,紫金山实验室、东南大学移动通信国家重点实验 室、国家特聘专家王承祥教授负责组织起草,联合紫金山实验室、东南大学、上 海科技大学、北京邮电大学、电子科技大学、中国移动研究院、华为等国内优势 科研院校及公司,并邀请英国南安普敦大学、曼彻斯特大学、爱丁堡大学、贝尔 法斯特女王大学、萨里大学、加拿大滑铁卢大学、澳大利亚悉尼科技大学、瑞典 林雪平大学、美国佐治亚理工学院、普林斯顿大学、德国德累斯顿工业大学等国 际知名大学的顶尖学者参与编写,最终完成本文的英文版文稿,被《中国科学: 信息科学》录用并在线发表,将于 2021 年 1 月正式刊出。为便于国内 6G 无线 通信网络领域的研究团队与从业人员参考,特将原英文文稿整理后翻译成本中文 文稿。

全文总共分为六个章节。在第一章 6G 无线通信网络的发展背景中,介绍了 5G 的局限性、6G 的需求与 6G 的发展愿景;第二章展示了 6G 无线通信网络的 性能指标、应用场景与垂直行业应用示例;第三章详细介绍了 6G 无线通信网络 的多种使能技术,包括空口与传输技术、新的网络架构;6G 新的范式转移,即

-I-

全覆盖、全频谱、全应用、强安全在第四章介绍;最后,第五章对全文做出总结。 同时,在第六章附录部分给出英文缩略词对照表。

目录

前言	ī		I
目录	Ļ		III
图目	录		V
表目	录		VI
-,	6G 无线通	通信网络的发展背景	1
<u> </u>	6G 性能指	旨标、应用场景和垂直行业应用示例	5
	2.1 6G 性i	能指标和应用场景	5
	2.2 垂直征	亏业应用示例	8
	2.2.1	云虚拟现实	8
	2.2.2	物联网工业自动化	10
	2.2.3	蜂窝车联网	11
	2.2.4	数字孪生体域网	13
	2.2.5	高能效无线网络控制与联邦学习系统	15
三、	6G 使能拐	专术	17
	3.1 6G 空	口与传输技术	17
	3.1.1	新的波形设计	17
	3.1.2	多址接入	19
	3.1.3	信道编码	20
	3.1.4	无蜂窝大规模 MIMO	24
	3.1.5	动态智能频谱共享与接入	25
	3.1.6	基于区块链的无线接入网络	26
	3.1.7	光子定义无线电	27
	3.1.8	关键任务 uRLLC	29
	3.2 6G 网络	络架构	
	3.2.1	软件定义网络/网络功能虚拟化	
	3.2.2	网络切片及其演进	34
	3.2.3	基于服务的网络架构及其演进	35
	3.2.4	认知服务架构	36
	3.2.5	深度边缘节点和网络(DEN ²)	37
	3.2.6	无蜂窝架构	
	3.2.7	云/雾/边缘计算	41

四、	6G	新的范式转变	45
	4.1	全覆盖: 空天地海一体化网络	45
		4.1.1 卫星通信网络	45
		4.1.2 无人机通信网络	46
		4.1.3 海洋机器类通信网络	48
		4.1.4 空天地海一体化网络	50
	4.2	全频谱: Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段	53
		4.2.1 Sub-6 GHz 频段	53
		4.2.2 毫米波频段	54
		4.2.3 太赫兹频段	55
		4.2.4 光频段	58
		4.2.5 5G及5G之后的信道测量与模型	60
	4.3	全应用: AI 使能的无线通信网络	65
		4.3.1 AI 及机器学习技术概述	65
		4.3.2 物理层应用	66
		4.3.3 上层应用	
		4.3.4 资源分配应用	69
		4.3.5 智能内生网络(IEN)	71
		4.3.6 面向 6G 的信息、通信与数据技术融合	72
	4.4	内生安全	74
		4.4.1 现状和主要问题	74
		4.4.2 6G 中的网络安全隐患问题	77
		4.4.3 6G 网络安全和隐私问题的可能对策	78
五、	总约	结与展望	81
六、	附表	₹	83
	6.1	缩略语	83
参考	令文南	试	92

图目录

图 1 6G 无线通信网络的发展愿景	3
图 2 6G 无线通信网络概述	3
图 3 6G 本文结构	4
图 4 6G 无线通信网络的性能指标	5
图 5 6G 无线通信网络的应用场景	7
图 6 5G 与 6G 关键性能指标、应用场景需求比较	7
图 7 云虚拟现实的参考架构 ^[17]	9
图 8 基于 ICDT 的 C-V2X 架构	12
图 9 基于数字孪生体域网的疫情管理原理图	14
图 10 传统移动通信与人体、体表、体内微观移动通信之间的关联 ^[43]	15
图 11 OTFS 的发射端与接收端	18
图 12 并行级联码的编码和解码	22
图 13 串行级联码的编码和解码	23
图 14 三级串行级联码的编码和解码	23
图 15 基于区块链的无线网络示意图	27
图 16 直接光-太赫兹和太赫兹-光转换图	28
图 17 软件定义网络架构的高层次概述	31
图 18 网络功能虚拟化架构的高层次概述	33
图 19 网络切片的概念框架 ^[187]	34
图 20 5G 核心网基于服务的网络架构 ^[192]	36
图 21 DEN ² 架构示意图	38
图 22 无蜂窝大规模 MIMO 的系统模型	40
图 23 基于软件定义网络的无蜂窝架构 ^[202]	40
图 24 使能任何时刻、任何地点、任意物体间智能服务的融合云、雾、边缘计算技术的多	多层计
算网络架构	43
图 25 陆地和卫星无线通信网络的融合	46
图 26 用于以服务为中心和软件定义网络的海洋机器类通信网络功能概述与拓扑结构[248]	[]] 49
图 27 海洋机器类通信的国际频谱分配 ^{[247][250]}	50
图 28 空天地海一体化网络的控制架构	51
图 29 芯片与片上天线的显微照片	57
图 30 (a) 1.6 米距离时商用现成品红色 LED 的信噪比和比特载入模式。在 900 MHz-1 G	Hz之
间仍能实现二进制相移键控,远高于设备带宽;(b) 波分复用系统不同颜色(红、绿、	、蓝、
黄)的信道增益 ^[274]	59
图 31 使用小型 LED 的水下通信系统 ^[289]	60
图 32 用于物理层通信的深度学习辅助的贝叶斯最佳估计器	67
图 33 基于深度强化学习和物理层模型的网络优化框架	69
图 34 虚拟车联网示意图	70
图 35 智能内生网络的自我进化闭环结构	72

表目录

表 1	工业物联网用例与需求 ^[29]	11
表 2	英文缩略词对照表	83

一、6G 无线通信网络的发展背景

自 2020 年起,第五代(5G)无线通信标准化工作进入尾声并开始在全球部署。5G 的三大应用场景包括增强型移动宽带(eMBB)、大规模机器类通信(mMTC)与高可靠低时延通信(uRLLC)。5G 的关键性能指标(KPI)包括 20 Gbps 的峰值速率、0.1 Gbps 的用户体验速率、1 ms 端到端时延、500 km/h 的移动速度支持、每平方千米 100 万设备的连接数密度、10 Mbps/m²的流量密度、3 倍于第四代(4G)无线通信系统的频效,以及 100 倍于 4G 的能效。业界已提出了多种关键技术来达到 5G 的性能指标,例如毫米波(mmWave)、大规模多输入多输出(MIMO)、超密集网络(UDN)等^[1]。

但是,5G将不能满足2030年之后的未来网络需求。研究人员开始着眼于第 六代(6G)无线通信网络的研发。5G的一个显著特点是低时延,更准确地说是 保障/确定性时延,这需要通过确定性网络(DetNet)来保障未来用例需求的准时、 准确的端到端时延。6G 对时间和相位同步的精确度提出了更多更高的需求,这 是 5G 所不能满足的。除此之外, 6G 还将提供接近 100%的全球覆盖、亚厘米级 的定位精度和毫秒级的定位更新速率以满足未来应用需求。由于 5G 网络仅局限 于一些典型场景,某些偏远地区还不能很好地覆盖,限制了无人驾驶等应用。非 陆地网络,特别是卫星通信网络,由于其成本低、无缝接入、泛在服务能力的优 势,可以作为陆地网络的有效补充。无人机通信网络由于其快速响应的特点,在 严酷艰难的环境中尤为重要。海洋通信网络可以为船只提供高质量的通信服务。 5G 毫米波可以提供 Gbps 级的数据传输速率,但对于高质量三维(3D)视频、 虚拟现实(VR)、虚拟现实与增强现实(AR)混合等应用,需要 Tbps 级的数据 传输速率,太赫兹(THz)和光频段将是可用的候选频段。由于面临大量天线单 元、大带宽、新的服务需求产生的海量数据,6G网络需要借助人工智能(AI) 与机器学习(ML)算法,实现一系列智能应用。网络自动化将在多个方面进一 步提升网络的性能,例如服务质量(QoS)、用户体验质量(QoE)、安全性、故 障管理、能效等方面。

直到 5G 时代,网络流量仍然以视频或流媒体应用为主。除了上面提及的应用和需求,以 5G 触觉互联网应用^[2]为代表的类机器人对象的无线网络控制(例如自动驾驶或工厂物流)将成为无线技术新的重要应用领域,但同时面临诸多挑战。当分析由这些应用产生的网络流量时,许多移动终端必须共享传感与控制信息,这给中央式控制系统带来了巨大负担。目前,基于 AI 的分布式控制系统正受到越来越多关注,其中联邦学习被认为是一种可行的方法,数据集相关算法分布于移动终端上,聚合学习在云端完成。这一应用产生了一类全新的网络流量,

具有大带宽和极其多样的时延需求。这类应用以及相关的 AI 应用将很有可能主导 6G 的网络流量需求。这是一片未知的探索领域,机遇与挑战并存!

与5G网络相比,6G无线通信网络有望提供更高的频谱/能量/成本效率、更高的传输速率(Tbps级)、10倍以上的更低时延、100倍以上的连接数密度、全自动的更高智能化水平、亚厘米级的定位精度、接近100%的覆盖率,以及亚毫秒级的时间同步。新的空口与传输技术对于获得高频效和高能效十分必要,这包括新的波形设计、多址接入方式、信道编码方案、多天线技术,以及这些技术的有机结合。同时,需要设计新的网络架构,例如软件定义网络(SDN)/网络功能虚拟化(NFV)、动态网络切片、基于服务的网络架构(SBA)、认知服务架构(CSA)以及无蜂窝架构等。

另一方面,软件化伴随着相应的代价,正如我们从 5G 部署所得知的一样。 商用现成品(COTS)服务器的使用与虚拟化无线接入网(RAN)中的特定领域 芯片带来了能量消耗的大幅增加,由此需要更为高能效的新对策。虽然 5G 网络 消耗的能量多于 4G 网络,但是提供了更大的带宽,从而使得 5G 传输单位数据 使用的能耗小于 4G。因此,新一代无线网络的能耗不应超过上一代的能量需求。 为此,6G 需要新的计算范式来获得软件化的所有优点而不增加总体能量消耗。

以云计算、雾计算、边缘计算为代表的计算技术对于保障网络韧性、分布式 计算与处理能力、低时延与时间同步十分重要。为了解决 5G 包括短包缺陷在内 的限制,提供高可靠性、低时延、高传输速率服务、系统覆盖率、万物互联(IoE) ^[3],满足 2030 年及之后的移动通信需求^[4],6G 网络必须将以人为中心作为发展 愿景^[5],而非以机器、应用或数据为中心。为了满足这些需求,6G无线通信网络 将会产生新的范式转换。我们对于 6G 网络的发展愿景如图 1 所示。首先, 6G 无 线通信网络将会是空天地海一体化网络,用于提供深度全球覆盖。卫星通信、无 人机通信、海洋通信将极大扩展无线通信网络的覆盖范围。为了提供更高的数据 传输速率,包括 sub-6 GHz 频段、毫米波、太赫兹、光频段在内的全频谱资源将 会被充分挖掘。为了实现全应用愿景, AI 与机器学习技术将与 6G 无线通信网络 高效融合以实现更好地网络管理与自动化。此外 AI 技术可以实现网络、缓存、 计算资源的动态调配以提高下一代网络的性能。还有一个重要趋势是强安全或内 生安全,包括物理层与网络层安全,这在构建网络之初就要考虑。垂直行业应用, 诸如云虚拟现实、物联网工业自动化、蜂窝车联网(C-V2X)、数字孪生体域网, 以及高能效无线网络控制与联邦学习系统将极大促进 6G 无线通信网络的发展。 6G 无线通信网络概述如图 2 所示,图中给出了 6G 的各种性能指标、应用场景、 使能技术、新的范式转换,以及垂直行业应用。

-2-



图 2 6G 无线通信网络概述

本文的结构如图 3 所示。第一章介绍了 5G 的局限性、6G 的需求与 6G 的发展愿景。第二章展示了 6G 无线通信网络的性能指标、应用场景与垂直行业应用示例。第三章给出了 6G 无线通信网络的多种使能技术,包括空口与传输技术、

新的网络架构。6G 新的范式转移,即全覆盖、全频谱、全应用、强安全将在第 四章介绍。第五章做出总结。

第一章: 6G无线通信网络的发展背景							
5G的局限性 → 6G的需求及愿景							
第二章:6G性能指标、应用场景和垂直行业应用示例							
5G 需求 → 6G 性能指标和应用场景							
垂直行业	云虚拟现实	物联网工业自动化	蜂窝车联网				
数字孪生体域网 高能效无线网络控制和联邦学习系统							
	第三章:6G	使能技术					
空口与传输技术			网络架构				
新波形 多址接入 信道编码	无蜂窝大规模	软件定义网络/	基于服务的 网络切片	片			
动态智能 基于区块 光子定		网络切能虚拟化	一 网络架构 无蜂窝				
频谱共享 链的尤线 又尤线 与接入 接入网络 电	uRLLC多 连接技术	徐度辺缘节 点和网络	云/务/辺 缘计算	J			
第四章:6G新的范式转变							
全覆盖	è频谱	全应用	强安全				
卫星 无人机 海洋 Sub-6 G	Hz 毫米波	AI/机器学习 物理层	是 上层 现状及主要问	题			
空天地海一体化网络 太赫兹	光频段	资源分配 智能内望	生网络 6G网络安全	È			
信道测量和模型 信息、通信与数据技术融合 6G可能对策							
第五章:总结与展望							

图 3 6G 本文结构

二、6G性能指标、应用场景和垂直行业应用示例

2.1 6G 性能指标和应用场景

与 5G(IMT-2020)^[6]相比, 6G 无线通信网络具有更多的性能指标,如图 4 所示。5G 的峰值速率为 20 Gbps,而 6G 由于太赫兹和光频段的使用,其峰值速率可以达到 1-10 Tbps。用户体验速率在这些高频段可以达到 Gbps 级别。流量密度可以超过 1 Gbps/m²。频谱效率可以提高 3-5 倍,而能量效率将比 5G 提高 100 倍以上,从而使系统在能耗不变的情况下将数据传输速率提高 100 倍,通过应用AI 技术可以实现更好的网络管理和自动化,以实现上述愿景。由于异构网络、多种通信场景、大量天线单元和大带宽的使用,6G 的连接数密度将增加 1000 倍。为了应对卫星、无人机和超高铁等高移动性场景,6G 支持的移动速度将远高于500 km/h。对于某些特定的应用场景,端到端时延预计小于 1 ms。此外,还应引入其他重要的性能指标,例如成本效率、安全容量、覆盖范围、智能化程度^[7],用于全面评估 6G 无线通信网络的性能。



图 4 6G 无线通信网络的性能指标

作为比较,贝尔实验室在 2019 年 3 月提出了一些 6G 的可能关键性能指标。 其中峰值速率预计将超过 100 Gbps。用户体验速率为 1-10 Gbps。连接数密度可 以达到每平方千米 1000 万设备。时延预计小于 0.3 ms,能效预计为 5G 的 10 倍, 流量密度预计为 5G 的 10000 倍。其他性能指标包括 10 cm 级的室内定位精度和 1 m 级的室外定位精度、6 个 "9"(99.9999%)的可靠性等。在文献[8]中,作者 提出的 6G 关键性能指标为: >1 Tbps 的峰值速率、1 Gbps 的用户体验速率、10-100 us 的时延、1000 km/h 的移动速度支持、每平方千米 1000 万设备的连接数密 度,以及 1 Gbps/m² 的流量密度。与 5G 相比,能效将提升 10-100 倍,频率将提 升 5-10 倍。在文献[9]中,作者对 6G 无线通信网络的关键性能指标也提出了类 似的看法。然而,正如第 1 章所述,这些愿景还没有考虑到为实现触觉互联网应 用的无线网络控制系统的分布式 AI 服务所产生的通信数据量和要求达到的性能 指标。对于这一应用领域,业内要在未来几年内对 6G 无线通信网络的设计与规 模有更多的了解,以匹配未来由于这些应用对带宽、时延、可靠性以及网络韧性 提出的需求。

5G主要集中在 eMBB、mMTC 和 uRLLC 三大应用场景,6G 无线通信网络将在很大程度上增强和扩展上述应用场景。文献[8]将增强的三个场景称为进一步增强的移动宽带(feMBB)、超大规模机器类通信(umMTC)和增强的高可靠低时延通信(euRLLC)。其他一些应用场景,例如长距离高移动性通信(LDHMC)和超低功耗通信(ELPC)也很有希望。文献[4]提出的三种场景为泛在移动超宽带(uMUB)、超高速低时延通信(uHSLLC)和超高数据密度(uHDD)。在文献[10]中,除了这三个场景外,作者还展示了其他应用,包括人工智能、移动超宽带和超级物联网。

国际电信联盟(ITU)在 2020年2月发布了 6G 初步研究计划。其 6G 愿景 和技术发展趋势研究预计将于 2023年完成。ITU-T 第 13 研究组在 2018年7月 16-27日于日内瓦举行的会议上成立了 ITU-T 针对 2030年网络技术的焦点组 (FG NET-2030)。该焦点组将研究 2030年及以后的网络能力,预计届时将支持 新的前瞻性方案,如全息式通信、紧急情况下的极快反应以及新兴市场垂直行业 的高精度通信需求。

在 2030 年代, 6G 将广泛支持以人为中心的通信概念,其潜在用例包括可穿 戴设备、集成视听系统、可植入传感器、人文通信、智能汽车、智能制造、工业 4.0 和机器人相关的通信等^{[4][11]}。除了传统的移动通信设备(如移动电话和笔记 本电脑)外,考虑到与健康相关的可穿戴设备,这些新型通信设备使用的发射功 率和频率将受到严格限制。此外由于这些设备将在人体上工作并收集所需数据, 因此在设计时要考虑设备重量和数据的安全性^[4]。

总上所述,我们对 6G 应用场景的愿景是,它将包括增强的三个 5G 应用场 景和其他的新场景,如图 5 所示。对于增强的三个 5G 场景,即 feMBB、umMTC、 muRLLC、MBRLLC 和 ERLLC 场景,6G 无线通信网络的性能将大大提高。6G 还将支持多种潜在的新应用场景,例如:1) 以人为中心的服务,2) 远距离和高

移动性通信,3)超低功耗通信,4)通信、计算、控制、定位和传感的融合,5) 空天地海一体化网络,6)分布式 AI和联邦学习应用,7)远程全息无人系统,8) 生物纳米物联网等^[12]。图6展示了5G和6G关键性能指标和应用场景的比较。



feMBB: further-eMBB; umMTC: ultra-mMTC; muRLLC: massive-uRLLC; MBRLLC: mobile broadband reliable low latency communications; ERLLC: extremely reliable and low latency communications



图 5 6G 无线通信网络的应用场景

图 6 5G 与 6G 关键性能指标、应用场景需求比较

2.2 垂直行业应用示例

5G 无线通信网络已经显示出成为现代信息社会基础设施的可能性。目前已 有一些基于 5G 无线通信网络的潜在垂直行业应用,并将在未来 6G 无线通信网 络进一步深化。在本章节,我们重点介绍在云虚拟现实、物联网工业自动化、C-V2X、数字孪生体域网、高能效无线网络控制和联邦学习系统方面的垂直行业应 用示例。

2.2.1 云虚拟现实

近几年来,虚拟现实技术已经应用于教育、医疗、军事等多个专业领域^{[13]-}^[16]。由于虚拟现实突破了现实世界中的成本和风险限制,提供了身临其境的互动体验,因此它将有可能重塑我们的日常生活和工作。由于虚拟现实是一个计算机生成的世界,因此计算能力是沉浸式体验的关键要求之一。移动虚拟现实以其低廉的价格、小巧的体积和便携性被认为是未来的发展方向。然而,移动虚拟现实设备的处理能力不能满足高保真虚拟现实的要求,这必然导致用户体验不理想。一个理想的虚拟现实系统必须同时满足三个要求:廉价、高质量的图形性能和可移植性。

得益于 5G 和多接入边缘计算(MAEC)技术的发展,云虚拟现实的理念已 经成为一个可接近的目标。图 7 给出了云虚拟现实的参考架构^[17]。我们从 2018 年开始看到电信运营商提供的云虚拟现实服务,如中国移动^[18]、LG Uplus^[19]和中 国电信^[20]。云虚拟现实的流行可以归因于对客户、开发人员和运营商的一些潜在 益处。对于客户来说,云虚拟现实使他们能够随时随地享受高质量的虚拟现实服 务体验而无需购买昂贵的终端设备。对于开发人员来说,云虚拟现实可以通过接 触大量客户和降低移植成本来获得更多回报。对于运营商来说,云虚拟现实是利 用 5G 和多接入边缘计算的主要用例。最重要的是,它可以帮助运营商实现从流 量运营到体验运营,从连接服务到面向云平台和服务的数字化业务转型。

尽管目前已经存在小规模的解决方案,但在迈向 6G 时代的过程中,仍有一些关键的挑战需要解决。我们将几个重要的方面总结如下:首先,云虚拟现实平台需要使用移动边缘计算(MEC)和昂贵的加速器,这导致了较高的投资成本; 其次,云虚拟现实服务需要极低的时延,这是改善客户体验的关键挑战;此外, 云虚拟现实架构有助于研究团体优化处理流程。为解决这些问题,深入了解和探 索现有的学术和产业研发,将有助于将云虚拟现实系统向 6G 方向发展。

一组图形处理器(GPU)应提供渲染服务,以便在商业部署场景中同时为不 同客户运行多个虚拟现实应用程序。为了节省投资成本,必须将多种技术结合起 来才能发挥作用。一般来说,注视点渲染用于提高渲染性能。在云虚拟现实中, 注视点渲染有助于减少云中的计算量,降低传输带宽。文献[21]介绍了通过人眼 跟踪来降低阴影量的方法,通过减少视场来提高中心凹渲染的渲染性能。文献[22] 提出了一种基于模拟器平台 SIGVerse 的云虚拟现实系统,该系统通过使用沉浸 式界面收集人类的注视控制和人际行为。他们的实验揭示了基于注视点渲染的云 虚拟现实系统的有效性。文献[23]对 DeepFovea 进行了实验评估,这是一种人工 智能辅助的中心凹渲染过程,在用户感知质量没有明显下降的情况下,对 RGB 视频实现了 14 倍以上的压缩。研究结果表明,基于深度学习的注视点可以显著 降低渲染负载。



图 7 云虚拟现实的参考架构[17]

为了提供最终的沉浸式体验,降低时延是云虚拟现实系统最大的技术挑战之一。在边缘云服务器上计算帧之后,在通过下行链路的5G网络传输之前,必须 捕获并编码这些帧。为了提高云虚拟现实的效率和用户体验,引入了低时延视频 压缩方案。文献[24]提出了一种优化的编解码器来加速编码过程,通过使用摄像 机位置、目标位置、摄像机与目标之间的距离等渲染信息来降低编码复杂度。实 验结果表明,在不降低图像质量的前提下,可以节省42%的编码时间。文献[25] 通过引入运动估计来探索帧内插的方法。利用图像单应技术进行更好的运动预测, 并引入专门的插值算法进行精确插值。实验结果表明,在整个编码过程中,它们 的速度提高了18%。

从局部渲染到云渲染有不同的渲染管道,就像电影制作的离线渲染管道经历 了不同的进化路径一样。局部渲染过程包括四个阶段:应用、几何处理、光栅化 和像素处理。云渲染过程又多了四个阶段:用户输入捕获和传输、应用、几何处 理、光栅化、像素处理、帧捕获和编码、帧传输以及帧解码和处理。渲染管道中 最慢的进程将成为瓶颈,限制了端到端的系统性能,因此优化云渲染管道的性能 是非常必要的。文献[26]设计了一个虚拟现实框架,将每个框架的前景交互和背 景环境分离。该系统采用了分块渲染的结构,在客户端和服务器端运行,减少了 服务器端的计算量。实验结果表明,该分离结构能够同时满足时延和性能的要求。 文献[27]提出了一种改进的平面地图绘制流水线,以提高性能并降低时延。

综上所述,我们分析了面向 6G 时代的云虚拟现实的需求和挑战,将现有的 云虚拟现实研究分为三类:注视点渲染、低时延渲染和优化渲染流水线。技术的 进步将使云虚拟现实服务成为现实,更多的优化技术将使云虚拟现实服务逐渐走 向盈利。我们相信云虚拟现实将会越来越流行,并最终惠及整个生态系统。

2.2.2 物联网工业自动化

工业 4.0 是工业革命第四阶段的短期目标。与工业革命第三阶段(即利用电 子和信息技术实现制造自动化)相比,工业 4.0 旨在使基于物理信息系统的工业 生产具有显著提高的灵活性、通用性、可用性和效率。作为未来智能制造的愿景, 工业 4.0 将进一步引入信息与通信技术(ICT),例如物联网的集成,并探索工业 制造领域泛在连接服务的优势^[28]。由于对机器类通信和超低时延、高可靠性通信 的高度重视,5G 作为"一体适用"的解决方案与工业 4.0 完美匹配。

然而,由于这种垂直行业的特殊性,也有许多挑战需要考虑,例如,网络性能要求很高的用例的多样性,潜在严重干扰的传播环境的挑战,考虑可能需要无缝集成的待重新开发的城市用地的设施、具体的安全和安保问题以及跨行业术语的障碍。为解决上述问题,建立跨行业共识,工业互联与自动化 5G 联盟(5G-ACIA)于 2018年4月成立。这是一个全球论坛,旨在解决、讨论和评估与工业领域 5G 相关的技术、监管和业务方面的问题。它代表了整个生态系统和所有利益相关者群体,包括运营行业参与者(工业自动化公司、工程公司、生产系统制造商、终端用户等)、ICT 行业(芯片制造商、网络基础设施供应商、移动网络运营商等)、学术界,以及其他群体^[29]。5G-ACIA 定义了利用 5G 技术的智能制造方面的应用领域和典型用例:

- 应用领域:1) 工厂自动化,2) 过程自动化,3) 人机界面和生产IT,4)物流
 和仓储,5) 监控和预测维护。
- 典型用例:1)运动控制,2)控制到控制,3)移动控制面板,4)移动机器人,
 5)大规模无线传感器网络,6)远程访问和维护,7)增强现实,8)闭环过程控制,9)过程监控,10)工厂资产管理。

一个用例可以应用于一个或多个应用领域。第三代合作伙伴计划(3GPP)^[30] 也接受这些定义和相关注解,作为 5G 系统设计的动力,以支持垂直产业。除了 定义用例之外,制定具体的需求,特别是具有挑战性的需求也很重要。表1给出 了一些典型的用例明确的性能要求^[29]。其中,运动控制是工业自动化中最具挑战 性的闭环控制用例之一。作为一种运动控制系统,它用于控制机器上某些部件的 运动/旋转,要求具有超高可靠性和低时延、确定性的通信能力等,某些运动控制用例甚至可能很难用 5G 来实现,因此可以作为 6G 的初始用例。

用例		可靠性	循环时间	典型有效 载荷大小	设备数量	典型服务 区域
运动控制	印刷机	>99.9999%	< 2 ms	20 bytes	>100	$100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 30 \text{ m}$
	机床	>99.9999%	< 0.5 ms	50 bytes	~20	$\begin{array}{c} 15 \text{ m} \times 15 \\ \text{m} \times 3 \text{ m} \end{array}$
	封装机	>99.9999%	< 1 ms	40 bytes	~50	$10 \text{ m} \times 5$ m × 3 m
移动机器 人	协同运动 控制	>99.9999%	1 ms	40-250 bytes	100	< 1 km ²
	视频遥控 器	>99.9999%	10-100 ms	15-150 kbytes	100	< 1 km ²
具有安全 功能的移	装配机器 人/铣床	>99.9999%	4-8 ms	40-250 bytes	4	10 m × 10 m
动控制面 板	移动起重 机	>99.9999%	12 ms	40-250 bytes	2	$\begin{array}{c} 40 \text{ m} \times 60 \\ \text{m} \end{array}$
进程自动化/监控		>99.99%	> 50 ms	可变	10000 t	设备/km ²

表1工业物联网用例与需求[29]

2.2.3 蜂窝车联网

车联网(V2X)是自动驾驶的关键驱动力,在提高道路安全和交通效率方面 有着广阔的前景^[31]。C-V2X 是 3GPP 指定的标准化车联网解决方案,为车对车 (V2V)、车对行人(V2P)、车对基础设施(V2I)和车对云(V2C)提供低时延、 高可靠性和高吞吐量的通信能力。

C-V2X有两个重要版本,即长期演进车联网(LTE-V)和新空口车联网(NR-V)^{[32][33]}。LTE-V 是在 4G 长期演进(LTE)系统的基础上发展起来的,主要为基本的道路安全提供关键信息的传输和交换。NR-V基于 5G 新空口(NR)系统,并经过增强以支持更严格的时延、可靠性和吞吐量要求,适用于先进的车联网应用,如队列、高级自主驾驶、扩展传感器和远程驾驶等。NR-V 的目标是实现 3 ms 或更低的时延、99.999%的可靠性以及 1 Gbps 的扩展传感器信息数据速率。NR-V 满足这些关键性能指标要求的关键技术包括高效的无线资源调度和强大的移动边缘计算能力,已经有较多方法可以优化 PC5 接口上的资源调度^{[34]-[36]}。 3GPP 车联网应用程序已经很好地定义了移动边缘计算架构,移动边缘计算平台(服务器)可以部署在移动蜂窝网络内部,也可以部署在与移动蜂窝网络连接的

路边,这取决于商业模式和相关政策。在移动边缘计算的帮助下,C-V2X能够支

持自主车辆的协同感知、协同计算和协同决策。分布式传感器数据计算中的计算 任务卸载策略已经得到了广泛的研究。

随着 AI 的加速渗透,自主功能和车辆智能化水平必将提高。下一代 C-V2X 应提供系统解决方案,以支持智能运输系统(ITS)关键参与者之间的合作,并 应将其基本能力从信息传递扩展到端到端的信息处理,包括信息获取、传递、计 算、存储、安全、共享,以及利用率。在文献[37]中报告了一些技术挑战和解决 方案。此外,还需要进一步解决以下问题。

(1) 基于 ICDT 的 C-V2X 体系结构和空口

基于信息、通信和数据技术(ICDT)的 C-V2X 体系结构是一种蜂窝网络体系结构,具有完全虚拟化的网络资源(通信资源、计算资源和存储资源),可被灵活地调度用于 C-V2X 通信、计算和数据存储。网络内部的所有 C-V2X 功能都是根据驾驶需求动态生成的。

图 8 给出了具有多级分布式架构的 C-V2X 功能的范围。该架构指出了云、 网络、边缘和移动设备的集成趋势。C-V2X 应用程序的网络资源、数据和功能是 全局控制的。控制节点和计算节点包括中心节点和分布式节点。



接入节点,即基站(BS)或路边单元,负责网络接入。未来的C-V2X体系 结构应该支持确定性传输,此外还应该增强时延、可靠性和吞吐量的性能。同步 是前提,为了使装备有多个雷达、激光雷达、摄像机和其他传感器的车辆能够协 同感知,一些接入节点应该具有多个功能,即定位、感知和同步。高精度定位是 C-V2X的一个关键问题,所有这些功能都应该在 V2X 应用中公开。

未来的 C-V2X 可能会引入大规模 MIMO、毫米波、可见光通信(VLC)和 太赫兹通信技术,以支持其参与者之间的合作。这些新技术不仅提高了传输性能, 还提供了定位、传感和三维成像能力。因此,为了简单起见,未来的 C-V2X 空 口应该设计成统一的无线波形。

-12-

(2) C-V2X 技术验证和测试

全球已经进行了大量的 C-V2X 的试验工作。但是在测试场景中,对于典型 的 V2X 用例,测试 C-V2X 的功能和性能仍然是一项困难的工作^[38]。数字孪生映 射技术提供了系统在其生命周期中的虚拟表示,成为开发成基于 C-V2X 的自动 驾驶测试的良好方法。利用数字孪生映射技术,在虚拟仿真试验环境的基础上, 可实现虚拟复杂道路环境下的真实自动驾驶车辆试验。实际上,基于云计算和边 缘计算的实时协同感知,自主车辆可以构建一个虚拟驾驶环境,作为真实道路环 境的数字孪生映射。所有驾驶行为的决定都是在数字孪生环境下做出的。

(3) C-V2X 的新频谱

文献[39]研究了 C-V2X 侧链通信对自主驾驶的频谱要求。在 NR-V 系统中, 广播模式用于状态信息和环境信息的传递,群播模式则用于自主驾驶中的协商和 决策信息。广播的频谱要求至少为 30-40 MHz,而群播的要求可以忽略不计。如 前所述,使用大规模 MIMO 技术的毫米波、可见光和太赫兹通信可为 C-V2X 引 入丰富的新频谱资源,对这些潜在的 C-V2X 技术的频谱需求评估有待进一步的 研究。

2.2.4 数字孪生体域网

2016-2018年, Gartner 连续三年将数字孪生列为十大战略技术发展趋势,并 认为数字孪生将产生颠覆性创新。西门子、达索、PCT、ESI 等跨国企业都开始 涉足数字孪生。达索、海信等公司尝试利用该技术实现人体运行机制和医疗设备 的动态监测与仿真,加快药物研发、疫情预测与跟踪等。2019年,首届 6G 峰会 也提出"设备连接感官和运动控制,数字世界和物理世界相互交织",设备和周 边网络基础设施监测健康状况^[40]。

在目前的网络条件下,数字技术主要用于宏观物理指标的监测和显性疾病的 防治。实时性和准确性有待进一步提高。随着 6G 技术的应用,以及生物科学、 材料科学、生物电子医学等交叉学科的进一步成熟,未来有望实现一个完整的"人 体数字孪生体",通过大量智能传感器(>100 台/人)在人体内的广泛应用,精确 地执行重要器官、神经系统、呼吸系统、泌尿系统、肌肉骨骼、情绪状态等实时 "图像映射"形成整个人体虚拟世界的精确复制,实现对人体个性化健康数据的 实时监控。此外,结合磁共振成像(MRI)、电脑断层(CT)、彩超、血常规、尿 生化等专业影像学和生化检查结果,使用 AI 技术可以对个体健康状况进行准确 评估和及时干预,可为下一步专业医疗机构的精确诊断和个性化人工程序提供重 要参考^[41]。 数字孪生体域网可以通过 6G 和 ICT 模拟虚拟人体,可以全天候跟踪,提前预测疾病,还可以模拟虚拟人体的手术和用药,利用虚拟人体预测疗效,加快药物研发,降低成本,从而提高人类的生活质量。

如图 9 所示,数字孪生体域网通过云、雾和传感器层计算在流行病管理方面 具有强大的优势。以冠状病毒(COVID-19)疫情管理为例,将经历以下过程:

1) 将健康信息实时传输到边缘计算的个人网段的数字孪生网。

2) 基于安全多方计算的去个性化模型,通过比较雾计算的部署发现异常。

3) 天地互联网的信道资源通过独立网关分配给远程云计算中心。

4) 医生通过对数字孪生对象的非接触检测来追踪人群行为的源头,从而找 到感染源。

5) 通过数字孪生体模拟调查验证临床用药,加快数据处理速度。

6) 在隔离过程中,患者与家人之间通过通感网络进行情感互动。



图 9 基于数字孪生体域网的疫情管理原理图

如图 10 所示,在体域、体表和体内通信中,传统移动通信和微观移动通信 之间存在较强的关联。数字孪生体域网的网络结构特点包括:

1) 小而灵活:在 5G 时代,边缘计算和网络切片以企业或园区为最小单位, 而在 6G 时代,将进一步发展到以个人为单位。 2) 雾计算与智能协作: 多个网络的智能选择与协作促进了网络管理的自主性^[42]。

3) 开放式 AI 众包模式: 在 5G 之前的软件定义网络基础上,发展了数字孪 生体,上行链路数据比例大大提高,更精细化的开放 AI 可以实现企业和个人的 数据价值。

4) 隐私与安全:安全的多方计算、区块链、隐私数据都不是由体域网产生的,只有模型离开体域网,这不仅保证了安全和隐私,也凸显了数据和剩余计算、存储、带宽资源的价值。

5) 绿色与能源:智能跑鞋发电等自发电设备以及灵活调度计算任务的节能 模式,解决了胶囊机器人等可穿戴智能体在人体发展的最后一公里问题。



UV: ultraviolet; EEG: electroencephalogram; CGM: continuous glucose monitoring; ECG: electrocardiogram; EMG: electromyogram

图 10 传统移动通信与人体、体表、体内微观移动通信之间的关联^[43]

2.2.5 高能效无线网络控制与联邦学习系统

世界正朝着大量使用数据相关性进行分析的应用这一方向迈进。一个崭新的 例子是在移动设备收集的邻近数据的帮助下,与流行病如 COVID-19 的斗争。这 些数据必须通过网络进行关联,以减缓疾病的传播^[44]。此外,对于在有不同参与 者(自行车、行人、汽车、两轮车)的交叉口场景下的自动驾驶,必须将移动和 固定传感器(如激光雷达和雷达)结合起来,以分布式控制方法了解情况并根据 需要控制交通。

在这两个简单例子中,移动终端支持的大数据分析应用程序,以及上述触觉 互联网应用程序都清楚地表明,我们需要 6G 无线通信网络来大规模支持实现分 布式学习算法所需的通信量。根据算法划分,时延要求可以较高(61 ms)或相 对较低(大于 10 ms)。然而,与 5G 网络以视频和流媒体为主的通信量相比,需 要传输的数据量将达到一个新的水平。

为这些尚未探索的新流量需求准备 6G 网络的自然方法是进一步构建网络功能的软件化。这允许自由地适配一些相当不确定的新开发需求。然而,当依赖商用现成品服务技术来实现这些需求时,将以增加功耗为代价。这种对于计算能力前所未有的需求将无法在能量效率要求极高的商用现成品服务中得到满足,正如摩尔定律正在迫近极限。也就是说,我们不能依赖半导体技术的发展来补偿商用现成品服务功耗的增加。因此,目前唯一可以预见的解决方案是为 6G 构建特定领域的计算引擎,这将为商用现成品服务提供补充,并将能耗降低一个数量级。现在我们正广泛应用这种方法来高效地实现机器学习。对于 6G,我们必须通过设计领域特定的机器来找到一个等价的解决方案^{[45][46]},这是对当今商用现成品服务和 AI 引擎的补充。

三、6G 使能技术

为了实现上述关键性能指标, 6G 无线通信网络将大量采用新的使能技术。 在本章中,我们将首先介绍新的空口与传输技术,然后介绍未来 6G 潜在的网络 架构。

3.1 6G 空口与传输技术

空口与传输技术提供了终端用户和 6G 无线通信网络之间的物理连接。本节 将关注以下几个方面:新的波形设计,多址接入,信道编码,无蜂窝大规模 MIMO, 动态频谱共享和接入,基于区块链的无线接入网络,光子定义无线电,以及 uRLLC 场景多连接技术。

3.1.1 新的波形设计

(1) 现有波形综述

波形是通过特定方法形成的物理介质中的信号形状。一个灵活的波形需要考虑各种参数,包括时间/频率定位、时间/频率弥散的鲁棒性、频谱效率、时延和峰均比(PAPR)^[47]。

在 5G 标准的发展过程中,业内研究了多种正交频分复用(OFDM)的波形 方案,以减少带外辐射。这些方案分为含子载波滤波的多载波系统和含子带滤波 的多载波系统。前者包括通用滤波器多载波(UFMC)和滤波频分复用,而后者 包括广义频分复用(GFDM)和滤波器组多载波(FBMC)。新波形的选择不仅要 考虑上述性能,还要考虑帧结构设计、参数选择的灵活性、信号处理算法的复杂 性等。为了灵活地支持不同的应用,对多业务正交频分复用进行了研究。在未来 的系统中,新的波形还应该支持灵活的网络切片。

52.6 GHz 以上频段被认为是潜在的 6G 可用频段。发射端在频率超过 52.6 GHz 时,相比于较低频段,将面临更多的挑战,如更大的相位噪声、更高的大气 衰减引起的极大传播损耗、更低的功率放大器效率,需要具有更高的峰均比、更 为严格的功率谱密度监管要求。因此,有必要研究适合高频段的波形。单载波系 统已被证明是有效的低峰均比传输方法,并已应用于 IEEE 802.11ad 标准。随着 带宽的增加,单载波传输时使用大带宽的灵活性受到了限制。在文献[47]中,作 者研究了多载波传输和单载波频域均衡,其基本思想都是利用滤波器组实现每个 载波上的载波聚合和单载波频域均衡,以降低峰均比和接收机的复杂度。

高移动性仍然是传统移动通信系统的局限。随着未来高铁(HST)的发展和高速数据传输的需求,如何提升高移动性场景下的传输速率仍是未来6G面临的挑战。文献[48][49]研究了一种新的波形调制技术一正交时间频率空间调制技术(OTFS)。OTFS技术将信号调制到时延多普勒域,将时变多径信道转换到时延

多普勒域。OTFS 技术可以看成是将每个符号调制到特定为时变多径信道设计的二维正交基函数集合上。

OTFS 技术的收发端如图 11 所示。发射端首先将二维逆有限辛傅里叶变换 (ISFFT)应用于基带数据 *x*(*n*),再进行 Heisenberg 变换,即可得到 OTFS 技术 中传输的时域信号。接收信号 *r* 在接收端去矢量化为矩阵,然后进行 Wigner 变 换和有限辛傅里叶变换(SFFT)。使用先进接收机的 OTFS 技术可以比传统正交 频分复用技术获得更好的性能,尤其是在高移动性场景下。但是,OTFS 仍存在 许多未解决的问题,信道估计和导频设计将比正交频分复用更具挑战性^[50],并且 均衡也将比正交频分复用更加复杂^[48]。OTFS 和大规模 MIMO 的结合也是今后 的研究方向。



图 11 OTFS 的发射端与接收端

(2) 极低功率的波形设计

当前新的主流波形,如(加窗口的)正交频分复用、广义频分复用、OTFS 正被使用或提出,与高调制基数(如256 正交振幅调制)和多天线结合。这些波 形技术是由最大化频谱效率驱动的。该方法在毫米波频段以下的载波频率上都遵 循合理的优化目标。

在接收端,这些波形技术通常需要分辨率在 10 位以上的模数(A/D)转换器。以 100 Gbps 到 1 Tbps 的数据传输速率,会导致电路中的 A/D 转换器本身在终端内的功耗就超过了 10 瓦^[51]。最终结果是终端收发信机的功耗将由 A/D 转换器决定。

然而,目前尚在讨论的达到 6G 数据速率的频段将达到 70 GHz 以上,甚至可能进入太赫兹频段。在这些频率上,可用带宽并不稀缺。因此,即使需要支持 100 Gbps 及以上的数据速率,多波束链路对每束的频谱效率的要求也低于 5 bps/Hz。

这种新的边界条件为摆脱频谱效率越来越高但能量效率越来越低的多载波 调制设计方案限制提供了可能。相反,调制方案可以围绕优化 A/D 转换器功耗 的基本假设来设计。

尺寸化 A/D 转换器的目标是每秒产生一定数量的转换步骤,这些步骤必须 是数据速率的倍数。在目前以及未来一段时间内的纳米级半导体技术中,电压波 动很低,但可实现的时间分辨率很高。1-bit A/D 转换器能够达到 A/D 转换器的 最高质量标准,即每个转换步骤的最低能量,并且能够完成所需的每秒转换步骤 数。

因此,6G 波形的一种新的设计模式可能是寻找仅需要非常低分辨率 A/D 转换器的调制方案,最低要求是 1-bit A/D 转换器。一种方法是新的波形设计"过零调制"^[52],而另一种方法则是使用连续相位调制(CPM)^[53]。由于迫切需要一种波形解决方案,使终端的 A/D 转换器功率预算明显低于 1 瓦,因此显然还需要提出进一步的方法。

3.1.2 多址接入

多址技术决定了移动用户之间如何共享带宽资源,并已被公认为移动网络发展的关键里程碑^{[54][55]}。在过去的几代移动网络中,正交多址接入(OMA)已经被广泛使用,其中正交带宽资源块首先在时间、频率或码域(例如,时隙、子载波和扩展码)中生成,然后以正交的方式分配给用户,即一个资源块仅由一个用户占用。正交多址接入在上一代移动网络中的成功,主要是因为它可以用低复杂度实现,尽管自香农对多址接入信道进行研究以来,就已知正交多址接入的频谱效率是次优的^[56]。非正交多址接入(NOMA)是下一代多址接入技术的一个典范。 NOMA 的核心思想是鼓励移动用户之间的频谱共享,利用用户的动态信道条件或异构的 QoS 要求^[57],从而获得 NOMA 优于正交多址接入的频谱效率增益。以幂域 NOMA 为例^[58],具有不同信道条件的多个用户可以在同一时间、频率和扩展码下被同时服务。因此,NOMA 避免了频谱效率低下的情况,即宝贵的带宽块只由信道条件差的用户占用。NOMA 采用先进的多用户检测技术,以合理的计算复杂度有效抑制频谱共享引起的多址干扰。

NOMA 最初是为 5G 移动系统开发的,其卓越的频谱效率已经被广泛的理论研究以及学术界和工业界的实验所证明。然而,NOMA 在 5G 系统中取代正交频分复用的愿景并没有实现。NOMA 仅被用作下行传输的可选传输模型。我们注意到,NOMA 标准化进程受阻并不是因为业界对 NOMA 没有足够的兴趣。尽管工业界和学术界对 NOMA 有着巨大兴趣,还是存在一些技术方面的原因与争论导致 NOMA 标准化的困难。以多用户叠加传输(MUST)为例,使用 NOMA 进行下行传输^[59]是 3GPP 版本 14 中的一个研究项目。不同的工业公司提出了 15 项建议。这样的差异导致了折衷的情况,在 3GPP 版本 15 中,多用户叠加传输只作为可选模式^[60]。另一个例子是 NOMA,它是 3GPP 版本 16 中的一个研究项目,使用 NOMA 进行上行传输。由于提出了 20 多种不同的形式 NOMA 方案,3GPP 工作组未能达成共识,导致 NOMA 没有被纳入 5G NR^[61]。因此,5G NOMA 标准化的一个重要教训是避免分歧,即首要任务是集中地制定统一的 6G NOMA 框架:

- 从技术角度来看:统一的 NOMA 框架应该保留不同的 5G NOMA 形式所承诺的优越性能,例如支持大规模的连接、实现出色的用户公平性、能效和频效折衷等。值得指出的是,大多数现有的 5G NOMA 形式都是为特定的目的开发的。例如,稀疏码分多址接入(SCMA)的开发主要是为了支持 mMTC场景的大规模连接,而功率域 NOMA 则以提高 eMBB 的系统吞吐量而闻名^[62]。因此,通用的框架对于在 6G 系统中部署 NOMA 是至关重要的,多目标优化和多任务学习等复杂的工具将有助于建立这样的框架。
- 从实际应用的角度来看:统一的 NOMA 框架需要对动态无线传播环境和用 户复杂的移动配置具有鲁棒性。为了实现鲁棒的 NOMA 传输,在实际应用 中,用户的 QoS 需求变化非常缓慢,使用用户的异构 QoS 需求在实际应用 中更加可行^[63],而不是依赖于用户的瞬时信道条件,用户的信道条件在实际 应用中是可以快速变化的。特别地,对 QoS 要求较低的用户可以与对频谱 QoS 要求较高的用户进行分组共享,从而显著提高频谱效率。当系统中存在 具有异质性迁移特性的用户时,使用时延-多普勒域比使用传统时频域具有更 多的自由度^{[64][65]}。
- 从标准化的角度来看:统一的 NOMA 框架应具有足够的通用性,能够代表基于传播、能量差异和加扰的 NOMA 形式的关键特征,并能适应新兴的通信场景和用户案例^[66]。以移动边缘计算为例,它是一种提供给移动用户的新型服务^[67]。初步研究表明,使用 NOMA 原则上可以减少移动边缘计算的时延和能量消耗,因此确保 6G NOMA 能够有效地支持移动边缘计算功能是非常重要的^{[68][69]}。另一个例子是大规模多址接入,它实现了大规模物联网将在6G 中得到支持的愿景。大规模多址接入的关键挑战是如何连接大量具有短包传输特征的设备^[70]。初步研究表明,使用 NOMA 可以支持半资费传输,与基于资费的传输相比,可以减少握手信令,也避免了使用随机接入协议产生的 QoS 保障问题^[71]。

3.1.3 信道编码

信道编码的发展受到了香农的开创性工作^[72]启发,该工作预测通过在发送的消息上附加冗余信息,信道编码可以实现无限低的误比特率(BER)。自香农的开创性工作以来,在过去的70年里,无数的前向纠错码(FEC)被提出,它们可以大致分为线性分组码和卷积码。

5G 标准制定了三种相当不同的应用场景,即 eMBB、为不同关键任务场景 设想的 uRLLC,以及用于工业和物联网的 mMTC。当然,这三种模式的特征十 分不同,特别是在可允许的时延方面,这对于 uRLLC 模式来说要求程度是非常 低的,uRLLC 模式主要是为低时延控制应用程序设计的,比如传输信道质量信

令和调度信息。对 Turbo 码、低密度奇偶校验(LDPC)码和极化码^[73]在纠错能 力、灵活的码率和码字长度重构、支持混合自动重传请求(HARQ)的能力、复 杂性等方面进行的比较^[74],最终选择了低密度奇偶校验码用于保护 eMBB 数据 信道,因为它在编码速率、编码长度和译码时延方面非常灵活,同时方便地支持 HARQ^[75]。相比之下,极化码则更适合于低时延控制信道,如文献[75][76]中所述 不同码字长度的性能结果。进一步的设计经验、性能结果以及极化编码在量子编 码中的扩展可以在文献[77]中找到。

(1) 下一代极化码

在 5G 中,极化码已被用作控制信道编码方案,但在详细比较性能与复杂度的情况下,其潜力也有望被进一步挖掘。文献[78]表明在基于连续消除(SC)的译码中没有出现误码平底,这为长极化码在移动通信中的应用提供了理论依据。 文献[79]的仿真结果表明,依赖循环冗余校验(CRC)辅助逐次消除表的极化码的误码率性能优于使用相似参数的低密度奇偶校验码。

极化码与高阶调制方案的有效结合,包括多级极化编码调制^[73]和位交织极 化编码调制^[80],值得进一步关注,以提高可达吞吐量为目标。极化码在间隔尺寸 为1/N的情况下,可以方便地调整码率。相比之下,Turbo 编码和低密度奇偶校 验码的多级调制的间隔尺寸明显不如极化码灵活。在极化码调制的码率分配中, 只考虑极化信道的可靠性,选择可靠性高的极化信道传输原始信息比特。然而, 极化信道可靠性计算的复杂度相当高^{[73][81]}。因此,设计低复杂度的码字结构是一 个关键的研究课题。此外,将极化码的输出映射到调制器的输入也是一项具有挑 战性的任务,因为合法的映射方案的数量是巨大的,正如文献[74][75]中所讨论 的那样。因此,寻找接近最优的低复杂度映射方案是一个很有前景的研究领域。

为了进一步阐述极化码的编码构造,必须考虑到特定的信道特性,它直接影 响译码算法的选择以及性能与复杂度的关系。因此,对加性高斯白噪声(AWGN) 和衰落信道进行有益码结构的设计引起了广泛的研究兴趣。相关的极化信道方面 已经在文献[76][77][82]进行了研究,并辅以一系列低复杂度的编码结构,但是关 于为衰落信道设想的创新编码结构的文献还很缺乏^{[83]-[85]}。

尽管具有灵活的码参数是非常重要的,但是大多数现有的极化码都有长度, 这个长度是2的整数次方,限制了它们的实际应用。因此,与旧版本类似,通常 使用增信删余码和缩短来适当地调整码长度和码速率,这会导致性能下降。因此, 在文献[86][87]中,特定的核矩阵被用来构造长度灵活的极化码,而不使用增信 删余码和缩短极化码。在此背景下,基于多核的码构造是一个很有前景的研究方 向。最后,构想出强大的软判决,在极坐标解码器和软输出解调器之间交换软外 部信息,并辅助 Turbo 式探测方案是设计下一代收发机的关键。 由于具有多方面的优势,随机低密度校验码和 Turbo 解码器的实现有大量的 文献,其中最主要的是容错能力^{[88][89]}。但是除了文献[90]-[95]之外,基于随机计 算的极化解码器迄今还没有引起太多关注。因此,这是一个很有前景的研究领域。

(2) Turbo 收发机下一代前向纠错

第一个迭代检测辅助信道解码器是 Gallager 的低密度校验码解码器^[96],但直 到 Turbo 码的发现,解码器组件之间迭代软信息交换的全部优势才得到广泛认可 ^[97]。在简单的概念术语中,图 12 右侧所示的软信息的迭代交换是有益的,因为 译码器组件在达成一致并对其判决有足够的信心之前不会做出硬判决。更定量地, 在文献[98]中显示,Berrou 的 Turbo 码确实能够在误比特率为 10⁻⁴时比同样复杂 的卷积解码器的性能高出约 2 dB,前提是使用足够长的 Turbo 交织器。



图 12 并行级联码的编码和解码

自从 Turbo 码被发现以来,设想了各种各样的串行编码方案,几种有效的串 行方案有并行级联码(PCC)^[97]和串行级联码(SCC)^[99]。事实上,还有功能强 大的混合级联码(HCC)^{[88][89][100]},依赖于不同的组成码,值得在未来探索。上 述基于迭代软信息交换的 Turbo 原理可用于上述方案的检测。

(3) 并行级联方案

组件编码器通常是卷积编码器,二进制 BCH 编码也被使用^[98]。在编码器中, 输入信息位由第一个构成编码器(编码器 I)编码,输入信息位的交织版本由第 二个构成编码器(编码器 II)编码,表示为交织器,也称为扰码器。编码后的输 出比特可以被删截,因此可以获得任意的编码速率。此外,这种结构可以扩展到 多个双组分码的并行级联,从而导致多级 Turbo 码^[90]。

(4) HARQ 的多组 Turbo 码

并行级联码的一个特别有益的类族是多分量 Turbo 码类^[91],依赖于单位速率 码组件,能够很好地支持 HARQ。简而言之,在第一次传输期间,没有分配冗余, 因此整体的码率是统一的。如果循环冗余校验表示解码失败,则传输相同信息的 不同加密版本,因此解码器现在有 50%的冗余,整体码率变为 1/2。在循环冗余 校验持续失效的情况下,总共有 *N* 个不同交错版本的原始信息被传输,导致总的 码率为 1/*N*。

(5) 串行级联方案

串行级联码的基本结构如图 13 所示^[99]。串行级联码编码器由外部编码器(编码器 I) 和内部编码器(编码器 II)组成,通过交织器相互连接。交织器的引入在比特被传递给其他组成编码器之前打乱了比特,这确保了即使一个特定的比特被信道严重污染,其他组成解码器也有可能能够提供关于这个比特的更可靠的信息。这是时间分集的实际表现。在串行级联码解码器中使用了迭代处理,可以达到与经典并行级联码类似的性能^[99]。事实上,串行级联构成了一个相当普遍的结构,许多解码/检测方案可以描述为串行级联结构,如 Turbo 均衡^{[92][98]}、编码调制^{[93][94]}、Turbo 多用户检测^{[101][102]}、联合源/信道解码^{[103]-[105]}、低密度奇偶校验码解码^[106]。类似地,如文献[107]-[110]所述,一个串行级联方案可以包含两个以上的组件。图 14 展示示了一个三级串行级联码的示意图^{[107][110]}。



图 14 三级串行级联码的编码和解码

(6) 不规则前向纠错: 外部信息传递图表辅助设计时代

早期前向纠错设计的一个标准是最大限度地提高合法码字的汉明距离,这与 最小化误码率密切相关,即使是在高斯有线信道上传输。更明确地说,设计者想 要最大化所有合法码字对之间的汉明距离。BCH 编码类族可以满足这一设计准 则^[98]。卷积码的维特比译码依赖于最大似然序列估计算法^[111],该算法并没有最 小化误码率,而是错误序列估计概率。然而,在1974年,Bahl、Cocke、Jelinek 和 Raviv 发明了另一种线性码族的最优译码算法,该算法获得了 BCJR 解码器的 青睐^[112]。虽然它能够直接最小化误码率,但是它的性能仍然与最大似然序列估 计相似,尽管它的复杂性要高得多。因此,BCJR 解码器一直处于封存状态,直 到 Turbo 码的发明,需要一种算法为解码器提供逐位信心指标。经过几十年使用 不同的编码设计标准,Ten Brink 以强大的外部信息传递分析工具的形式发现了 一个历史性的突破^{[113]-[116]},将迭代检测辅助 Turbo 接收机的收敛行为可视化。

3.1.4 无蜂窝大规模 MIMO

蜂窝间干扰是传统蜂窝结构网络的主要限制。为了克服干扰问题,在LTE中 以协同多点(CoMP)传输或网络 MIMO 的名义对小区间协作进行了研究。然而, 在传统的蜂窝结构下,协调多点的性能提升仍然是有限的。

大规模 MIMO 是提高 5G NR 频效的关键技术之一。理论结果表明,当天线数目增大到无穷时,大规模 MIMO 具有信道硬化效应。然而,考虑到天线之间的相关性,在实际中通常采用基于码本的波束成形来降低多用户联合预编码的复杂性^[117]。

最近,无蜂窝大规模 MIMO 的概念被提出,其通过突破蜂窝结构来克服蜂 窝间干扰^[118]。从基带传输的角度来看,无蜂窝大规模 MIMO 的性能增益来自于 对大量异地分布的远端天线单元(RAU)的联合处理^{[119][120]}。无蜂窝大规模 MIMO 已经被证明比集中式大规模 MIMO 和小蜂窝具有更高的频谱效率^[121]。最近的大 规模分布式 MIMO 原型系统表明,100 MHz 带宽的 128×128 的大规模分布式 MIMO (或无蜂窝大规模 MIMO)可以达到 10 Gbps 的数据速率^[122]。然而,无蜂 窝大规模 MIMO 也面临着实现复杂度高、回传/前端要求高、同步和信道状态信 息获取困难等问题。目前,研究人员已经对无蜂窝大规模 MIMO 的容量进行了 研究。结果表明在独立同分布的瑞利衰落信道,基站的数量趋近于无穷时,信道 具有渐近正交性。此外,当每个基站具有适当数量的天线(如 5-10 个)时,无蜂 窝大规模 MIMO 也具有信道硬化效应^[123]。

考虑到可扩展性,无蜂窝大规模 MIMO 通常采用最大比合并(MRC)接收 和最大比传输(MRT)预编码。文献[124]的结果表明,最大比合并和最大比传输 虽然具有渐近最优性,但不能充分利用无蜂窝大规模 MIMO 的空间复用增益。 使用迫零(ZF)/最小均方误差(MMSE)接收机或迫零/归一化迫零(RZF)预 编码可以获得更好的性能,但会显著增加系统的复杂性,这是限制无蜂窝大规模 MIMO 应用的主要因素。

由于联合处理的需要,在基站和 CPU 之间需要较大的回传容量。对于上行 链路的联合检测尤其如此,上行链路需要较大的前向链路容量。如何设计信号处 理方法来最大限度地降低回传容量要求,还需要进一步研究。

无蜂窝大规模 MIMO 容量增益的开发依赖于准确的信道状态信息。首先, 基站之间需要精确的时钟同步。解决同步问题的一种方法是使用硬件,例如使用 配备了高精度 GPS 的节点或使用高精度同步协议的节点,如 IEEE 1588。另一种 方法是在节点之间发送空中同步信号。与大规模 MIMO 类似,在无蜂窝大规模 MIMO 中,通常假定时分双工(TDD)模式来减少开销。但在实际应用中,由于 射频的非理想特性,需要对其进行互易性标定。由于无蜂窝大规模 MIMO 的节 点分布在不同的位置,互易性标定要求在节点之间传输过场标定信号。因此,由 于节点间链路信噪比和信道变化的影响,校准的精度和频率需要进一步研究。

无蜂窝大规模 MIMO 的另一个重要方面是功率控制的可扩展性。主要的问题是,虽然全局最优策略是己知的,并且原则上可以计算的(例如文献[118]的最大最小公平策略),但是这些策略在性能和计算上都不能扩展。当网络的大小增加而不知道确切的衰落分布下,最大最小公平率会接近零。而且,随着系统规模的增大,计算负载也会增加。一种补救方法是将接入点划分为簇,并将每个用户与一个或多个这样的服务簇关联起来^[125]。这有助于使用本地功率控制机制,该机制可以获得与全局最大最小公平优化相当的性能,尽管其性能较差。

3.1.5 动态智能频谱共享与接入

由于频谱资源有限,要满足 6G 对峰值速率和海量接入的严格要求是一项具 有挑战性的任务。虽然 6G 被认为将使用太赫兹和可见光等新频段,支持峰值速 率传输,但仍希望利用低频段,如 sub-6 GHz 频段,以一种有效的方式获得广泛 的覆盖、低成本和大规模接入支持的优势。因此,需要使用认知无线电技术^{[126][127]} 来支持动态和智能的频谱共享与接入^{[128][129]}。

- 无授权频段的动态频谱共享:一种方法是在无授权的频谱中运行 6G 无线通 信网络。在 sub-6 GHz 频段,人们最感兴趣的是工业、科学与医疗(ISM) 使用的 5 GHz 频段,因为有几百 MHz 的频谱带宽可用。然而,在 ISM 频段 中有各种各样的应用,如 Wi-Fi 等应用。因此,需要定义接入协议,使 6G 无 线通信网络在无授权频段内运行,类似于 LTE-U 或 LTE-LAA^{[130]-[132]}。
- 共生无线电(SR):共生无线电是认知无线电和频谱共享的最新发展。它以频谱和节能的方式使大规模接入成为可能。基于环境背向散射通信^{[133][134]},共生无线电通过被动反射来自手机发射端(如基站或移动站)的信号,支持来自物联网设备的大规模访问^[135]。因此,基站、移动台或专用物联网接收器可以与蜂窝数据一起收集海量接入数据。有趣的是,物联网传输和蜂窝网络共享相同的频谱及相同的基础设施,由于多径多样性,增加物联网传输甚至可以帮助蜂窝传输^[136]。因此,这种新系统被称为共生无线电网络^[137]。
- 基于 AI 的动态频谱共享:频谱共享技术的设计通常需要系统间广泛的信息 交换。6G 的网络环境会变得越来越动态和复杂,这给动态频谱管理的实现 带来了困难。AI 正成为支持动态频谱管理的有效推动者,以应对这些挑战。 例如,使用深度强化学习(DRL),LTE 网络在未授权频段内运行时能够学习 Wi-Fi 流量,以便设计合适的协议来辅助公平共处^[132]。认知无线电网络中的 二次系统能够通过学习一次系统的运行模式来设计调制编码方案(MCS)^[137]。

在共生无线电网络中,用户关联问题可以使用深度强化学习^[138]在有限的环境信息下解决。

3.1.6 基于区块链的无线接入网络

区块链是一种颠覆性技术。区块链最初是为加密货币(如比特币^[139])设计 的,现已广泛应用于金融领域以外的领域。顾名思义,区块链是一个由哈希指针 连接的信息块链,用于记录和存储公共共享数据库。哈希指针的数学属性可以防 止已确认的区块链被篡改,因为对一个块的任何更改都会影响它的哈希值,并进 一步影响所有子块。通常,区块链是分布式的,它基于一系列称为矿工的对等节 点通过一定信息传递过程维护这个点对点网络(P2P,这个过程也称为挖矿过程)。 目前,区块链不仅可以用加密货币进行简单的交易,还可以以分布式的方式运行 图灵完全性的程序,即智能合约,例如以太坊(Ethereum)^[140]。智能契约是区块 链中可验证的脚本,可以执行各种数字操作,比如身份认证、控制等等。区块链 能够在网络实体之间建立多重信任关系,在没有任何中间人的情况下联合多边闭 体,为无线网络中跨各方整合和共享各种资源提供了一个有前景的解决方案,使 其对即将到来的 5G 和未来的 6G 无线通信网络具有吸引力。事实上, FCC 在 2018年世界移动通信大会概述了他们在未来 6G 网络中部署区块链的愿景。区块 链无线接入网(B-RAN)——一种由区块链技术支持的去中心化、可信任的无线 接入范式,在文献[141][142]中被提出,如图 15 所示。区块链无线接入网络在支 持频谱共享、协作传输、多跳数据传输、设备对设备通信等的同时,可以在服务 提供商和客户之间建立可信的物理链接[141][143]。通过高效地汇聚和共享各种网络 资源,区块链可以支持和增强多种服务,如移动边缘计算[144]、物联网应用[145][146]、 能源交易[147]、车联网连接[148]和网络切片[149]。由于其分布式的特性,区块链无线 接入网络能从本质上支持处于前沿的联邦学习[150][151]。区块链无线接入网络能扮 演一个多边平台的角色发挥其作用[151],通过利用网络效应和吸引更多的参与者, 通过通信、计算、缓存和控制单元的集成和协调,向整个网络提供智能服务。

目前,基于区块链的网络仍处于起步阶段,许多问题尚未得到解决。首先,现有的区块链通常可以保护安全性,但会导致相对较长的时延,也称为安全-时延折衷^[152]。对于时延敏感的无线服务,它仍然需要更多的研究来实现更短的时延^[153]。其次,当前的区块链技术面临可扩展性问题,限制了基于区块链的网络的网络吞吐量。分析和设计新的区块链结构的工作可能有助于消除这一障碍^{[154][155]}。第三,常见的共识机制,如工作量证明,需要浪费大量的能量来实现对不良行为的抵抗性和鲁棒性,因此不适合功率和算力有限的移动设备^{[141][146]}。因此,在移动环境中迫切需要节能的共识机制。



图 15 基于区块链的无线网络示意图

3.1.7 光子定义无线电

为提供超宽带移动服务,5G小蜂窝采用6GHz以上新无线电频段。其中一个典型的频段是28GHz,用于实现超过10Gbps高速传输速率。但是,在100GHz以下的可用无线电频率资源仍然是有限的,在此频段中要进一步增加无线系统传输能力是相当困难的。位于毫米波和红外辐射之间的太赫兹频段具有非常大的带宽^{[156][157]},预计可以提供超过100Gbps的带宽来容纳指数级增长的无线数据业务,因此它们被认为是未来6G服务的有希望的候选频段^[158]。

由于目前在信号源和探测器方面的限制,太赫兹频谱范围还没有被充分挖掘。 为了开辟 6G 应用的频率范围,光子解决方案已经走在了技术的前沿。光子技术 作为毫米波和太赫兹波产生的理想解决方案,在能源效率、带宽、调谐范围等方 面表现出色。基于光子超外差混合技术的太赫兹生成方法,不仅可以克服电子元 件的带宽限制,还可以有效促进光纤与无线网络的无缝集成^[159],例如光载太赫 兹(ToF)系统或光纤到天线(FTTA)架构。这样,光纤通信的巨大带宽和无线 通信的高移动性的双重优势使得光纤-太赫兹-光纤无缝通信系统成为一个很有 前景的选择^{[160][161]}。

在太赫兹发射端,数据信号从光频到太赫兹频段的光电转换,相较于传统全 电子方法,可以提供给一系列优势,包括太赫兹载波频率超广的可调谐性,并有 机会利用先进的光学调制和多路复用机制,在转换到太赫兹域之前生成数千兆比 特数据流。如图 16 所示,首先将基带数据波形调制到频率为 fo 的光载波上,发
送到本地光到太赫兹(O/T)变换器上。然后在超高速单行载流子光电二极管 (UTC-PD)中,通过与频率为*f*_{Tx,L0}的本地振荡器(激光器)进行光外差混合, 实现光信号转换到太赫兹信号的转换。太赫兹数据信号通过天线辐射到自由空间。 在接收端,太赫兹信号通过超宽带光调制器转换到光域,有利于高密度的光子集 成,而不需要全电子下转换到基带或中频。太赫兹数据信号由喇叭天线(HA) 接收,经太赫兹放大器放大,然后注入到马赫-曾德尔调制器(MZM),调制到载 频为*f*_{Rx,L0}的光载波上。经过调制后,光信号包含一个上调制边带和一个下调制 边带。再使用光带通滤波器(BPF),抑制光载波并滤出其中一个调制边带。人们 期望,在超小型设备中直接集成光到太赫兹和太赫兹到光的转换器,有可能大大 加速太赫兹通信,并促进将太赫兹无线链路融入到光纤基础设施中。



图 16 直接光-太赫兹和太赫兹-光转换图

太赫兹无线通信技术的全面部署仍然面临多重挑战。虽然光子学技术可以有助于提高链路效率,产生高数据速率,但是系统在发射端仍然需要更多的输出功率,特别是在回传等应用中,回传的距离将达到1km^[162]。另一个挑战与能耗有关,因为无线数据业务将很快成为世界上人均消耗最高的能源消耗者^[163]。这些挑战仍然需要技术的发展,以在发射端上产生更多的能量,同时提高整个系统的效率。能够提高发射端功率和系统整体效率的主要技术是光子集成技术。光子集成技术自然会减少耦合损耗,例如从光纤到芯片的损耗,特别是激光器和光子混频器之间的损耗^[164]。还应该采用多天线系统,推动先进的有源阵列天线,以补偿路径损失,并允许一些跟踪。除此之外,仍然需要在发射端和接收端上进行信号放大,因此用于发射端和接收端的低噪声和大带宽的太赫兹放大器也是需要优先解决的关键问题^[165]。为了开发一种有效的媒体访问控制(MAC),还需要应用先进的信号处理技术,如压缩感知、多天线预编码等。

此外,基于石墨烯的太赫兹技术也是一个很有前景的发展领域,特别是使用 石墨烯场效应晶体管和石墨烯超材料中的调制器来增强检测和发射^{[166][167]}。虽然 目前的性能还没有达到光子技术的水平,但石墨烯的物理性能极具潜力。特别地, 开发室温下的探测器对于提高系统的检测灵敏度很有意义。最后,小于 3 THz 的 无线电波都应加以频率管制,并就其用于无源和有源服务达成全球共识。

3.1.8 关键任务 uRLLC

在 5G 中, uRLLC 技术主要用来支持高可靠性和低时延的关键任务应用, 比如自动驾驶和工业物联网等。根据 3GPP 的定义, uRLLC 的主要目标是将时延最小化到 1 ms,同时确保包错误率小于 99.999%。众所周知,在 4G 中,可靠性是通过 HARQ 过程获得的。然而, uRLLC 中的严格时延约束无法支持多次重传。 幸运的是,工业界和学术界的研究人员已经找到了一些新的方法解决了这个矛盾的问题,并在 5G 中进行了标准化。比如:为了降低接入时延,用户设备(UE)可以在不发送服务请求并获得调度授权的情况下直接传输数据。此外,一旦有数据要传输,uRLLC 还可以通过抢先调度模式来占用已经分配给其他类型应用的资源。其他相关技术还包括微时隙(Mini-slot)、控制资源集(CORESET)、包副本等^[168]。

当然,未来的 6G 需要 uRLLC 具有更强的能力。这是由关键任务应用场景 (如机器人和自主系统)渴望更高的可靠性和更低的时延这一因素驱动的,如 2.2.2 节所述。以智能工厂为例,提高通信的可靠性是大规模生产最关键和最具 挑战性的任务之一。可靠性在多工厂联合生产中也起着重要的作用,因为单个工 厂的故障可能会引起对其他工厂的连锁错误。如果未来 6G 端到端可靠性和时延 能达到 99.99999%和 0.1 ms,智能工厂的生产率和产品质量将有显著提高。另一 方面,一些未来的新应用场景将模糊 eMBB 和 uRLLC 之间的界限。例如,人们 普遍认为,作为一种完全沉浸式技术,未来的许多商业服务中需要提供扩展现实 (XR)的体验。扩展现实包括增强混合和虚拟现实技术,可以捕捉所有源于人 类的感官,认知和生理的知觉输入^[3]。然而,目前的 5G 无法支持扩展现实,因 为它无法以非常低的时延传输大量的数据。结合 eMBB 和 uRLLC 可能会在未来 的 6G 中产生一个新的应用场景,其特点是更高的可靠性、更低的时延和更高的 数据速率。

通常,通信系统空口部分的时延主要由数据包的长度或时隙长度决定。由于可靠性、时延和数据率本质上是相互矛盾的,所以上述新应用场景对 6G 的设计 原则提出了前所未有的挑战。幸运的是,最近在信息论方面的研究进展为新应用 场景提供了理论分析和设计手段。2010年,在 Dobrushin 和 Strassen 的研究基础 上,Polyanskiy 等人提出了一种有效的方法来获得编码长度为 *n* 时的编码速率 *R* ^[169]。该方法的基本思想是,当*n* 有限时,将*R* 建模成由信道容量和信道弥散组 成的随机变量。信道弥散也是一个随机变量,引入它作为速率惩罚来表征 *n* 的影 响。另一方面,编码速率小于 *R* 的概率给出了错误概率 *P*e。由于时延约束可以

-29-

等效地用包长度 n 来表示,这一发现为从信息论的角度分析和设计 uRLLC 系统 奠定了理论基础^[170]。

为了支持更高的可靠性和数据速率,可采用多连接技术。多连接技术通过多 条路由在发送端和接收端之间建立多个连接,为发送信号提供了多个接收版本, 提高了其空间分集度^[171]。从信息论的角度,我们发现低延时的多连接传输可以 被建模为具有有限编码长度的单输入多输出(SIMO)系统,其可靠性主要依赖 于连接的天线数目。在这种情况下,如何设计 6G 中的 uRLLC 转变为求解如下 的数学问题:对于给定的数据速率 *R* 和编码长度 *n*,需要多少根天线来支持期望 的可靠性 *P*_e? 这一问题的解决也为多连接的各种实际应用场景提供重要的工程 指导,因为它能以最小的成本,比如天线个数,实现系统的设计要求。需要注意 的是,对于给定数量的天线,作为信息密度的方差,信道弥散刻画了编码长度的 缩短所导致的编码速率偏离容量的程度。所以,解决这个数学问题的关键是找出 在一定条件下信道弥散与天线数目的关系。

另一种平衡可靠性与低时延高数据速率之间矛盾的解决方案是分布式天线 (DAS)系统^[172]。通过将大量的 RAU 拉远分布在覆盖区域,DAS 能为特定区 域(如工厂)提供稳定的信号传输。作为多连接技术的扩展,分布式天线系统也 是通过多个无线链路将数据发送到同一个目的地,并且可以在理论上建模为分布 式 MIMO^[172]。因此,通过探索 MIMO 技术固有的分集和复用特性,传输的信号 可以在可靠性和数据率之间进行灵活的权衡^[173]。假设分布式 MIMO 的空间自由 度是 *dof*,如果将 *dof* 个独立数据流传输到目的地,则可以获得完全的复用增益 (即最高数据速率)。另一方面,如果在发射机上只发送 *d* < *dof* 个独立数据流, 则可以以降低数据速率为代价来增加分集增益,从而获得更高的可靠性。作为一 种特殊情况,如果所有的 RAU 将相同的数据流发送到相同的目的地(与 SIMO 情况相同),则可以获得最大的可靠性,但同时具有最小的数据速率。更重要的 是,这种方法可以很容易地扩展到多用户场景,并通过考虑多个用户的分集和复 用特性平衡 uRLLC 的整体性能。

3.2 6G 网络架构

为了更好地实现 6G 无线通信网络的需求,我们需要根据网络的特点和规范 来研究和应用新的网络架构。在这里,我们将从软件定义网络/网络功能虚拟化、 网络切片、基于服务的网络架构、认知服务架构、深度边缘节点和网络、无蜂窝 网络和云/雾/边缘计算等方面来讨论 6G 网络架构。

3.2.1 软件定义网络/网络功能虚拟化

(1) 软件定义网络及其演变

软件定义网络作为一种网络体系结构,其打破了传统网络纵向一体化的结构, 并通过(逻辑)集中的网络控制对网络进行灵活配置。它将控制平面和数据平面 分离开来,其中控制平面或控制功能在逻辑上集中于一个或一组称为 SDN 控制 器的控制实体上,而借由 SDN 控制器,网络应用和服务请求的数据平面也得以 被简化和抽象^[174]。

从更高层面来看,SDN体系结构可以分为四个平面,即数据平面、控制器平面、应用平面和管理平面,如图 17 所示。数据平面由分布式网络元素组成,这 些网络元素根据控制器平面内通过南向接口(也称为数据-控制器平面接口 D-CPI) 发出的指令,将数据包转发并路由到 SDN 控制器。控制器平面由一个或一组逻 辑集中的 SDN 控制器组成,这些控制器负责翻译应用程序的请求,并对网络元 素进行更加精细的控制。控制器平面还为应用平面提供相关信息,因此,控制器 平面起着数据平面和应用平面之间桥梁的作用。应用平面由应用程序组成,并通 过北向接口(应用-控制器平面接口 A-CPI)将应用程序的需求传达给控制器平 面。管理平面是由开放网络基金会(ONF)和互联网工程任务组(IETF)新近提 出的,负责配置和监视网络^{[174]-[177]}。



图 17 软件定义网络架构的高层次概述

SDN 架构具有可编程、灵活、低成本、高效率等优点,是 5G 的关键推动力。 SDN 可以提供一个整体框架,使 5G 能够跨控制平面运行,并为 5G 网络数据提 供更好的数据流服务。SDN 在 5G 应用中已经取得了很多进展^[178],然而其在部 署、可靠性、安全性等方面也存在很多问题。首先,在现有网络中部署 SDN 将 带来经济、技术和组织方面的挑战。由于设备的改造、初始化以及专业人员的培 训,SDN 在部署上会产生巨大的成本,5G 网络也将不可避免地增加了 SDN 网 络设计和部署的复杂性。其次,为了保证 5G 网络的超高可靠低时延通信,我们 需要在 SDN 控制器和交换机之间建立一个快速但昂贵的带外广域网,这对 SDN 网络的可靠性带来了巨大挑战。此外,由于 SDN 控制器在逻辑上是集中的,且 运行在 Windows 或 Linux 操作系统上,因而其受到攻击或崩溃的风险也会增加。 因此,安全性也是一项基本挑战^[176]。

在未来的 6G 网络中, 混合 SDN 有望有效缓解上述挑战。混合 SDN 是指这样一种网络架构,在这种网络架构中,集中式和分散式范式共同存在,并在不同程度上进行通信,以配置、控制、更改和管理网络行为,从而优化网络性能和用户体验。混合 SDN 由传统网络和 SDN 网络组成,因此可以同时获得两种网络的优势。对于混合 SDN 网路而言,异构范式的有效管理和两种网络之间的有利交互至关重要^{[176][177]}。此外,随着 AI 在通信网络中的引入, SDN 的自动化程度也有望提高。

(2) 网络功能虚拟化及其演变

网络功能虚拟化是一种网络架构,其中网络功能以软件的形式加以实现,而 这些软件可以运行在通用硬件(如大容量服务器)之上。NFV 将原本在专用硬件 (如中间件或网络设备)上实现的网络功能转换为在云环境或通用硬件上运行的 软件^[174]。

图 18 展示了 NFV 体系结构概述。NFV 体系结构通常由三个主要组件组成: 网络功能虚拟化基础设施(NFVI)、虚拟化网络功能(VNF)和 NFV 管理编排 (NFV M&O)。网络功能虚拟化基础设施提供了必要的资源来支持虚拟化网络 功能的执行。虚拟化网络功能是在软件中实现的网络功能,这些软件运行在网络 功能虚拟化基础设施上。虚拟化网络功能通常伴随着元素管理系统(EMS)。NFV 管理编排涵盖了支持网络功能虚拟化基础设施的物理资源和软件资源的编排和 生命周期管理,以及虚拟化网络功能的生命周期管理。NFV 管理编排还与运营 支撑系统(OSS)或业务支撑系统(BSS)进行交互,以便 NFV 可以集成到现有 的网络管理中^{[179][180]}。

尽管 SDN 和 NFV 都使用网络抽象和虚拟化技术,但它们有很大的不同。 SDN 旨在将网络控制功能与网络转发功能分离开来,而 NFV 旨在将网络转发和 其他网络功能从其运行的硬件中抽象出来。SDN 将交换机、路由器等物理网络 资源抽象化,并将决策转移到虚拟网络控制平面,从而虚拟网络控制平面决定了 流量转发。在这种方法中,硬件将继续引导和处理数据流。而 NFV 旨在虚拟化 管理程序下的所有物理网络资源,从而允许网络在不添加更多设备的情况下增长。 举例来说,当 SDN 在网络功能虚拟化基础设施上执行时,SDN 虽然负责将数据 包从一个网络设备转发到另一个网络设备,但 SDN 的路由、策略定义和应用程 序上则运行于 NFV 定义的虚拟机上。因此,NFV 提供基本的网络功能,而 SDN 控制并编排这些网络功能以用于特定的用途^[181]。综上所述,SDN 与 NFV 密切 相关,它们高度互补,但并不相互依存。它们可以互惠互利,产生更大的价值。 例如通过采用 SDN 技术,NFV 可以提高其性能^[182]。



图 18 网络功能虚拟化架构的高层次概述

NFV 是 5G 的关键推动力,它有助于虚拟化网络中的各种设备。在 5G 中, NFV 将实现云无线接入网的虚拟化,这将有助于部署网络并减少支出。此外, NFV 还将提供网络切片的基础设施,允许将物理网络分割成多个虚拟网络,以 支持不同的无线接入网或各种服务。在未来,NFV 将通过动态创建服务链,使 5G 网络支持基于服务的架构。因此,NFV 使得 5G 网络具有弹性和可扩展性, 提高了灵活性并简化了管理^[183]。

尽管如此, SDN 和 NFV 在 5G 和 6G 中的管理运行仍是一个开放性挑战, 面临着复杂性、可靠性、安全性和多租户等多重问题。首先,尽管 SDN 和 NFV 对网络各个部分的管理责任和服务供应给出了定义,但是为了分离控制管理、多 厂商系统、改进功能、实施资源分配、动态网络条件和网络切片,整个管理编排 的复杂性会明显增加。其次,由于管理编排的复杂性增加,网络有可能出现意想 不到的"黑天鹅"式故障,这可能会很难处理,因此,SDN和NFV面临着可靠 性和安全性方面的问题。此外,5G和6G网络预计是多租户的,网络运营商和服 务提供商共享相同的物理基础设施,因此,网络管理编排必须处理相应的多租户 问题^[184]。

3.2.2 网络切片及其演进

网络切片是一种网络架构,它支持在相同的物理网络基础设施上多路复用虚 拟化且独立的逻辑网络^[185]。一个网络切片是一个逻辑上独立的端到端网络,它 根据服务等级协议(SLA)为特定的服务类型量身定制。

网络切片的概念可以追溯到 20 世纪 80 年代末,当时切片的概念被首次引入 网络领域。下一代移动网络联盟(NGMN)则定义了 5G 环境下的网络切片^[186]。 如图 19 所示,网络切片的概念主要包括三个层次,即业务实例层、网络切片实 例层和资源层。每个业务实例表示由网络运营商或第三方提供的服务。网络切片 实例为业务实例提供所需的网络特征,即,每个业务实例由一个网络切片实现。 一个网络切片实例可以完全或部分地、逻辑上和/或物理上与另一个网络切片实 例隔离。每个网络切片可以包含零个、一个或多个子网络实例,这些实例可以由 两个或多个网络切片共享。子网络实例可以是运行在物理/逻辑资源上的网络功 能^[187]。



图 19 网络切片的概念框架[187]

网络切片构建了一组专用网络,每个专用网络针对一种类型的服务进行定制, 从而保证了性能、可扩展性、可靠性和安全性等的提升^[188]。文献[189]定义了不 同的切片类型,即 eMBB、mMTC、uRLLC。网络切片基于 SDN 和 NFV,因此 继承了它们在复杂性、可靠性、安全性和多租户问题上的大部分问题和挑战。 除了从 SDN 和 NFV 继承的挑战之外, 网络切片还有一些额外的考虑需要在 未来的 6G 中加以解决。(1) 切片隔离。隔离是网络切片最重要的特性, 也是实 现网络切片的主要挑战。为了保证每个切片的服务质量, 需要实现不同区域的隔 离, 包括流量、带宽、处理和存储。在这种情况下, 网络切片面临的主要挑战是 需要编排和控制多个领域不同的隔离技术, 但是针对这一问题, 目前仍然没有一 个整体的、最终标准化的网络切片体系结构。此外, 隔离技术在很大程度上依赖 于 SDN 和 NFV 技术, 这两种技术也还不成熟。(2) 动态切片的创建和管理。为 了适应不同的服务, 满足不同的需求, 高效的动态切片创建和删除是很有必要的。 但是, 创建或删除切片非常困难, 因为必须确保这些操作对当前正在运行的切片 没有影响, 这涉及到隔离和安全问题。此外, 网络切片应该能够随着负载的变化 而动态伸缩。因此, 需要高效的共享, 这也会导致诸如隔离和安全的问题。在此 背景下, 网络切片的生命周期管理是一个亟待解决的关键问题^{[184][188]}。

3.2.3 基于服务的网络架构及其演进

为了满足业务的多样化需求,并在引入新业务时对网络中其他实体造成尽可 能小的影响, SBA 被引入 5G 核心网络^{[190][191]}。图 20 给出了 5G 核心网络中的参 考 SBA。鉴权服务功能(AUSF),顾名思义,是一个身份验证服务器。它持有用 于身份验证的可扩展鉴权协议(EAP)。接入和移动管理功能(AMF)托管所有 与移动管理相关的功能,并终止非接入层(NAS)和 N2 参考点消息。NAS 消息 可以在 UE 和 AMF 之间进行发送以用于移动管理,或者在 UE 和会话管理功能 (SMF)之间进行发送以用于会话管理。策略控制功能(PCF)提供了一个包含 网络切片、漫游、移动管理的策略框架,而 SMF 则控制用户层功能(UPF)的会 话管理(例如,会话建立、修改和发布)。统一数据管理(UDM)存储用户数据 和概要文件。UPF 是用户层网关,其通过将无线接入网络节点连接到数据网络 (DN) 来服务于 UE。应用程序功能(AF)支持应用程序的动态策略和收费控 制。UE 是移动终端。下一代无线接入网(NG-RAN)是 5G 的新空口。DN 可以 是运营商服务、Internet 访问或第三方服务。还有两个新定义的功能,即网络存 储功能(NRF)和网络暴露功能(NEF)。NRF 可以为网络功能提供注册和发现 功能,让它们彼此发现和通信。NEF 提供了一个接口网关,它允许外部用户(如 企业或合作运营商)监视、提供和执行应用程序策略,以便用户可以在运营商网 络内部使用^{[192][193]}。

SBA 基于云计算、虚拟化、微服务、无状态服务等相关技术。云计算为 SBA 提供了按需计算。虚拟化实现了更灵活、更高效的资源管理和使用。微服务是一种新兴有效的体系结构设计模式,其中网络被划分为小粒度、高内聚和松散耦合的服务,每个服务都可以实现特定的功能。因此,微服务可以使 SBA 具有灵活

性、细颗粒度和独立的可伸缩性等特点^[193]。文献[194]介绍了一些关于 5G 中 SBA 的案例研究和部署考虑。然而, SBA 也给 5G 和 6G 带来了新的安全挑战。SBA 引入了一组安全特性, 使 SBA 体系结构的网络功能可以与服务网络域和其他网 络域进行安全通信,包括网络功能注册、发现和授权安全方面,以及对基于服务 的接口的保护。SBA 域安全是 5G 和 6G 中新的安全特性。为了保确保 SBA 中 UE 之间的安全,需要诸如传输层安全、开放授权等安全机制^[195]。



图 20 5G 核心网基于服务的网络架构^[192]

3.2.4 认知服务架构

多样化的目标、多变的服务场景和个性化的用户需求,不仅要求 6G 网络具有大容量、超低时延的特点,还要求其具有显著的可塑性,面对分布式场景中不断变化的业务需求,6G 网络服务体系结构应该具有足够的灵活性和可伸缩性,并且能够对控制层中的网络进行非常细致的调整。

然而,5G 核心网的 SBA 是基于粗略配置的,缺乏对服务需求变化的实时感知和动态适配。因此,6G 核心网络的 SBA 应具有显著的认知功能,即认知服务架构(CSA)。CSA 有两个特性,首先,它可以准确地识别目标行为、场景语义和用户特征;其次,通过统一的服务描述方法,对网络服务进行自适应动态调整。 认知界面、轻量级学习代理和分布式服务分析模块支持这些特性。通过认知接口, 6G 核心网络具有情境认知能力,能够非常细致地感知服务需求的变化。然后, 轻量级学习代理根据规则匹配或近似推理获得的信息进行决策,同时,分布式服 务分析模块对服务运行状态进行评估,为轻量级学习代理的决策提供参考。因此, 在 CSA 中形成了一个完整的感知、决策和评价的认知闭环。

此外,6G核心网络功能将进一步下沉到网络的边缘,即边缘核心。通过CSA 和边缘核心,6G核心网络将利用边缘计算形成一个多中心架构,提供高效、灵

活、超低时延和超大容量的网络服务。原来运行在云中的 5G 核心网络将不再直接参与对网络的控制,仅帮助边缘核心相互通信。核心网络向边缘下沉,降低了网络响应时延,提高了网络管理的灵活性。此外,由于核心网络的下沉部署,CSA将实现从核心网络到 UE 的全网络覆盖。在此基础上,UE 可以采用多种通信方式,并在服务场景和需求发生变化时进行无缝切换。通过在边缘核心中运行的分布式服务代理,边缘核心支持服务适应、服务迁移、服务协作和服务演化。以服务迁移^{[196][197]}为例,边缘核心通过服务认知发现迁移需求,完成迁移决策,并通过网络层的北接口调用各个模块,实现状态数据传输、单元切换、用户会话切换等各个流程,整个过程保证了低时延和用户透明度。

在边缘 AI 增强的 CSA 中, 6G 将进一步从目前的"人-机-物"交互演化为 "人-机-物-灵"交互^[198]。这些新的泛在、社会化、承上启下的、基于意识的通 信和控制场景需要现实世界和虚拟世界的智能服务协调,以及各种终端设备和网 络节点的高效协作计算^[199]。借助这种智能协同计算方案,6G 网络可以通过感知 各种类型的客观和主观信息,充分提供泛在沉浸式万物互联服务,包括虚拟场景 和真实场景。

然而,目前 5G 网络的服务能力已经不能满足未来沉浸式万物互联服务的需求。在 6G 时代,具有各种 AI 功能的终端设备将与各种边缘和云资源无缝协作。这种"设备+边缘+云"的分布式计算架构可以按需提供动态的、非常细致的服务计算资源^[200]。随着 AI 技术的成熟和 AI 硬件成本的降低,越来越多的智能终端 设备,如智能手机、AR/VR 眼镜、智能摄像头、智能电视等,也包括其他物联网 设备,在用户的日常生活中将不断增加^[201]。分布式终端设备间的协同 AI 服务将 成为 6G 的重要支撑技术。因此,如何整合这些分散的 AI 功能,并根据不同的 场景和用户需求找到最优的服务组合,为用户提供最佳的体验,是厂商需要探索 的问题。

3.2.5 深度边缘节点和网络(DEN²)

随着下一代移动通信网络越来越多地面向垂直行业场景,通信技术在局部范围内的创新变得越来越重要。DEN²的主要好处是将通信服务和智能推向边缘, 从而实现普及智能的愿景。这样,不仅可以将网络性能推到上限,而且还可以探索工业级隔离,这是以经济高效的方式授权许多工业用例的基本需求。

然而,单个深度边缘节点无法利用大规模系统的功率。大量相对独立和孤立 的边缘网络(例如数以百万计的数量级)也无法更大规模地利用数字转型平台的 功率,甚至可能成为未来产业创新的障碍。因此,DEN²的本质设计是基于协作 和可控的深度边缘节点实体的大规模组网。图21展示了DEN²的体系结构。DEN² 的目标不仅是为边缘提供计算和智能能力,也是一场架构革命,可以通过实时自 适应协作在深度边缘网络上实现无线通信和计算资源的深度融合,这不同于移动边缘计算或雾计算。

它的愿景是建立一个能够为各种工业和非工业终端提供统一访问权限的超高性能平台。另一方面,DEN²有望成为未来移动通信系统的关键创新平台。为了设计DEN²,需要考虑一些使能技术,例如,行业终端直通、无线和核心网络的融合、全自主的自驾网络、新的网络协议,如识别和地址分离、感知和用户中心化。



图 21 DEN²架构示意图

它还具有实现高度分布式人工智能的愿景,将智能化从中央云转移到深层边缘节点,从而减少时延、成本和安全风险,进而提高相关业务的效率,从这个角度来看,DEN²的关键功能是对本地 AI 的支持,包括数据访问、存储、处理、推断、知识分布等。因此,DEN²应该考虑处理数据安全和隐私问题,以及如何在默认情况下提供有效的数据和服务同步,这需要一个简单但高性能的解决方案,可以通过重新构建协议栈来完成。DEN²还需要考虑如何支持深度边缘节点实体之间的实时协作。

3.2.6 无蜂窝架构

自从 20 世纪 70 年代首次提出蜂窝网络以来^{[202][203]},蜂窝网络已经成为移动 网络的核心结构。蜂窝网络在实际实施和无线电资源使用方面具有许多优势。然 而,蜂窝网络的主要固有限制是边界效应:即在蜂窝网格边界的用户仅能接收到 微弱的有效信号(由于路径损耗)和来自其他网格的强干扰,因此,这些边缘用 户的性能很差。边界效应在过去和现在的移动网络中都不是问题,这就是数十年 来,基于蜂窝的拓扑结构仍然是移动网络的主要选择的原因。然而,在未来 6G 通信系统中,对数据速率的高要求必然会导致超密集和异构的基站/接入点部署。 而随着基站/接入点密度的增加,蜂窝网格覆盖范围变小,在 5G 网络中,基站/ 接入点之间的距离已经减少到几十米。未来无线网络的这种密集化导致了更多的 干扰,使得边界效应成为蜂窝系统的主要瓶颈。从信息论的角度来看,文献 [120][204]指出,蜂窝网络的面积谱效率正在接近物理极限,无论使用什么样的 先进技术,都无法克服边界效应。虽然在过去的几十年里提出了许多技术,如网 络 MIMO、联合传输的协作多点、分布式天线系统等,但它们突破这一瓶颈的能 力极为有限,这是因为这些技术仍然基于传统蜂窝网络结构,需要太复杂的协同 处理和高部署成本。除了边界效应导致的网络收敛问题之外,未来的无线网络还 面临许多其他问题,例如负载均衡、切换开销、干扰管理等,例如,异构通信网 络需要相互连接,因此在路由、协议和管理方面也存在许多问题。

为了解决上述问题, 文献[121]提出了无蜂窝大规模 MIMO 网络作为一种实 用且可扩展的网络 MIMO。图 22 所示为无蜂窝大规模 MIMO 的通用系统模型, 其中多个(数千个或更多)接入点在相同的时-频资源下联合服务于多个用户终 端。所有的接入点都分布在一个大的区域(例如整个城市),并连接到一个或多 个 CPU。图 23^[205]给出了一个使用 SDN 控制器的高密度智慧城市无蜂窝架构的 具体设计,与传统的蜂窝网络相比,移动终端需要提前与一个基站/接入点相关 联,在这个网络中,终端可以根据无线信道状态及其需求,决定通过不同的上行 链路和下行链路访问多个基站/接入点,因此,基站/接入点不需要维护相关终端 的列表。相反,SDN 控制器中的关联控件将决定终端应该通过控制链接关联哪 些基站/接入点。此外,SDN 控制器中的传输控制将创建动态上行链路/下行链路 和回传链路,以支持终端和基站/接入点之间的联合发送或接收,这意味着同一 组的基站/接入点可以彼此协作以实现指定终端的联合发送和接收^[205]。

无蜂窝大规模 MIMO 引起了研究者们的研究兴趣,并成为 6G 无线通信网络的潜在技术之一^{[206]-[208]}。无蜂窝大规模 MIMO 的主要优势在于:

- 高网络连通性(高覆盖率):在无蜂窝大规模 MIMO 中没有网格,因此不存在边界效应。此外,由于接入点分布在整个覆盖区域,因此可以获得宏分集增益,无蜂窝大规模 MIMO 可以提供非常高的网络连接性,可以为网络中的所有用户都提供很好的服务。
- 巨大的频谱和能量效率:与共位的大规模 MIMO 相似,由于使用大量服务天 线(接入点)来服务数量较少的用户终端,无蜂窝大规模 MIMO 提供了高自 由度,高阵列和多路复用增益,因此,无蜂窝大规模 MIMO 可以提供很高的 频谱效率和能效。
- 简单的线性信号处理和低成本器件:由于接入点数量大,再加上大数定律, 在许多传播环境中,无蜂窝大规模 MIMO 可以具有良好的传播和信道固化 性能。最大比率(MR)、迫零、最小均方误差等线性处理方案接近最优,具

有良好的传播特性。随着信道的固化,信号检测、功率控制和信令控制只能 基于统计信道知识(大尺度衰落)来完成,这大大简化了系统信号处理。此 外,在无蜂窝大规模 MIMO 中,每个接入点都有几根天线,因此,有望通过 低成本、低功耗组件和简单的信号处理接入点来构建无蜂窝大规模 MIMO。



图 22 无蜂窝大规模 MIMO 的系统模型



图 23 基于软件定义网络的无蜂窝架构[202]

要完全实现无蜂窝大规模 MIMO 的上述优势,还面临许多挑战。以下是无 蜂窝大规模 MIMO 今后的一些重要研究方向:

- 可扩展信号处理: 文献[121]提出在接入点中使用 MR 进行处理。使用 MR 处理,每个接入点仅仅使用它本地的信道估计对用于所有终端的符号进行预编码。接入点之间没有共享即时信道状态信息。CPU 与接入点之间的通信主要限于负载数据和功率控制系数。MR 处理很简单,可以用分布式的方式实现以提供良好的性能。其他线性处理方案,如迫零和最小均方误差,在系统性能方面要比 MR 处理好得多^[209],但是,它们不能以分布式的方式直接实现,所以系统是不可扩展的,也就是说,当接入点/终端数量增加时是不可用的。因此,设计一种可扩展的信号处理方案,使其能够与 ZF 和 MMSE 方案紧密配合,是一个具有挑战性和重要意义的研究方向。
- 可扩展功率控制:在无蜂窝大规模 MIMO 中,由于接入点和终端分布在一个 非常大的区域,因此需要适当控制远近效应和用户间干扰,因此,功率分配 是非常重要的。文献[121]和[210]分别提出功率控制需要使最低功率和能量效 率最大化。在 CPU 对所有接入点-终端链路的大尺度系数具有完善的知识的 假设下,通过利用 CPU 求解一系列凸二阶锥程序可以实现这些功率控制。 这些方案不能随着网络的大小(接入点/终端的数量)进行调整。文献[125]提 出了一种分布式功率控制方案,功率控制是在具有局部知识信道条件的接入 点的前提下进行的,这种功率控制方案可以发挥很好的作用,而且是可扩展 的。但是,与文献[121]提出的集中式方案相比,这种分布式功率控制的性能 还远远不够。此外,由于该方案是一种启发式功率控制,其性能在很大程度 上取决于传播环境。可扩展功率控制仍然是无蜂窝大规模 MIMO 中一个非 常重要的开放问题。

3.2.7 云/雾/边缘计算

(1) 计算技术的演进

在过去的几十年里,计算范例已经从分布式计算发展到集中式云计算。现在, 钟摆又摆了回来。云计算是一种将资源和管理集中于云端的体系结构,涉及数据 中心、主干互联网协议(IP)网络和蜂窝核心网络^[67]。由于资源和管理集中在云 端,云计算可以给终端设备和用户提供灵活按需的资源分配、更少的管理负担、 灵活的定价模式(即付即用)以及方便的应用和服务供应^[211]。然而,云计算集 中的资源和管理这一主要优势也是它的主要缺点。集中的资源和管理意味着功能 和控制远离任务产生的地方,由于物理距离长、通信带宽有限、网络连接不稳定 等原因,仅仅依靠云计算已经无法满足 5G 中时延敏感型的应用,例如自动驾驶。 为了在网络的边缘提供云计算能力,2014 年,欧洲电信标准协会(ETSI)的工 业标准化小组提出了移动边缘计算。根据 ETSI 的定义, MEC 是一种可以在无线 接入网络中移动用户附近位置提供 IT 和云计算功能的网络架构^[212]。2017 年 3 月, ETSI 扩大了 MEC 的范围。ETSI 用"多接入 (Multi-access)"一词取代了"移 动 (Mobile)"一词^[211],从此 MEC 也将非移动网络的边缘计算考虑在内。雾计 算最早是由 Cisco 公司提出的。开放雾联盟 (OpenFog)进一步推广了雾计算相 关概念,以扩展和推广边缘计算^[213]。OpenFog 将雾计算定义为一种"系统级的 水平架构,其将计算、存储、控制和网络资源和服务分布在从云到物的连续统一 体的任何地方"^{[214]-[216]}。这要归功于智能设备的激增,它们可以彼此连接,并沿 着云到物的连续体提供共享的、灵活的资源,这推动了被称为"雾即服务"的新 服务模型^[217]。MEC 和雾计算的一个关键区别在于 MEC 只在单机模式下运行, 而雾计算有多个相互连接的层,可以与远距离的云和网络边缘进行交互^{[211][218]}。 文献[219]将 AI 和边缘计算结合用于处理未来出现的通信问题。

(2) 集成的多层计算网络

云计算、边缘计算和雾计算不是相互竞争的,而是相互依赖的。它们相辅相成,彼此互补以形成一个服务连续体,而雾是连接集中式云和分布式网络边缘的桥梁^[213]。例如,雾和边缘一起确保了在数据生成和使用位置附近进行及时的数据处理、情况分析和决策制定。雾与云一起在不同的行业垂直领域和场景中支持更智能的应用和更复杂的服务,例如跨域的数据分析、模式识别和行为预测。因此,云计算、边缘计算和雾计算之间的协作将不可避免地成为集成化的多层计算范例。

多层计算网络可以被看做是一种自上而下、具有多层组织结构的大型公司: 在一个公司内部,各级管理者和员工通常拥有不同的资源和权限来访问、处理数 据、分配任务、发展客户以及做出决策,如图 24 所示^[220]。云计算相当于公司的 最高层,其拥有最多的信息源、最强的分析智能、最大的存储空间和最高的决策 权。因此,云计算负责处理具有挑战性的全局任务,如跨域的数据分析和处理、 异常行为的诊断和跟踪、隐藏问题的预测和搜索、新知识的发现和创造以及长期 战略的规划和决策。另一方面,边缘计算相当于一线人员,其拥有的资源和权限 最少,但能够与不同行业的客户直接打交道。因此,边缘计算擅长处理本地级别 的时延敏感型任务,例如数据收集、数据压缩、信息提取和事件监视。雾计算位 于云计算和边缘计算中间,相当于公司的中层管理人员,和一个具有多层资源和 职责的高效的管理体系一样,雾计算是一个共享计算、通信和存储资源的多层次 结构,其可以在本地级别协同处理各种大型服务覆盖下的复杂而具有挑战性的任 务,如跨域的数据分析、多源信息的处理和现场的决策。由于用户需求在时间上 和空间上是动态变化的,因此雾计算可以提供一种灵活的方法,将网络中分散在不同地理位置或逻辑位置的资源整合在一起,从而为客户提供及时有效的服务。



四、6G新的范式转变

为实现 6G 的性能指标和应用场景,目前的 5G 无线通信网络预计有四个新的范式转变,即全覆盖、全频谱、全应用和强安全。全覆盖将利用卫星通信、 无人机通信、陆地通信和海洋通信来实现空天地海一体化网络。包括 sub-6 GHz、 毫米波、太赫兹以及光频段的全频谱资源将会被充分挖掘。6G 无线通信网络将 通信、计算、控制/缓存和 AI 相结合以实现全应用,使其更加智能化。网络安全 在建设 6G 网络时就应被考虑,也称为内生安全,包括物理层和网络层。

4.1 全覆盖: 空天地海一体化网络

目前在不同网络一体化方面业内已经有了一些初步的工作,包括 5G 与卫星 网络一体化^{[221]-[[224]}、5G 与无人机网络一体化^{[225]-[227]}以及空天地一体化网络^{[228]-[231]。然而,用于全覆盖的空天地海一体化网络理论方法还没有得到很好的研究。 在本节中,我们首先分别总结了卫星通信网络、无人机通信网络、海洋机器类通 信网络的最新进展、技术挑战和潜在机遇。在此基础上,我们介绍了一种可行的 空天地海一体化网络方法,并对未来 6G 系统中空天地海一体化的研究方向进行 了展望。}

4.1.1 卫星通信网络

卫星通信网络可以为扩展现有地面通信网络提供有价值的帮助,如无缝无线 覆盖,被认为是未来无线网络体系结构中有潜力的解决方案^{[21]-[224][232][233]},如图 25 所示。由于能够提供越来越高的无线数据速率,多波束卫星在卫星通信系统 中得到了广泛的应用。对于多波束卫星通信系统,通常采用相邻波束分配不重叠 频谱(或不同极化)的四色频率复用方案来减小同信道波束间干扰。为了进一步 提高卫星通信的频谱利用效率,近年来业界提出使用更为积极的全频率复用方案。 然而,由于全频率复用而引起的波束间干扰是需要谨慎对待的。值得注意的是, 由于卫星信道的传播特性和实际卫星的载荷约束,地面通信网络中广泛采用的抗 干扰方法通常很难简单推广至卫星通信网络中。

未来卫星通信网络存在着以下技术挑战:

 1)卫星信道的精确建模对于卫星通信网络物理层传输设计至关重要。与地 面传播环境不同,卫星无线信道通常具有独特的传播特性,如低秩特性和传播时 延时间长等特点。因此,卫星信道特性需要进一步的研究。

2) 具有提高频谱效率和能效等能力的大规模 MIMO,已被广泛认为是 5G 及 5G 之后蜂窝无线网络的核心组成部分。由于尺寸、重量、成本、功耗、馈电链路的限制等因素,大规模 MIMO 在卫星通信网络中的应用具有挑战性。在设计未来卫星通信网络部署大规模 MIMO 系统时,应考虑到这些实际问题。 3) 与地面蜂窝网络类似,卫星通信网络将涉及多颗卫星,多颗卫星协同向用户终端提供服务。典型的多卫星网络结构包括共享同一轨道窗口的协同卫星传输、不同簇的协同卫星传输、多卫星中继传输等。资源分配是卫星通信网络面临的关键挑战。

4) 作为解决全球无缝隙和全覆盖的补充方案,卫星通信将在 5G 和其他网络中发挥重要作用。业内普遍预期,卫星通信网络将最终并入 5G 网络和地面通信 网络以外的网络。卫星和地面通信网络一体化的主要挑战涉及物理层传输和媒体 访问控制协议,例如随机访问、HARQ 等。



图 25 陆地和卫星无线通信网络的融合

4.1.2 无人机通信网络

无人机以其固有的灵活性、机动性、高度适应性等特点,被认为是未来无线 网络中不可或缺的组成部分,是一项极具发展前景的技术。无人机不仅可以作为 新的空中通信平台^{[234][235]},而且可以在不同场景下作为新的空中用户^[236]。根据 不同高度的平台对无人机进行分类,分别称为低空平台(LAP)和高空平台(HAP)。 无人机应用于实际的特定无线网络时,除了考虑其本身的能力外,还必须考虑其 环境状况,如飞行高度等其他因素。根据无人机的飞行高度,相应的通信网络将 分为两类:基于 LAP 的通信网络和基于 HAP 的通信网络。

基于 LAP 的通信网络具有许多独特的特性,如拓扑结构的多样性和变化性、 交换约束和三维传输特性等。在拓扑结构方面,网格结构具有良好的可靠性和灵 活性。文献[237]研究了毫米波无人机网格网络在波束管理和网络自愈方面的性 能。除了上述特性外,还有三种机制在基于 LAP 的通信网络中发挥重要作用。 第一,为了完成军事或民用任务,通过各种有效的运动控制机制将 LAP 移动到 目标区域,包括单 LAP 运动控制和多 LAP 协作机制。文献[235]提出了一种相对 简单的机制来控制所有无人机节点的期望轨迹,使所有运动中的无人机的总飞行 距离最小化。第二,LAP 进入目标区域后,在 LAP 网络中组网机制开始发挥作 用,以提高服务质量和网络资源利用效率。此外,良好的网络机制可以很好地响 应 LAP 网络中的配置变化。第三,传输机制可以帮助基于 LAP 的通信网络提供 可靠、高速的数据传输。文献[238]在网络恢复方面提出了一种更广泛的邻接发现 方案,通过增加 "Hello" 消息的传输功率来提高包发送率以及减少全网络的断开 时间。此外,在民事领域,LAP 网络还面临着与网络安全相关的各种挑战^[239]。

基于 HAP 的通信网络在提供移动通信和宽带无线接入服务方面取得了前所 未有的进步。机载通信网络作为一种典型的基于 HAP 的通信网络,具有许多独 特的特点。第一,大部分的这些网络节点将具有多个链接,以实现网络可靠性、 高容量和低时延。第二,大多数节点都是可移动的,因此网络链接和网络拓扑结 构都会随着时间的变化而变化,有些节点会比其他节点更快。第三,相邻节点之 间的距离会有很大差异,从几百米到几十公里不等。第四,节点的电力供应是有 限的,因此每个节点的能量效率不仅影响运营成本(如地面网络),还影响商业 可行性。第五,在适用的情况下,为了满足空气动力要求和保持机械完整性,机 载平台上的天线最好是保形的。

与传统的基站或其他空中平台相比,基于 HAP 的通信网络的优势在于其具 有广域覆盖、良好的 HAP 对地信道特性、快速部署和对时空交通需求快速响应 的能力^[240]。首先,考虑到上述优点,基于 HAP 的通信网络吸引了一些前瞻性的 研究。文献[241]提出了单 HAP 和多 HAP LTE 蜂窝容量分析,并将 LTE 技术集 成到基于 HAP 的通信网络中。文献[242]评估通过 HAPs 部署的基于导频的单载 波频分多址接入 (FDMA) LTE 的估计技术,并分析了基于导频的信道估计对单 载波 FDMA 性能在 HAP 上的影响。文献[243]提出了一个新的框架,在信道状态 信息不可用的情况下最大化中继辅助高空平台无人机无线系统的和速率,可以有 效地为地面用户提供宽带无线连接。文献[244]研究了一种通过联网飞行平台小 蜂窝基站进行回传/前传的垂直框架,该框架利用高空平台和自由空间光通信在 接入网络和核心网络之间传输通信。第二,由于平流层特殊的传输特性,HAP 信 道模型与其他无人机信道模型在三维传输特性上存在差异。文献[245]提出了一 种非平稳三维宽带几何随机信道模型 (GBSM),这种模型更适合于刻画高空平 台 MIMO 信道的特性。第三,未来基于 HAP 的通信网络面临几个关键挑战。这 些关键的挑战包括安全和法规、与现有网络的无缝集成、优化的电信通信负载、 优化的信号处理和协议、高速回传/前传链路的需求^[240]以及干扰的影响和有限的 能量^[246]。

与卫星通信类似,在自然灾害或严重地面塌陷的情况下,无人机是一种很有前景的应急无线系统解决方案^{[238][239]}。相比之下,无人机比卫星通信具有更低的成本、更低的时延和更好的信噪比。然而,在空对地和空对空通信中,无人机的高速度导致了动态信道特性随时间和空间的变化。无人机的非平稳信道也给覆盖和连接带来了一定的挑战。此外,机身阴影也是一种由无人机结构设计和旋转带来的挑战^[237]。

以下是未来无人机可能的研究方向:

当无人机作为飞行基站时,无人机的电池耗尽可能导致网络节点失效。
因此,需要对无人机的充电或更换方案进行研究,以确保网络覆盖功能正常。

2) 机器学习可以预测用户的移动性和负载分布,从而使支持缓存的无人机 能够动态优化部署和轨迹。因此,需要开发有效的方法将机器学习与支持缓存的 无人机结合起来。

3) 在 5G 通信系统中,需要一种新的多址接入技术来利用无人机和毫米波技术。此外,毫米波技术的研究需要考虑恶劣天气条件的影响。

4) 在无人机辅助网络中,无人机可以提供多种服务,如缓存、计算、网络控制和无人机蜂窝网络。在这样的网络中,需要对无人机调度进行研究,以实现高能效。

5) 无人机通信涉及窃听、干扰等安全与隐私问题。这些问题可能会对个人 信息造成威胁,因此需要对其进行全面的研究。

6) 高速移动性支持和冲突避免也是未来需要研究的重要挑战。

7)为了使无人机通信在实践中更有效,需要研究更加实际的信道模型,包括湿度、温度、障碍物的影响,以及市区和郊区环境。

8) 天线孔径效率、扫描角范围和扫描速度是另外一些需要强调的问题。

4.1.3 海洋机器类通信网络

海洋的面积占地球表面的 70%以上,世界贸易的 90%左右由国际海运行业 承运。尽管 5G 将要实现革命性的用例,但海洋通信,尤其是海洋机器类通信 (MTC)在 5G 网络中还没有得到足够的重视。可以预见,海洋机器类通信将成 为 6G 无线通信网络的重要组成部分。

对于海洋相关企业以及海洋安全和交通管理的现代化和移动化,物联网在海 洋领域的发展持续挑战传统海洋通信系统,已逐步在满足来自海洋物联网日益增 加需求和独特的要求中显示了其不足之处。这些要求和挑战包括:1)泛在连接 和服务持续性,2) 流量非统一性,3) 服务集中性,4) 设备异构性,5) 简单可靠性,6) 容纳和可扩展性,7) 互操作性,8) 无线频谱国际性^{[247][247]}。

海洋物联网的独特要求不仅保证了独特的网络和空口设计,而且保证了无线 电频谱分配。为了实现这一概念,我们需要研究:

 系统架构:海洋机器类通信的首要要求是提供全球公海上船舶和海岸之间的 普遍连接,以确保海上服务的持续性。这是一项独特而严峻的挑战,因为与 通过大规模部署基站提供广域无线覆盖的陆地蜂窝通信不同,使用这种基站 覆盖公海显然是不现实的。解决方案是部署一个卫星机器类通信网络,形成 一个空地一体化海洋机器类通信系统,如图 26 所示。实线表示物理接口,虚 线表示逻辑接口。控制站既可以是卫星空间站,也可以是岸站。该空地一体 化系统提供无缝全球海洋机器类通信,支持各种海洋物联网服务,包括导航、 观测和监测以及应急动态联网,实现全球海洋信息资源管理、协调和优化。



图 26 用于以服务为中心和软件定义网络的海洋机器类通信网络功能概述与拓扑结构[248]

- 空口:海洋通信与地面通信有很大的不同。海洋机器类通信的独特要求不仅 对海洋机器类通信网络体系结构,也对空口提出了巨大的挑战^[249]。至少三种 类型的无线通信可以被认为一个成熟的海洋机器类通信系统:1)近海和全球 卫星通信覆盖,2)陆地通信近岸高流量区域部署(其中,高频谱效率和时延 是至关重要的),和3)海洋 IoT 近距离通信服务。
- 无线电频谱:国际电联已经为海洋机器类通信分配了国际频谱^[250]。具体而言,如图 27 所示,在甚高频(VHF)海洋移动通信频段(156-174 MHz)中,频率信道 2087、2088、75、76 以及信道 2027、2028 被分配给海洋机器类近距离通信。此外,在 VHF 海洋移动通信频段中,配对信道 24、84、25 和 85 被分配给海洋机器类地面通信,较低的频段(即信道 1024 及 1085)分配至上

行链路,较高的频段(即信道 2024 和 2085)分配到下行链路进行频分双工(FDD)操作。配对信道 26 和 86 分别为卫星信道,1026 和 1086 为上行信道,2026 和 2086 为下行信道。这些信道也可以用作双工信道(上行和下行),用于可选的 TDD 操作。



虽然海洋机器类通信技术仍处于发展的早期阶段,但在国际分配的 VHF 频 谱的支持下,将通过多种技术协同作用在 5G 之后继续发展演进,使海洋物联网 的概念更接近现实。

4.1.4 空天地海一体化网络

人们普遍认识到,由于无线电频谱、服务的地理区域范围和操作成本的限制, 5G 地面通信网络无法实现泛在、高质量和高可靠性的服务,特别是在应对即将 到来的在偏远地区万亿水平的万物互联设备连接。为了在全球范围内提供真正的 泛在无线通信服务,迫切需要开发空天地海一体化网络,实现全球互联互通,使 各种应用在偏远地区也可以访问^{[230][251][252]}。与传统陆地覆盖不同,6G 空天地海 一体化网络将融合水下通信网络以支持广域及深海活动。但是,水下通信存在不 同的信道特性,复杂和不可预测的水下环境也带来很多有待解决的难题。

在空天地海一体化网络中,各种组网技术在覆盖、传输时延、吞吐量、可靠 性等方面都有各自的优缺点。通过有效的内部联网,不同的网络部门可以相互合 作,以高效和低成本的方式支持无缝服务访问和增强服务提供。特别地,卫星通 信可以补充地面网络,以便在有限或没有地面网络覆盖的地区(例如偏远地区、 灾难情况和公海)提供服务。同时,卫星链路(覆盖范围广)和光纤骨干网(数 据速率高)的互补特性可以作为替代无线回传的骨干网技术。无人机通信可以帮 助减轻地面网络负担,并在数据流量负载高度动态的拥挤地区提高服务能力。此 外,具有遥感技术的卫星/无人机可以支持可靠地获取监测数据,并协助地面网 络进行有效的资源管理和规划决策^[253]。

空天地海一体化网络本质上可以是一个分层异构的体系结构。在一体化系统中,考虑多维异构资源的动态协作对于数据传输、处理、感知和缓存的效率是至 关重要的^[254]。为了在具有多维资源和高度动态联网环境的一体化网络中实现高 效的运行和管理,应采用基于 SDN 的混合分层控制体系结构,如图 28 所示。具体来说,SDN 控制器需要大量的网络信息,才能有效地对网络操作和服务供应做出集中决策。这些信息包括用户移动性的统计数据和定期更新、服务需求的时间和空间分布、QoS 要求和网络资源可用性。网络控制架构应该是通用的、可分解的:



图 28 空天地海一体化网络的控制架构

- 针对不同场景的混合控制体系结构: SDN 控制器由于收集大量网络信息而导 致网络管理的高信令开销^[229]。为了避免不必要的信令开销以提高资源利用 率,分布式控制体系结构适用于偏远地区的服务。具体来说,由于用户密度 较低,这种场景下的资源管理相对简单,分布式算法在本地运行时通常可以 实现令人满意的性能,而不需要 SDN 控制器的参与。另一方面,在城市/郊 区场景中,由于高服务需求、多维资源和复杂的通信环境,网络管理是复杂 的。因此,SDN 控制器在这些场景中有利于最大化服务质量和网络性能。
- 城市/郊区场景的递阶控制架构:为了可扩展性,城市/郊区场景中的 SDN 控制器应按分层式组织,其中不同层次的 SDN 控制器针对不同规模的网络运行,即适用于本地、区域、国家和全球域。例如,每个无线端控制器(RSC)在其覆盖区域内以快速响应的方式调度传输和处理,而本地控制器协调 RSC在多个 RSC 的邻域内分配资源。此外,中央控制器充当本地控制器的协调器,执行整个网络的资源管理,以实现端到端的服务交付和无缝覆盖,即使在高移动性的情况下也是如此。

为了有效地将不同规模的各种网段和多样化的无线电接入技术集成到空天 地海网络中,还存在许多挑战和机遇需要进一步研究,包括:

- 移动性管理:在一体化网络中,卫星(特别是低轨卫星(LEO))、无人机、 船舶、地面用户(特别是车载用户)和其他海洋设备引入了多种类型的移动 性。所有不同的移动模式都应该适当地考虑到网络操作和服务供应。对于无 缝移动管理,除了同构段内的水平切换外,还需要创新的工程解决方案,特 别是异构网络段之间的垂直切换。当将低轨卫星网络作为回传时,其容量受 到高度动态的卫星星座拓扑结构和低轨卫星间有限的接触时间的限制,这进 一步增加了选择卫星或地面回传的决策过程。
- 传输网络协议:传输控制协议(TCP)/IP协议组件已广泛应用于地面和卫星网络。然而,由于协议组件最初设计用于支持具有任意网络拓扑的有线互联网中的最佳服务,因此在应用于未来一体化网络时存在一些限制。首先,卫星通信网络(如Starlink)具有动态但确定性的拓扑结构,在未来几年内,随着低轨卫星的密集部署,这些拓扑结构将与互联网上的随机拓扑结构更加背离。其次,低轨卫星具有高机动性,通信时延变化明显。往返时间(RTT)的巨大变化会影响传输速率并降低TCP性能。第三,卫星上行和下行信道的传输速率不对称也影响TCP的性能。低速率上行链路会降低应答的到达速率并增加TCP发送速率,导致下行链路的信道利用率很低。最重要的是,随着新兴的网络虚拟化技术(如5G蜂窝系统)的出现,未来的一体化网络将是网络切片框架下进行的逻辑电路交换。因此,为了有效的、高效的传输协议,in-path网络智能将成为现实,这不同于互联网中的分组交换,在传输控制中只依赖于终端节点^[255]。为了获得最大的性能,有必要进一步研究网络协议中一体化网络的各种特性。
- BB由策略:路由策略是低轨卫星网络和无人机群网络中一个重要的问题。使用低轨卫星来支持长距离通信时,为了给卫星通信用户提供可靠地数据传输服务,卫星之间的路由是必不可少的。一般来说,低轨卫星通信网络具有板载处理与存储能力有限、动态网络拓扑、非均衡数据流、高误比特率等特性低轨卫星通信网络使用多个相似的卫星组成星群,为地球上的用户提供无线网络服务。地轨卫星网络拓扑是时变的,且有可能存在冗余路径,导致了快速重传与延时应答。已有一些协同路由算法被提出,用于提高卫星网络的吞吐量与端到端时延性能。在无人机群网络中,无人机的移动性与高度、发送功率、无人机之间的距离、外部噪声、无人机接入用户流量的空时非均衡分布等因素将极大影响路由协议,导致传统的路由协议失效。已有一些新的路由算法被提出,用于提高无人机群网络的性能。尽管如此,能够适应高移动性、动态网络拓扑、满足不同路由性能的卫星和无人机网络路由策略研究还处于初期阶段,需要展开进一步的研究。

能量效率:与地面上基站大部分时间都连接到电网不同,无人机和卫星是由电池和/或太阳能供电的。无人机飞行高度和机动性所需的驱动能量主导着其能量消耗,而强辐射和空间变温影响着卫星能量消耗。由于电池容量和太阳能转化能力的限制,无人机的作战时间很短,用于传输、处理和传感的卫星功能可能受到严重限制。因此,提高能效以提高无人机/卫星在一体化网络中的续航能力仍然是一个关键而又具有挑战性的研究课题。

6G 无线网络的设想是提供全球覆盖,支持不同的无线电访问技术,利用所 有可用的无线电频谱,并实现强大的网络安全。与传统的无线通信网络不同,分 层异构的空天地海一体化系统将包含未来 6G 网络的高动态,以多维资源提供多 种服务。对于系统管理和服务优化来说,利用突破性和先进的技术是至关重要的。 SDN、AI 和网络切片技术的最新进展为异构网络段的无缝集成提供了支持工具, 以最大限度地利用其互补特性来支持各种新的应用。

基于 SDN 的混合分层网络控制体系结构将在高效的网络控制和段间操作、 动态组网等方面发挥重要作用。此外,基于网络切片的资源管理可以增强针对不 同用户的定制服务供应,这些用户在不同的共存应用程序中具有不同的粒度。考 虑到大规模和复杂的网络信息在空天地海一体化系统的大时空领域内,创新 AI 辅助工程解决方案被自动化系统操作和控制所需要,目的是实现系统管理的灵活 性和扩展性、主动和实时决策以及最大限度地集成系统的总体性能。特别地,AI 是一个很有前景的工具,可以自动化和优化网络切片,包括确定最佳切片粒度, 监视每个服务类型的服务级别协议和在具有不确定性的动态网络环境中切片的 自适应。在用户移动管理方面,应开发基于 AI 的技术,以促进对智能交通等位 置依赖的大数据信息服务用户移动模式的分析和预测。此外,还需要进一步研究 基于 AI 的联合资源管理,用于不同网络段的通信、计算、感知和缓存。空天地 海一体化系统的现代 AI 技术开发中面临着各种挑战和机遇。过去几十年为通信 网络开发的各种基于模型的优化解决方案提供了有用的见解,并为开发用于空天 地海一体化网络的新的基于 AI 的解决方案铺平了道路。未来 10 年,需要学术界 和产业界的共同努力,以应对研发空天地海一体化系统的技术挑战。

4.2 全频谱: Sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段

目前对 sub-6 GHz 和毫米波频段已进行了广泛研究,但太赫兹和光频段仍需 要进一步研究。由于波长和带宽变化,太赫兹和光频段的信道传播特性有很大的 差异,需要仔细研究。在这里,我们总结了不同频段的信道测量,传播特性和信 道模型的工作。在此基础上,提出一种适用于所有频段的通用信道模型框架。

4.2.1 Sub-6 GHz 频段

Sub-6 GHz 频段由于覆盖范围广、成本低,一直是 3G、4G、5G 的主要工作 频率^[256],在 6G 中也是必不可少的。Sub-6 GHz 频段的传播特性和信道模型已经 得到了广泛的研究。传播中的信号衰落主要来源于两个方面:基于路径损耗和阴 影的大尺度衰落,以及来自多径传播的小尺度衰落。通常,小尺度衰落模型可以 分为确定性模型和随机性模型两类。确定性信道模型旨在为发射端和接收端之间 的信道提供真实且具体的描述。随机信道模型将信道特性精简为统计描述,例如 功率时延分布 (PDP)。为了缩小上述两种方法之间的差距,3GPP 开发出一种空 间信道模型 (SCM),不仅包含随机 PDP,而且包含随机角度分布^[257]。此外,针 对 LTE-Advanced (LTE-A)提出了标准化 3GPP 3D SCM 模型,为仰角尺寸提供 额外的灵活性,从而允许对二维天线系统进行建模^[258]。为了给 5G 打下坚实的基 础,研究者已经提出了许多通用的 5G 信道模型,可以支持各种 5G 通信技术, 适应不同的场景,例如 COST 2100 信道模型^[259]、5GCM 信道模型^[260]、3GPP TR 38.901 信道模型^[261]等。然而,在 6G 中,更高的性能要求对信道建模提出了新的 挑战,以支持更多的技术和场景,包括大规模 MIMO、车对车和高铁通信场景。

4.2.2 毫米波频段

传统微波波段的频谱已经变得稀缺,因此在 30 GHz 和 300 GHz 之间的毫米 波通信被认为是在下一代系统中有前景的技术,能够提供超高容量^[262]。毫米波 无线通信系统与使用 sub-6 GHz 频段的传统移动通信系统有很大不同,前者应考 虑传播特性和硬件限制。

众所周知, sub-6 GHz 的 5G 移动通信的目标数据速率为 Gbps 级别,而 5G 毫米波的目标数据速率约为 10 Gbps。有两种提高无线传输数据速率的关键方法: 一种是通过提高频谱效率,另一种是使用较大的频率带宽或频谱资源。微波频段 中的频谱资源已经被应用于各种无线系统,并且几乎被耗尽。因此,为了达到大 约 10 Gbps 数据速率的目标,人们探索了 5G 中的毫米波频谱资源。尽管在毫米 波频段可以找到比微波频段更多的频谱资源,但是提高频谱效率对于实现高数据 速率仍然至关重要。在这种情况下,提出了针对 5G 毫米波的大规模 MIMO 技术 以提高频谱效率,但代价是需要在 5G 毫米波有源天线单元 (AAU) 中使用数十 个甚至数百个射频通道和天线为代价,这意味着制造成本、功耗和体积都很高。 此外,其他挑战还包括在宽带宽情况下所需的 A/D 和 D/A 转换器的高采样率以 及对海量数据的实时处理。

从实际信道测量结果得到的关键结论是毫米波传播会引入严重的路径损耗, 路径损耗会随着载波频率的增加而迅速增加。因此,采用大天线阵在基站和用户 上进行定向传输,以补偿具有高天线增益的距离相关路径损耗并减少多用户干扰, 这与信干噪比(SINR)的增加相对应。由于毫米波波段的波长较短,因此可以以

-54-

一定的物理尺寸发射大型天线阵列,而在 sub-6 GHz,具有相同数量元素的阵列 孔径将显著增大。结合全维或三维波束成形技术,毫米波通信可在波束扫描中提 供多余的自由度,并且不会显著降低覆盖范围。此外,尽管毫米波定向传输的潜 力令人振奋,但是为了减少平均传输距离和保证毫米波网络的总容量,超密集小 蜂窝网络是必要的。 毫米波系统的另一个显著特征是它们容易受到阻挡。毫米 波频段的穿透损耗比低频频段的穿透损耗大得多,并且似乎与站点有关(例如, 建筑结构,材料和入射方向)。另一方面,由于毫米波信号的波长比周围物体的 尺寸小,因此衍射极弱,而反射变得很丰富,这将增强实际毫米波网络的覆盖范 围。

为了在实际环境中促进毫米波网络的部署,从信道测量和建模的角度出发, 对于最佳网络设计和覆盖范围的增强有一些新的考虑因素:

- 高效灵活的信道探测器设计:根据信道测深数据充分了解信道特性是十分必要的。尽管已经在多个毫米波候选频段的多个室内和室外环境中进行了广泛的信道测量活动,但是在不同频段和采用不同信道探测器的情况下,毫米波信道特性的比较是不公平的。因此,需要灵活的信道探测器来支持足够高的测量速度、频段灵活性和多种测量方案。
- 全维信道特性:随着天线单元总数和载波频率的增加,大天线阵的远场距离将显著增大,导致毫米波小单元覆盖半径内的球面波前特性。另一方面,为了利用空间分集或三维波束成形技术,记录空间传播特性是至关重要的(尤其是在仰角内),其中针对不同天线配置提出了几种探测方法,包括:1)定向天线旋转,2)虚拟阵列扫描,3)基于射频开关的天线阵列,4)基于波束成形的相控阵。结合高分辨率参数估计算法,可以在原始数据的基础上估计以功率,时延和角度为特征的更有效的多径分量(MPC)。
- 多种传输方案和应用:现有的毫米波信道模型主要集中于从现场信道测量数据或仿真数据中提取特征,以更通用的方式描述频率相关和特定于站点的信道特征。但是,毫米波传播特性对部署环境和收发器配置敏感,对应于不同的传输方案和应用。此外,在测量计划中考虑可能的毫米波网络架构是至关重要的,这可以通过更精确的系统配置实现。例如,小区半径将随着基站天线高度的增加而增加,因为在密集的城市环境中可以接收到周围建筑物上更多的衍射和反射信号。相反,放置在2-3m的中程基站的特征是从微小区场景(例如,街道峡谷),V2I/路边场景和中继方案得出的需求。
- 4.2.3 太赫兹频段

传统上,将 26.5-300 GHz 频段定义为毫米波频段,将 300-10000 GHz 定义为太赫兹频段。但是,近年来,已普遍接受将 100-10000 GHz (或 0.1-10 THz) 定义为太赫兹频段。

随着无线通信系统中数据流量的爆炸式增长,太赫兹频段被认为是在不久的 将来为 6G 提供大带宽和充足频谱资源的有希望的候选频段^{[263]-[265]}。具体来说, 太赫兹通信能够实现从数百 Gbps 到几个 Tbps 的高传输速率。此外,太赫兹频段 可弥合毫米波和光频段之间的差距^[266]。与毫米波频段相比,太赫兹通信具有更 大的传输带宽和更好的安全性能。

与光频段相比,太赫兹通信更容易跟踪和对准光束,并适应不利的气候条件,包括雾、粉尘等。凭借这些明显的优势,全世界范围内对太赫兹通信进行了广泛的研究。美国、日本和欧盟已正式部署 6G 技术,实现峰值数据速率大于 100 Gbps 的增强型移动宽带,并计划采用 0.275 THz 以上的太赫兹频段。2019 年 11 月,中国成立了 6G 技术研发工作组和整体专家组,这标志着 6G 研究在中国正式开始。此外,2019 年世界无线电通信大会(WRC-19)为移动和固定通信业务分配了从 0.275 THz 到 0.475 THz 的太赫兹频段^[267]。

在即将到来的 6G 无线网络中,太赫兹通信有望支持各种各样的应用场景。 由于太赫兹波的强方向性和高路径衰减,太赫兹通信适用于室内通信场景^[268]。 基于高数据速率和低时延的特性,太赫兹通信可用于为人类生活带来更好的服务, 为不同室内场景的高品质应用提供便利。值得注意的是,最有希望的室内场景之 一是无线数据中心^[269]。目前,传统数据中心的体系结构是基于有线连接的,并 且有线数据中心的布线复杂度和维护成本非常高。为此,已经提出了无线数据中 心的概念以解决传统情况下存在的问题。除了上面提到的潜在的室内太赫兹应用 场景之外,太赫兹通信还将用于安全通信场景^[270]。当无人机完成侦察任务时, 可以将高保真的高清视频信息传输到其他作战单位,例如无人机,有人驾驶飞机 和坦克。在综合空间信息网络方面,有一些典型的太赫兹通信相反,无大气环境的 空间应用不会受到大气衰减的影响,这对于太赫兹频段的长距离空间通信至关重 要。而且,微、纳米级通信场景是近期 6G 的一些潜在应用,例如片上太赫兹通 信、纳米级物联网、纳米级传感网络。

太赫兹频段的巨大频谱资源必将有助于支持 100 Gbps 甚至 Tbps 的超高速通 信。但太赫兹是否会成为 6G 的关键技术还存在疑问。根据当前技术的现状,仍 然需要进一步解决一些关键挑战,包括太赫兹固态、超外差发射、太赫兹调制器、 太赫兹信道模型、太赫兹信道估计、太赫兹波束成形和波束跟踪,以及太赫兹信 号产生、检测、成本、制造等。 通常,存在广泛开发的三种太赫兹通信系统,包括基于固态的太赫兹系统, 基于直接调制的太赫兹系统和基于光电组合的太赫兹系统。首先,基于固态的太 赫兹通信系统^[266]分别在发射端和接收端采用次谐波混频器作为调制器和解调器。 值得注意的是,文献[266]中的 220 GHz 固态通信系统中也采用了超外差收发方 案,其中 220 GHz 子谐波混频器实现了频谱转换的功能。该固态太赫兹系统易于 集成,可节省能源。然而,固态太赫兹系统存在相位噪声恶化、转换损耗等问题, 需要高增益功率放大器。其次,基于直接调制的太赫兹系统,由太赫兹源产生连 续的太赫兹载波,并将来自基带的幅移键控(ASK)调制信号加载到调制器上, 直接实现对太赫兹载波的调制。可以看出,基于直接调制的太赫兹系统灵活性高, 输出功率大,易于集成,体积小。然而,这种调制方式非常困难,而且频谱利用 率相对较低。据我们所知,基于光电组合的太赫兹系统能够实现极高的数据速率 和高带宽利用率。它具有发射功率低、通信距离短、功耗高等特点。

产生和检测太赫兹信号的方法有很多,但是对于无线通信应用,太赫兹集成 电路最重要。迄今为止,已经报道了许多基于 SiGe、CMOS、GaAs、InP 工艺等 的 0.1-0.8 THz 频段的集成电路。对于基于半导体工艺的低成本太赫兹信号生成, 最大的问题是输出功率通常低于 0 dBm,需要使用集成天线提高其等效全向发射 功率。例如,商业化的 0.1 um GaAs 赝晶高电子迁移率晶体管技术具有 fr/fMAX 为 130/180 GHz^[263]的截止频率。采用该技术设计了具有片上介质谐振器天线的 270-290 GHz 倍频链(×9)^[263],其有效各向同性辐射功率约为 2 dBm。芯片与片上天 线的显微照片如图 29 所示。



图 29 芯片与片上天线的显微照片

在 6G 中采用太赫兹技术面临许多挑战。首先,以太赫兹频率传播的电磁波 会遭受严重的大气损耗,并且与微波或毫米波相比,其穿透能力和衍射能力较弱。 其次,利用半导体技术,目前很难产生高功率太赫兹发射电路。第三,当前的太 赫兹接收电路通常具有很高的噪声系数。第一个挑战表明,太赫兹通信更适合地 面上的短距离视距(LOS)应用或卫星之间的长距离链路。第二个挑战是研究创 新的功率放大器设计。一种很有前景的解决方案是使用天线阵列进行功率合成。 第三个挑战需要对高灵敏度太赫兹接收电路进行研究。对于 6G 卫星之间的通信, 高功率太赫兹发射电路,高灵敏度接收电路,以及发射端和接收端上的自适应天 线阵列是三个非常重要的领域。

太赫兹成像系统已经存在了 20 多年。相比之下,对太赫兹通信系统的研究 还处于起步阶段。需要对高性能和低成本的设备及封装技术进行大量研究,使其 在 6G 方面具有商业可行性。

4.2.4 光频段

光谱资源的使用已经成为全球互联网的关键推动力。光纤通信网络不仅连接 各大洲,而且成为现代通信骨干网,为大都市、城市、城镇以及越来越多的家庭 提供高速数据访问。将光纤传输直接拓展至无线接口,以实现最后一英里的连接 和移动访问似乎是很自然的一步。

因此,近年来,学术界和工业界对光无线通信(OWC)技术的兴趣大大增加。 现在,已提出各种各样的光无线通信技术,可以支持许多用例。主要的光无线通 信技术包括:1)自由空间光通信(FSO),2)可见光通信(VLC),3)光学相机 通信(OCC),4)光无线联网,也称为Li-Fi,和5)光移动通信(OMC)。

光谱可用于提供快速、安全、健壮和高效的下一代通信系统。就光带宽而言, 它比射频频段中可用的频谱资源高出三个数量级^[271]。然而,目前的光无线通信 技术需要光到电(OE)和电到光(EO)的转换,这些都是通过光学器件来完成 的,如发送端的发光二极管和激光器,以及接收端的光电探测器或太阳能电池^[272]。 这些器件的电学带宽是有限的,这限制了光谱资源的充分利用。但是,我们清晰 地看到,在过去的15年中,这一领域的研究工作已经取得了阶段性的进展。例 如,最近的研究结果表明,有机发光二极管的带宽得到了显著改善,其数据速率 比目前商用的有机发光二极管数据速率高出20倍,这一结果现已在《自然-通讯》 上发表^[273]。此外,有研究表明,使用成本低于 0.5 美元的商用现成品 LED,可 以实现 15.7 Gbps 的链路数据速率^[274],如图 30 所示。

-58-



图 30 (a) 1.6 米距离时商用现成品红色 LED 的信噪比和比特载入模式。在 900 MHz-1 GHz 之间仍能实现二进制相移键控,远高于设备带宽;(b) 波分复用系统不同颜色(红、绿、 蓝、黄)的信道增益^[274]

通常,由于检测器是平方律检测器,导致接收端灵敏度较低。因此,重要的 是继续开发新的 OE/EO 转换器件和检测器,这些器件具有几百兆赫兹的数量级, 工作带宽接近量子极限,例如单光子雪崩二极管^[275]。此外,重要的是考虑将相 干传输系统用于可见光通信和光保真应用中。初步结果表明,相干接收是可行的, 并且可以获得更高的接收端灵敏度^[276]。

此外,激光光束可以达到接近完美的能量集中,使其成为一个有希望的解决 方案,以实现最高的多路复用增益,同时具有非常高的能源效率^[277]。超高的定 向增益也使信息传输不太可能被窃听,从而使光波链路比其他射频链路更安全 ^[278]。此外,由于检测器的尺寸明显大于波长,光信号不太受路径衰落的影响, 因此光无线通信系统也可能提供厘米级精度的精确可靠的定位服务^{[279]-[283]}。与 全球导航卫星系统或其他射频定位系统不同,大多数光学定位系统不依赖快速伪 噪声编码,也就不需要精确的同步单元和昂贵的射频链。用户位置的先验知识可 用于显著改善射频和光无线基站中的信道估计和波束成形,以及增强 AI 进行资 源分配和移动性管理^[284]。

市面上已经有了利用可见光进行室内无线接入的产品,并且已经部署了许多 试点^[271]。将这些室内网络扩展到室外光无线网络将是下一阶段的重要发展目标 ^[285]。由于采用了基于 OFDM 的先进数字调制技术,可以较好地对抗环境光和阳 光的影响^[286]。此外,普通的太阳能电池板可以将太阳光转化为能量,同时充当 高速光无线信号的数据检测器^[272]。在苏格兰/英国的奥克尼岛,最后一英里的光 无线演示系统已经部署,采用了一个普通太阳能电池板作为光无线数据接收器和 能量收集设备^[287]。

光谱资源用于无线通信的主要优点之一是可以通过简单的光学子系统来控制辐射信号。这就意味着用同样的光源可以覆盖从几平方米的面积,直至小到几 平方厘米的面积。这使该技术非常通用,可用于构建太比特点对点回传系统以及 超小型蜂窝太比特移动接入系统。在后者中,信号可以搭载在现有的照明系统上。 已有实验演示,光保真能够充分有效地支持室内移动通信系统,包括有效的干扰 管理和切换^[288]。另外,可以有效地使用睡眠模式概念。例如,尽管可以打开所 有灯以进行照明,但是当在其覆盖区域内有活动用户时,只有那些照明器可以激 活其通信功能。这将提高效率,同时减少同频干扰。

如图 31 所示,可见光通信也是一种可行的解决方案,可实现水下千兆无线 网络^[289]。这被认为是 6G 趋势中的一项重要功能,它将无线网络功能扩展到地面 蜂窝通信之外。

就自由空间光通信系统而言,无线光链路是在建筑物或卫星之间建立起来的, 在这些应用中,相对位置偏移足够小,可以通过传统的捕获、跟踪和指向(ATP) 子系统来补偿^{[290][291]}。这意味着自由空间光通信似乎是高速回传链路和固定网状 光无线网络的理想选择。但是,高速移动通信场景中对 ATP 系统的要求非常具 有挑战性。在这种情况下,光束网格和相关的光束切换方法可能更有利。在光无 线通信中管理高速移动性和多用户访问的另一种有前景的方法是新提出的光移 动通信技术^[277]。光移动通信使用以光学相控阵为代表的技术进行光束的可配置 调控,服务多个移动用户。与传统的 ATP 子系统不同,光学相控阵通过改变入 射光波的波前相位来控制出射的激光束。具体地,像素化液晶空间光调制器装置 可以用于精细调节光束相位。这种方法为光学系统引入了更多的自由度,其中包 含的大量光学元件的工作方式与大规模 MIMO 系统相似。通过光学相控阵,将 原始单个光束以主动可控的功率分配和出射角度分裂成多个波束,并分别重定向 至多个用户,从而有可能为大量处于不同位置的移动终端提供光纤质量的通信服 务。



图 31 使用小型 LED 的水下通信系统^[289]

4.2.5 5G 及 5G 之后的信道测量与模型

当前有 9 种标准化 5G 信道模型,即 COST 2100^[259]、MiWEBA^[292]、 QuaDRiGa^{[293][294]}、METIS^[295]、5GCM^[260]、mmMAGIC^[296]、3GPP TR 38.901^[261]、 IEEE 802.11ay^[297]和 IMT-2020^[298]信道模型。它们被用来建模各种信道特性,包 括大规模 MIMO、双端/高移动性、三维、毫米波、空间一致性、阻挡、大气衰减 等。但是,它们都无法完全描述上面提到的所有信道特性^[299]。

通过使用不同的信道建模方法来精确描述相关的信道,多种信道模型被提出。 在这里,我们简要介绍 5G 及 5G 之后的信道测量和建模的相关内容,包括毫米 波、太赫兹、光频段、卫星、无人机、海洋、水声、高铁、车对车、超大规模 MIMO、 轨道角动量和工业物联网通信信道。

毫米波和太赫兹信道具有相似的信道特性,如带宽大、高定向性、路径损耗 大、阻挡效应、大气吸收以及更多的散射。与毫米波频段相比,太赫兹频段具有 更严重的路径损耗、大气衰减和漫散射。毫米波信道已在 26/28、32、38/39、60 和 73 GHz 等频段得到了充分的研究^{[300][301]}。尽管如此,仍然需要对 MIMO 甚至 大规模 MIMO、高动态性场景和室外环境进行毫米波信道测量^{[302][303]}。对于太赫 兹信道,大多数信道测量实验都集中在 300 GHz 频段^{[304]-[306]}。300 GHz 以上频段 的信道特性仍不明确,未来需要进行大量的信道测量。确定性毫米波信道模型包 括射线追踪、基于地图的模型和点云模型。射线追踪模型已经应用于 IEEE 802.11ad,基于地图的模型已应用于 METIS。准确定性(Q-D)模型应用于 MiWEBA 和 IEEE 802.11ay。随机信道模型包括 S-V、传播图和 GBSM 模型。其 中 GBSM 已经应用于几种标准化的信道模型和 GBSM 也可广泛应用于太赫兹 信道建模中。同时,还需要对毫米波/太赫兹信道的人体/植被阻挡以及雨/云/雪/ 雾造成的衰减进行建模。

光频段信道具有一些独特的信道特性,例如不同材料的复杂散射特性、发射端/接收端的非线性光电特性、背景噪声效应等。信道场景可以进一步分为直接视距、非直接视距、非直接非视距、跟踪等^[307]。光频段信道没有多径衰落、多普勒效应和带宽限制。测量的信道参数包括信道冲激响应、路径损耗、阴影衰落、均方根时延扩展等。确定性模型包括递归模型、迭代模型、DUSTIN 算法、天花板反跳模型和基于几何的确定性模型。所提出的随机模型可以分为 GBSM 和非GBSM 模型。

卫星通信轨道可分为静止轨道与非静止轨道。卫星通信通常使用的频段是 Ku (12-18 GHz)、K (18-26.5 GHz)、Ka (26.5-40 GHz)和V (40-75 GHz)频 段。卫星通信信道很大程度上受动态天气的影响,包括雨、云、雾、雪等^[308]。降 雨是引起衰减的主要因素,尤其是对 10 GHz 以上频段而言。此外,卫星通信信 道显示出极大的多普勒频移和多普勒扩展、频率相关性、覆盖范围大、通信距离 远等特点。由于卫星通信信道主要是视距传输,接收到的信号除了受天气条件和 对流层闪烁的影响外,总体上是稳定的。可以通过马尔可夫链对接收到的信号幅度进行建模。同时,已有一些工作尝试使用 GBSM 对卫星通信信道进行建模^[309]。

无人机信道显示出独特的信道特性,例如三维部署、高移动性、空时非平稳 性以及机架阴影等^{[310][311]}。通常,无人机信道可分为空对空信道和空对地信道。 窄带和宽带信道测量均已进行,大多数测量在2、2.4和5.8 GHz 频段上进行。测 量的场景包括市区、郊区、农村和开阔地场景。测量的信道参数包括路径损耗、 阴影衰落、均方根时延扩展、莱斯 K 因子、幅度概率密度函数(PDF)等。文献 [310]对空对地大尺度路径损耗模型进行了全面总结。无人机小尺度信道模型包 括确定性信道模型和随机性信道模型。其中确定性模型包括射线追踪模型和两径 模型等分析模型。随机模型包括 GBSM 和马尔可夫模型。

海洋通信信道主要包括空对海和近海表面信道^[312]。对于空对海信道,无人 机或中继站用作与海面上的船舶通信的基站。这种类型的信道也被称为无人机对 船信道。对于近海表面信道,一艘船可以与其他船(船对船)或附近的固定基站 (船对岸基)进行通信。海洋传播环境的独特特性导致其信道具有稀疏散射、海 浪运动、海面的管道效应、时间非平稳、通信距离远以及气候影响等特性。海洋 信道测量多是在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 频段上进行的,最大距离可达 10 km。对于 船对船、船对岸基、移动和漂移场景,路径损耗是不同的。由于折射、反射和散 射等原因,水下信道容易发生多径传播。它在时域和频域都弥散,这导致了时变 性和多普勒效应。水下信道测量通常在几 kHz 频段开展,分布在 2-32 kHz。射线 追踪可以作为一种确定性仿真方法应用于海洋信道和水声信道建模。除此之外, 在实际应用中还采用了两径模型和三径模型。随机模型包括 GBSM 和两径加衍 射功率衰减模型。水声通信信道通常采用瑞利分布、莱斯分布和对数正态分布描 述信号幅度的分布。

高铁通信信道存在切换频繁、切换速度快、多普勒频移大等问题。毫米波/太 赫兹和大规模 MIMO 是未来高铁通信系统可能应用的潜在关键技术。已在开阔 地、丘陵地形、高架桥、隧道、路堑、车站和列车车厢等场景中进行了一些初步 的信道测量^[313]。车载网络是用于 uRLLC 场景的 5G/6G 的典型垂直行业应用。 Sub-6 GHz 频段的车对车信道已被广泛研究,而毫米波车对车信道需要更多的测 量。文献[314]给出了当前毫米波车对车信道测量的综述,总结了在 28、38、60、 73 和 77 GHz 频段上的车对车信道测量实验。所有的信道测量都采用两端单天线 配置,其中一端可以固定或移动。测量的场景包括高速公路、城市街道峡谷、开 阔地、校园、停车场等。毫米波车对车 MIMO 甚至具有高移动性的大规模 MIMO 信道测量在未来都有望实现。对于高铁和车对车信道,需要考虑高移动性和非平 稳性。射线追踪可以用于仿真高铁和车对车信道。高铁随机信道模型包括 GBSM、 基于地图的模型、动态模型、马尔科夫模型和传播图模型。

超大规模 MIMO 利用数千根天线,极大地提高了无线通信系统的频谱和能效、吞吐量、鲁棒性和自由度。它可以与其他关键技术相结合,例如毫米波/太赫兹、车对车和高铁通信。由于使用了大规模天线阵列,信道显示出球面波、空间非平稳性和信道硬化特性,这些特性已在室内和室外环境 sub-6 GHz/毫米波频段的大规模 MIMO 信道测量中得到了验证。在 sub-6 GHz 频段,大规模 MIMO 阵列的尺寸可能为几米。在太赫兹频段,由于等离子体纳米天线阵列的发展,有可能实现高达 1024×1024 的超大规模 MIMO^[316]。对于大规模 MIMO 信道,需要考虑球面波、非平稳性以及簇的生灭特性。通常,可以在 GBSM 中对球面波进行建模,并对每个单独的天线阵元进行准确的传播距离计算。非平稳性通常是通过可见区域和簇的生灭的概念来建模的。

轨道角动量表示电子绕传播轴旋转,由能量流围绕光轴旋转产生^[316]。在特 定条件下,可以从传统的 MIMO 理论实现基于轨道角动量的通信。但是,光束 发散和失调将严重降低轨道角动量电磁波的传输距离。此外,反射会破坏轨道角 动量的正交性,从而降低非视距场景下的性能。到目前为止,只有很少的信道测 量可以验证轨道角动量在不同情况下的可行性,并且没有可行的实用轨道角动量 信道模型。当前的研究集中在轨道角动量电磁波的产生/检测、天线设计以及无 线通信中轨道角动量电位的讨论。有限的轨道角动量信道分析结果主要是为了验 证轨道角动量在不同场景下的可行性。轨道角动量信道建模仍然是一个有待解决 的问题。

工业物联网通信信道具有许多新的信道特性,例如变化的路径损耗、随机抖动、非视距传播、大量散射体和多移动性^[317]。在工业物联网环境中仅进行了少数信道测量。与当前的物联网标准一样,这些测量主要集中在 sub-6 GHz 频段。但是,毫米波频段的信道测量在工业物联网环境中也很有前景,未来可以实现高速数据传输与大规模连接。文献[317]针对工业物联网信道比较了不同的路径损耗模型,包括自由空间路径损耗模型、单斜率模型、3GPP 模型(RMa、Uma、UMi、InH 场景)、工厂室内模型以及整体路径损耗模型。

无线信道是任何新的通信系统(包括未来的 6G 无线通信网络)的基础。由于 6G 信道面临大带宽、复杂场景等问题,具有许多新的挑战,需要在未来进行研究^{[318][319]}。

6G 无线信道测量:信道测量是研究任何新的无线信道的最直接方法。当前的信道探测器的性能受限,无法完全满足信道测量的要求,例如频段、信号带宽、射频通道数、系统动态范围、测量速度等。信道探测器价格昂贵,尤
其是对于高频段而言。信道测量也很费时,甚至在极端环境下无法实现。如 何设计一种能够满足未来 6G 信道要求的高性能信道探测器已成为当务之急。 同时,测量的数据应采用高分辨率信道参数估计算法进行处理^[320]。

- 基于智能反射面的 6G 信道测量和模型:智能反射面是最近提出的超越大规模/超大规模天线的概念。在未来的人造结构中,由于集成了可控电子元件,使整个环境变得智能化^[321]。智能反射面可以通过超大规模天线阵列实现,并可以借助 AI 和机器学习由可重构处理网络进行控制。由于无线信道变得智能和可重构,智能反射面展示了满足未来 6G 需求的巨大潜力。基于智能反射面的 6G 信道测量和建模对于验证和评估智能反射面的性能是必不可少的,但在目前的研究工作还不足。
- AI 使能的信道测量和模型:一些初步的研究已经证明了基于 AI 和机器学习的无线信道测量和模型的潜力,例如通过使用聚类、分类和回归算法进行信道多径分簇、信道场景分类和信道特性预测^[322]。可以将诸如人工神经网络、卷积神经网络和生成对抗网络等不同的机器学习算法应用于无线信道建模^[323]。与传统的信道建模方法相比,使用 AI 和机器学习的好处之一是可以部分预测未知场景、未知频段和未来时刻的无线信道特性。
- 通用 6G 标准信道模型框架:在以往的通信系统中,标准化信道模型的演变呈现出明显的趋势。在 2G 中,信道模型用于窄带单输入单输出信道。此外,在广义平稳假设下,仅考虑二维方位角和时域。在 3G 中,信道模型扩展到宽带单输入单输出信道,并发展到时延域。在 4G 中,信道模型扩展到宽带 MIMO,并进一步发展到三维(方位角和仰角)和空间-时间-时延域。在 5G 中,信道模型扩展到超宽带大规模 MIMO。信道具有三维、非平稳和空间-时间-时延等特性,频段也从 sub-6 GHz 扩展到毫米波频段。同时,情况也更加复杂。标准化 5G 信道模型更倾向于针对不同场景使用具有不同参数集的通用信道模型框架。文献[324]提出了一种通用三维非平稳 5G 信道模型,可以建模 4 个极具挑战性的场景,即大规模 MIMO、高铁、车对车和毫米波信道。但是,所有现有的标准化信道模型仅集中于地面通信网络和直到毫米波频段,而 6G 信道模型框架将更具挑战性。随着 6G 无线信道的异构性和波长尺度的不同,如何使用通用的标准信道模型框架来描述 6G 无线信道是一个有待深入研究的问题。
- 信道模型参数、信道特性和系统性能之间的复杂关系:信道模型参数包括大尺度参数(路径损耗和阴影衰落)和小尺度参数(多径幅度、时延、角度、多普勒频移等)。信道特性包括时间自相关函数、空间互相关函数、均方根时

延扩展、角度扩展、多普勒功率谱密度、平稳间隔等。系统性能使用信道容 量、误码率、能效和频效等性能指标。众所周知,信道模型参数将影响信道 特性以及系统性能。但是,这是一个复杂的非线性关系,将来需要开展更多 的研究。

 6G信道模型性能评估:准确度、复杂度和通用性是评估 6G信道模型性能的
3个指标。信道模型的准确度是通过与测量结果或其对系统性能的影响进行 比较来衡量的。复杂度是通过信道参数的数量、计算复杂度、仿真时间等来 衡量。信道模型的通用性在于,是否可以通过调整信道模型参数将其应用于 多频段和多场景。一个好的信道模型应该是这三个指标的折衷,而这种折衷 的理论仍然是一个有待解决的问题。

4.3 全应用: AI 使能的无线通信网络

随着 AI 和机器学习领域的快速发展,人们期待 6G 网络比前几代网络在运作和服务上都具有更高的智能。在资源给定的情况下,网络运行的优化通常是一个在一系列复杂约束下的多目标性能优化问题。网络资源包括节点和设备能力,可用频谱,计算能力,供能,通信信道等。我们希望用最少的宝贵资源(如能源) 来满足多种性能需求。这些多目标性能优化问题通常是不确定性多项式问题,难 以实现原地优化。然而,随着机器学习技术,尤其是深度学习的发展,配备专用 AI 芯片的基站可以进行相关学习,有效分配资源,实现接近最优的性能。

6G 网络的一个主要组成部分是机载和卫星网络。与地面网络不同,每个节 点的计算资源和能量都有限。它们不能访问所有相关的历史数据,也不能将所有 数据发送到云服务器。学习和决策必须在本地实时完成。在这些和类似的情况下, 目前广受赞誉的深度学习算法和基于大数据的 AI 可能无法正常工作。实现自动 化的一个选择是让所有的代理直接相互联网,相互协作,以最有效的方式共享计 算资源和数据,并共同进行学习和决策。这种智能领域的新范式转变,使得研究 分布式智能进行 6G 资源管理成为必要。

此外,6G 网络的高智能将直接反映在大量以人为中心的服务中。这些服务 包括室内/室外定位、多设备管理、信息搜索、电子健康、监控、网络安全等。服 务智能化使这些服务能够以令人满意和个性化的方式提供。例如,深度学习技术 可以大大提高室内定位的准确性,智能物联网和多模式数据收集基础设施可以实 现个性化的医疗保健。服务智能化可以通过核心网络中的集中智能和接入网络中 的分布式智能相结合的方式实现。

4.3.1 AI 及机器学习技术概述

新兴的 AI 和机器学习性能强大而且可扩展,可以提高下一代无线网络的质量。移动大数据(MBD)^{[325][326]}是移动计算与大数据相结合的新研究领域,在来源、分析、应用、特征和安全性等方面提出了巨大的挑战。AI 和机器学习的核心优势之一在于它们的数据驱动特性^[327]。根据文献[328]的论述,在 5G 网络中,大多数场景很难建立精确的数学模型。AI 和机器学习方法通过从大量数据中学习特征来提高网络的效率、降低时延,而无需依赖预先建立的固定规则。此外,下一代无线网络往往演变为更为复杂的系统,不同的应用和网络对服务的要求也不同^[329]。具有自适应性和预测性的 AI 和机器学习算法可以建立自我意识和智能网络。人工神经网络的分类参见文献[330]。设备与服务器之间交换的海量数据既可以通过递归神经网络进行处理,也可以通过前馈神经网络进行处理。

AI 和机器学习由于其强大的功能,适用于各种网络层^[331]。除了大数据之外, 自适应网络基站、主动缓存和资源分配是 AI 和机器学习技术的三个关键应用^[332]。 超密集的未来无线网络增加了能源消耗和数据流量。AI 和机器学习方法可以通 过开发更有效的分配和调度来帮助提高能量效率。机器学习方法也可用于无线网 络物理层的优化。传统的基于模型的方法不能处理一些复杂和未知的信道,不能 满足下一代无线系统的更高要求。利用机器学习的潜在机会可以重新设计现有的 基带系统,例如解码和模块检测。

AI 算法可用于解决包括感知、挖掘、预测和推理在内的各种问题,这些都 有助于增强 5G 蜂窝网络^[333]。例如,AI 使得感知网络流量、资源利用、用户需 求和可能的威胁的变化成为可能,并进一步使得智能地协调 UE、基站和网络实 体成为可能^{[333]-[335]}。在本节中,我们将介绍基于人工智能的无线通信网络体系结 构,它涉及到无线网络各个层次的应用。

4.3.2 物理层应用

随着 6G 无线通信的快速发展,对频谱效率和能量效率的要求将超越 5G。 与 5G 不同的是,新时代的物理层将变得越来越复杂,这带来了许多新的挑战 ^{[336][337]}。首先,由于通信系统过于复杂且存在许多实际缺陷,很难用数学模型来 精确描述。其次,为了达到全局最优性,必须通过合作来消除不同物理层块之间 的障碍。第三,为解决新的性能挑战而急剧增加的硬件复杂性,要求新的实现方 法使算法更适合实际应用。

人们已经考虑使用 AI 和机器学习应对上述挑战。一方面,单纯基于移动大数据上的训练, AI 和机器学习可以帮助优化通信系统的物理层。另一方面,传统通信系统的建设通常依赖于专业知识。AI 和机器学习还可以帮助解决无法建模或无法精确求解的问题。

在数据驱动方面,已经有很多相关的工作。文献[338]使用深度学习进行正交频分复用系统中的信道估计和信号检测。文献[339]提出了一种基于深度学习的 多用户分布式大规模 MIMO 系统信道估计的导频设计。文献[340]使用深度神经 网络(DNN)进行 MIMO 检测。文献[341]使用深度学习实现检测和极化码译码 的早停机制。文献[342]开发了一个基于深度学习的 SCMA 码本设计和相关译码 优化。虽然数据驱动的学习可以帮助解决一些挑战,而且相当健壮,但它的复杂 度较高,尤其是针对于大规模系统^[336]。

在模型驱动方面,深度学习方法可以利用专业知识和大数据来优化系统^[343]。 由于先验知识可以节省一些不必要的学习努力,因此可以显著降低复杂性。这种 模型驱动深度学习的成功应用在文献中已有报道。文献[344]结合深度学习与专 业知识生成了正交频分复用接收器。文献[345]提出了一种基于去噪的波束空间 毫米波大规模 MIMO 系统的近似消息传递网络。通常,许多物理层模块可以通 过迭代方法实现的贝叶斯最优估计来解决。深度学习也可以与展开的迭代估计过 程相结合,学习所需的参数如图 32 所示。这种方法已经在大规模 MIMO 检测 [^{346][347]}和极化码译码^[348]中得到了应用。文献[349]研究了相应的硬件实现。

作为模型驱动的 AI 和深度学习的扩展,最近提出了一种交互学习设计范式 (ILDP),以充分利用无线通信领域的知识和 AI 和深度学习的自适应学习能力 ^{[350][351]}。与传统的非交互式模型驱动方法相比,交互学习设计范式由通信模型模 块和自适应学习模块组成,两者以交互的方式工作,能够实时提取有用的信息, 充分适应不断变化的环境。交互学习设计范式已用于设计多用户毫米波通信的有 效波束训练和跟踪,并通过深度强化学习^[350]和强盗学习^[351]实现。结果表明,该 方法在不需要预先了解动态信道建模信息的情况下,可以实现动态空间模式的捕 获和波束训练策略的智能调整。交互学习设计范式不仅局限于物理层,它同样在 无线通信动态环境的智能检测方面功能强大,有广泛的应用。



图 32 用于物理层通信的深度学习辅助的贝叶斯最佳估计器

除了物理层模块之外,深度学习还可以用于设计端到端系统。文献[350]使用 深度学习生成端到端系统,其中包括所有与信号相关的功能。文献[351]开发了一 种新的算法来设计端到端系统,甚至是在信道模型未知的情况下。这个功能是通 过使用真实梯度和近似梯度迭代地训练发送器和接收器来实现的。如文献[337] 所述,端到端系统也可以采用深度学习辅助的迭代贝叶斯求解器。结果系统在实 现效率上具有优势,因为所有物理层功能都可以用同一个硬件加速器统一实现, 该加速器可针对不同的应用程序进行重新配置和扩展。为了部署基于深度学习的 方法,有效的硬件实现至关重要,它是连接理论和实践的桥梁。

现有的研究工作已经展示出将 AI 和深度学习应用于物理层通信的优势。由 于深度学习的强大功能,传统方法无法解决的问题可以得到很好的解决。然而, 由于这一研究课题还处于起步阶段,未来的研究还存在许多问题^[352]。首先,我 们需要确定深度学习是否会超越传统方法,或者它们有自己的应用领域。其次, 我们必须平衡基于深度学习的物理层通信的性能追求和训练工作。第三,我们需 要为通信系统找到合适的学习度量标准。第四,生成足够且有效的用于学习训练 的移动大数据至关重要。最后,为了使基于深度学习的方法能够投入应用,有效 的硬件实现十分关键,它可以连接理论和实践之间的鸿沟。

4.3.3 上层应用

通过学习无线网络基础设施和传感器设备产生的大数据的特征,可以优化网 络配置,提高网络性能。蜂窝网络中,人工智能辅助的网络流量,性能预测和控 制已经得到了研究。

由于客户对数据流量的质量和数量的需求大大增加,5G场景下的网络流量 控制成为一个关键问题。对于5G超密集网络流量管理,文献[353]采用长短时记 忆网络(LSTM)资源控制算法预测网络基站流量负荷。根据预测结果调整资源 操作策略以避免拥塞,从而获得更低的丢包率、更高的吞吐量和平均意见得分。 在 eMBB、mMTC 和 uRLLC场景下,无线流量预测模型在5G流量管理中的其 他应用已经在文献[354]中讨论过。有监督学习、无监督学习和深度强化学习算法 可用于交通管理。在5G mMTC 和 uRLLC场景中优化上行通信的分布式高效机 器学习算法也得到了讨论。此外,文献[354]还提出了 AI 辅助的内容检索算法框 架来优化数据流量。

机器学习技术可以帮助优化和管理移动网络,并通过性能预测降低运营成本。 文献[355]首先对预测任务进行分类,然后使用相关的机器学习方法,如高斯过程 回归、时间序列的指数平滑、随机森林等,来证明在真实数据集上的出色的预测 结果,从而降低无线移动网络管理的运营成本。文献[356]利用信干噪比、载波间 干扰(ICI)、调制编码方案和发射功率来表征性能,预测最佳的无线电参数,并 提高网络性能。文献[357]利用用户流量来预测移动交通需求,提供更好的资源分配。最近,联邦学习也被考虑用于无线边缘网络,并引起了学术界和工业界越来越多的兴趣。文献[358]对该主题进行了全面调研。

未来 5G 和 6G 网络的一个关键挑战是引入基于波束空间传输的干扰管理。 在波束空间域,用户位置等几何信息对于性能优化具有重要意义。然而,由于大 量的波束和相邻单元,以及波束空间信道与基站参数(如倾角)之间的复杂关系, 使得干扰建模和后续性能预测/优化变得非常困难。因此,通过利用大量的历史 波束空间信道信息,机器学习工具可以在感兴趣的场景的任意几何位置甚至直接 的性能度量上对基站参数和波束空间信道信息之间的近似函数进行建模。针对上 述问题,人们提出了多种学习框架。常见的关键问题是波束空间信道信息的压缩, 这严重影响了学习网络的复杂性。

图 33 给出了一个物理模型协助的基于深度强化学习的 5G 网络优化典型框架。网络控制器观察网络状态 (*s_t*)。然后控制器根据网络的状态,通过神经网络来确定网络的组态策略 (*a_t*),如波束模式、功率控制等。*π_θ*代表了网络参数*θ*和*π**代表最优策略,也就是使累积的性能收益最大化。状态转移概率*P*(*s_{t+1}|<i>s_t*,*a_t*) 依赖于网络环境,控制器一般不知道网络环境。网络配置完成后,网络环境反馈覆盖和干扰水平等性能增益 (*r*),可用于训练深度强化学习神经网络。此外,为了进一步提高深度强化学习的容量,该框架在仔细分析测量数据和合理假设的基础上,引入了一个合理的 5G 物理模型。物理模型可以扩展神经网络的状态,也可以监督神经网络的训练过程。深度强化学习神经网络的效率和有效性有待于进一步提高。



Performance Evaluation

图 33 基于深度强化学习和物理层模型的网络优化框架

4.3.4 资源分配应用

资源分配的一个重要任务是预测用户未来的服务请求、位置和移动性,以及 5G 蜂窝网络的网络条件。这有助于按需资源编排过程适当地平衡资源,保证高 资源效率,并通过避免重复来降低网络成本。例如,可以适当地配置中央单元的 处理资源,根据预测的流量波动实现更多的合用增益。此外,如果在相应的覆盖 区域内没有预测到流量,则可以关闭访问资源的某些部分。AI 在这些领域有很 大的潜力。图 34 给出了基于深度学习的资源管理的总体框架,包括数据采集、 模型构建、深度神经网络优化和配置。



图 34 虚拟车联网示意图

AI 可以帮助有效地分配无线电资源。AI 在资源分配中的一个重要应用实例 是智能车辆网络。车载网络由于其严格多样的 QoS 要求,以及快速时变无线信 道和网络拓扑等车载环境固有的动态性,给传统无线通信系统带来了前所未有的 挑战。如何动态地分配和智能运输系统的资源,以在很小的供应开销下最大化终 端用户的 QoS,这是一项非常重要的任务。AI 提供了一个强大的工具来解决这 些问题^[359]。在车辆网络中使用 AI 进行资源分配的关键动机在文献[361]中进行 了讨论。根据文献[360],深度强化学习方法可以解决传统优化框架难以处理的智 能运输系统中的资源分配问题。

随着最近增强现实和自动驾驶等创新应用的发展,越来越多的计算密集型和 数据密集型任务对时延敏感。AI 还可以通过智能地使用计算、缓存和通信来帮 助改进这些应用程序。超密集网络中的移动边缘计算有望成为满足低时延需求的 有效解决方案。然而,边缘云中的分布式计算资源和移动设备电池中的能量动态, 使得用户任务的卸载变得非常具有挑战性。为了解决这一难题,一个名为"Edgent" 的协作和按需深度神经网络协同推理框架在文献[361]中被开发出来。其核心思 想包括:1) 深度神经网络分区,自适应地将深度神经网络计算在设备和边缘之间 进行划分,利用邻近的混合计算资源进行实时深度神经网络推理。2) 深度神经 网络调整,通过在合适的中间深度神经网络层提前退出,加速深度神经网络推断, 进一步降低计算时延。此外,文献[362]构建了一个智能卸载系统,利用深度强化 学习进行车辆边缘计算。为了设计有效的资源分配策略,文献[363]提出了一个多 时间尺度框架的深度强化学习。

AI 技术也可以用于分配缓存和计算资源。根据文献[364],基于人工智能的 缓存通信是重要的研究方向。文献[365]中开发了一种基于深度强化学习的主动 缓存机制,用于车载多视图三维视频流,其中使用了聚类技术来实现深度强化学 习算法在可变大小的动作空间中工作。此外,编码缓存可以根据所有用户可用的 累积内存创建多播机会,文献[366]对其进行了修改,以使传输更健壮,适应于时 好时坏的无线网络质量。在编码高速缓存研究的活跃领域,用于描述编码高速缓 存方案的放置分发阵列(PDA)引起了广泛的关注。然而,设计放置分发阵列具 有较高的计算复杂度。文献[367]提出了一种深度神经结构来学习放置分发阵列 的构造,以降低计算复杂度。利用神经注意力机制和强化学习方法,解决了放置 分发阵列的可变尺寸问题。文献[368]提出了一种深度强化学习方法来减少用于 网络、缓存和计算资源的动态编排的集成框架的复杂性。

正如文献[364]中所指出的,在启用缓存的网络中,用于网络流量控制和资源 管理的 AI 仍然不成熟,这是因为在学习结构的适当输入和输出数据集下,很难 对网络环境和流量特征进行唯一描述。我们应该设计一种智能技术,它可以事先 预测一个环境动作事件,从而使策略和智能体能够主动地根据潜在的动作进行相 应的调整。

4.3.5 智能内生网络(IEN)

5G 主要侧重于解决垂直行业的特定场景和关键应用的迫切需求。之后,如 何扩展网络容量,实现随时随地的高带宽移动连接,进一步支持感知互联、全息 传输、数字孪生等,成为移动通信网络演进的新愿景^[3]。面临的服务需求在支持 虚拟和物理融合、身临其境、全息、情景化、个性化、泛在沟通和网络需求的集 成异构网络技术和空天地海集成网络^[369],当前网络的操作模式与基于规则的算 法,严格限制预设规则,难以动态地适应不断变化的用户需求和网络环境。网络 运营经验不能有效积累,限制了网络能力的持续提升。这意味着在目前的操作模 式下,网络没有自我进化的能力。任何升级和改进都必须依靠大量的专业工作, 这对于规模和操作复杂性都是前所未有的 6G 网络来说是无法接受的。在网络中 加入智能基因,形成智能和自我进化能力,是解决上述问题的重要途径。

目前,以深度学习和知识图为代表的 AI 技术发展迅速。通过将 AI 技术引入 网络,对网络及其相关用户、服务和环境的多维主客观知识进行表征、构建、学 习、应用、更新和反馈。基于所获得的知识,可以实现网络的立体感知、决策推 理和动态调整。因此,网络可以根据我们需要的任何新服务自动进行更改。我们

-71-

将这样的网络称为"智能内生网络"。智能内生网络受益于自进化的闭环结构, 如图 35 所示。



图 35 智能内生网络的自我进化闭环结构

到目前为止,很多 AI 方法已经被应用到网络研究中,但大多数只是利用机器学习算法来解决特定的网络问题^{[370]-[372]}。然而,智能内生网络并不是简单地将 AI 方法应用到具体问题上的结果,而是设计和构建适合于网络系统的 AI 系统的 实践,以及该系统相应的网络架构和运行环境。这一目标的实现是在现代 AI 原理和方法的指导下,结合网络系统的自然属性和运行特性。

按照这一方向,构建智能内生网络需要解决的理论问题和关键技术包括:

- 6G 网络的知识图表征与构建技术:这是关于 6G 网络多维主客观知识的表征、构建、获取、治理和进化的机制,包括构建智能数据模型及其交互模型,以及潜在模型的自动挖掘和细化。这是实施智能内生网络的理论基础。
- 全息网络立体感知技术:包括基于知识图的立体感知信息元素的构建方法, 以及全面、准确、及时的多维信息感知、提取和预测的机制。这些技术将为 网络决策提供良好的信息基础。
- 柔软而灵活的网络资源调度机制:基于知识图和多维立体感知信息,研究计算、路由、缓存等各类资源的弹性分布,以及鲁棒主动提供和跨层跨域协同优化。
- 网络自进化机制:研究方向包括支持自进化的灵活网络架构、网络自进化内核的构成、表征复杂网络进化的动态模型设计、意图驱动的网络经验提取、重组、演绎方法等。

4.3.6 面向 6G 的信息、通信与数据技术融合

预计在 6G 时代,信息通信和数据科技将会更加深入地融合,从而加速网络设计的各个方面的创新和集成,例如网络架构、核心网络、无线接入网、物理层和更高层的协议栈。智能、开放、绿色和柔性将是 6G 网络的关键特征。由于无线通信网络的绿色^{[373]-[375]}、柔性^{[376][377]}和开放的设计已经在 5G 中得到了深入的研究,所以本节将重点介绍在 6G 的设计中引入 AI。

大数据技术和 AI 在无线通信行业的蓬勃发展,让人们对未来无线网络的智能化程度产生了丰富的想象。通过运营商和顶级公司强大的数据采集平台,几乎所有的无线数据都可以从核心网络、无线接入网络和服务提供商那里收集到。在各种应用中已经证明,大数据分析^{[378]-[384]}能够有效地对收集的数据进行存储管理,并能够处理这些数据,帮助获得每种类型数据的关键特性,并以足够细的粒度对它们进行标记。与基站的传统数据处理相比,大数据平台能够通过强大的机器学习技术(如支持向量机(SVM)和深度学习)进行预测和规定性分析。例如,可以对用户位置、移动行为和服务类型进行可靠的预测。此外,还可以获得信道环境、用户密度和分布、相邻小区干扰、空间和时间流量变化等无线接入网络特征。这些预测使灵活的运行配置能够稳定无线连接、更好地利用无线电资源、主动网络控制,甚至设计 AI 使无线通信网络具有灵活配置的网络功能、信令和处理。

近年来,人们对大数据分析和人工智能在无线通信中的应用进行了深入研究。 例如,文献[378]认为,海量的移动大数据并不是负担,通过对其分析,不仅可以 提高无线服务质量,还能开发基于大数据感知的无线网络,产生新的应用服务。 文献[379]解决了异构网络中的资源管理、缓存服务器部署、体验质量建模和监控 等问题,并提出了无线大数据驱动框架下的解决方案。文献[334]从网络架构、协 议栈、信令过程和物理层操作的角度讨论了无线大数据如何影响无线通信网络设 计。文献[381]提出了一种新的数据驱动的分层分布式智能运行架构,该架构实时 运行并识别所需的数据和各自的工作流,以促进智能网络优化。这种设计方法在 开放无线电接入网络联盟(O-RAN)的无线电接入网络体系结构中得到了很好的 体现。

将 AI 能力引入行业网络设计是从核心网络开始的。3GPP^[385]批准了一个关于网络数据分析(NWDA)的研究项目,目标是定义一个为向核心网络策略控制功能提供网络分析的网络实体。

网络数据分析的目地是识别服务特征,形成一个大数据模型,然后用于对传输流量进行分类,以实现定制和改进的服务业务。为此,一项关于 5G 大数据驱动网络架构的研究项目已经在 3GPP 服务和系统方面工作组2(SA2)获得批准。此研究项目旨在研究大数据驱动的网络架构的解决方案,该架构可以管理所有技

术领域的信息,并将其用于上下文挖掘。这是非常必要的,因为无线应用程序可 能不希望向运营商泄露它们的秘密,这使无线网络的操作和管理变得十分复杂。 然而,这项工作主要集中在核心网络上,因此由于交互开销和进程时延,本质上 无法有效地处理某些无线接入网络的增强功能。除了开销和进程时延方面的考虑, 值得注意的是,大多数无线接入网络的增强功能在很大程度上依赖于网络特性, 比如信道环境、用户密度和分布、相邻单元干扰、无线电资源可用性。因此,对 于无线接入网络来说,更合适的做法是在本地无线接入网络端也包括无线大数据 分析。核心网络可能提供一些有用的上下文信息和基础建模。为了支持无线接入 网络的无线大数据分析,很有必要在无线接入网的网络端引入一个逻辑大数据功 能,并考虑其与不同层次的无线电接入网络和核心网络的接口,用于数据/模型 收集和策略/参数分发。开放无线电接入网络联盟正在积极调研这一点。

物理层标准化设计一直与物理层收发器的实现密切相关,而物理层收发器自 通信开始商业化以来,就一直采用编码、调制、波形、多天线等模块依次连接实 现。这种实现需要复杂的内部接口和控制信令。新出现的支持 AI 的物理层实现 方法可以从根本上突破传统的逐模块收发器实现的限制。如文献[386][387]所述, 物理层收发器可以通过先进的神经网络来实现。然而,受到数据采集和数据规模 的挑战,目前的物理层端到端学习结果是基于统计信道模型生成的模拟数据进行 训练的。事实上,这些统计信道模型很难准确地描述真实无线传播环境中的所有 信道状态。因此,在对模拟数据进行训练时,无法保证端到端学习的准确性,这 就使得从真实的无线电环境中学习数据变得十分必要。

支持 AI 的白盒基础设施硬件上的空口(包括物理层及其以上的层)的自动 升级^[388]有利于运营商潜在成本的显著降低,这将不可避免地影响基础设施供应 商的研发路线图,在未来的标准化中带来很多争论。但是,无论标准化过程是快 是慢,基于 AI 的无线通信网络设计方法都将越来越受欢迎。

4.4 内生安全

由于 6G 网络预计将整合所有的运营网络,网络安全成为一个重要的问题。因此,在本节中,我们总结了物理层安全、量子安全等方面的最新进展。然后,讨论了不同类型网络背景下 6G 中的网络安全问题和可能的应对措施。

4.4.1 现状和主要问题

本小节首先对经典密码学、物理层安全和量子域安全系统进行简单的介绍。 一般而言,通信双方通常被称为 Alice 和 Bob,代表发射端和接收端或信源和信 宿。

(1) 经典密码学

-74-

在一个经典的密码系统中,合法的发射端生成所谓的明文并传输给接收端。 为了避免信息泄露,明文通过使用密钥和特定的加密算法加密后,生成所谓的密 码文本,就可以通过不安全的公共信道传输。除非窃听者知道密钥,否则无法破 译信息。由于接收端知道密钥,因此它可以利用密钥和解密算法再生原始明文。 因此,为了防止潜在的窃听者截获密钥,必须通过安全信道从发射端向接收端传 输密钥。

然而,流行的所谓"一次性衬垫"技术需要一个至少与明文一样长的密钥,因此为产生足够长的密钥所带来的开销相当大。除了对长密钥和安全的密钥分配 信道有所要求从而造成巨大开销外,经典密码学的另一个缺点是它无法检测信息 是否被窃听者所篡改。

(2) 物理层安全

物理层安全解决方案利用无线信道的随机性来生成用于加密机密信息的密 钥,并利用一系列其他复杂的技术来降低窃听者和其他恶意用户收到的信号质量。 还能够借助于复杂的信号设计和信号处理技术,支持无密钥的安全传输^{[389][390]}。

简单地介绍一下如何从电波传播所形成的随机时变物理层信道特性中提取 密钥。从概念上来看,最简单的情况是无线信道在发射端和接收端节点之间的上 行链路和下行链路方向中可能被认为是相同的。在这种情况下,FDD和TDD模 式有不同的影响密钥生成的问题,如TDD系统的采样时延和FDD系统的上行 和下行链路之间频率不同所造成的不相关衰减。同样,上行链路和下行链路之间 的硬件差异也导致了不完美的互易性。另外,上行链路和下行链路接收机处的符 号间干扰和小区间干扰也不尽相同。

因此,避免完美的互易性假设可能更安全。当然,这时必须借助于成熟的技术来估计信道,通常是依靠导频信号。窃听者通常处于不同的位置,经历独立的衰落。如果上行链路和下行链路接收机不利用上行链路和下行链路信道的互易性, 而是独自估计它们之间的信道,那么窃听者就不能轻易地窃取密钥。

一个最简单的想法是依靠接收信号强度来产生密钥,这样就可以获得足够高的密钥生成率来支持高速率的数据传输,前提是传播场景要有足够的动态变化特性。简要介绍一下简单的 TDD 设计实例的四个基本过程,其中接收信号强度通常是在上行链路和下行链路接收机处进行估计。这些接收信号强度指示可以通过三个连续的步骤进行处理。1)量化,这让人联想到模数转换;2)信息调和;3)隐私放大。简单来说,信息调和和与隐私放大是必要的,因为上行和下行链路接收机的接收信号强度样本往往存在差异,这将导致不同的接收信号强度序列量化 信。

(3) 量子密钥分发和安全直接通信

-75-

与经典密码学需要两个信道不同,量子密钥分配系统中使用了三个信道,即 不安全的公共信道、量子信道和经过认证的公共信道^{[391]-[393]}。在不安全的量子信 道上,通信对象的发射端和接收端可以依靠经过认证的公共信道来约定一个密钥。 从某种程度上说,可以认为,如果窃听者试图观察量子域的信息,那么他/她对量 子信息的篡改会破坏量子态,从而使量子态坍缩回经典域,信息变得无用。量子 密钥分配的另一个好处是可以检测到任何恶意窃听行为。一旦发射端和接收端选 定了密钥,就可以进行基于一次性衬垫的加密,这与经典密码系统类似。因此, 基于量子密钥分配的系统也是在量子密钥分配生成密钥后,使用不安全的公共信 道来传输密文。

还有一种高安全性的量子通信协议,它超越了量子密钥分配的密钥分配功能。 这就是所说的量子安全直接通信,它具有窃听侦测的能力。在量子安全直接通信 中,保密信息通过不安全的量子信道由发射端向接收端直接传输,尽管它也需要 一个经过认证的公共信道,但只有合法用户的窃听侦测才需要用到这个信道。这 是通过映射机密信息来实现的,例如将电子的自旋映射到光子,合法的接收端可 以估算出误比特率,以检测任何恶意篡改量子信息的行为。而经典的密码学,物 理层安全和量子密钥分配则是在密钥协议上进行中继,然后进行实际的通信会话。 相比之下,量子安全直接通信中不需要秘密密钥,即使有窃听者在量子信道内, 也不会泄露任何机密信息,而且不依赖显式数据加密和解密。因此,如果它能全 面发展起来,在下一代安全通信方面将展现具有巨大的潜力。

在目前的技术条件下,有很多网络安全问题需要解决。当前网络安全问题、 6G中的网络安全重点以及可能的安全和隐私问题的策略将在 4.4.2 和 4.4.3 节中 进行总结。

具有全新组网理念的 5G 移动网络与前几代移动网络有着本质上的区别,可以提供包括移动业务、关键行业基础设施、垂直社会服务等各种新型网络业务的宽带和定制化能力。这些新的网络特性和 5G 的广泛应用,给安全和隐私提出了新挑战。

在传统网络中,路由和流量工程等突出功能通常依靠定制的操作系统,被集成到专门的硬件中。然而,这种僵化的架构可能不适合最先进的数据中心、云计算和典型的异构网络环境的动态资源需求。此外,它并不能灵活升级新功能。利用软件定义网络、网络功能虚拟化、网络切片、移动边缘计算等先进技术的软件化,5G在传统的基于硬件和软件的网络架构方面产生了重大转变。5G核心网的基于服务的架构使得虚拟化安全问题十分突出。虽然软件定义网络给网络安全和隐私保护带来了潜在的挑战,但也实现了全网一致的安全机制^[369]。

特别地, 欧洲电信标准协会(ETSI)规定了网络功能虚拟化安全和信任准则 ^[394], 虚拟功能之间的身份验证、完整性检查和访问管理等都是用来建立不同实 体之间的信任关系。此外, 最新的 AI 和机器学习技术可以为软件定义网络/网络 功能虚拟化相关问题提供快速、自适应的安全和隐私保护。对于网络切片相关的 安全问题, 需要保证切片的隔离和每个切片中关键敏感数据的访问控制。

针对 5G 网络中的隐私问题, 3GPP SA3、IEEE-P1912、5G PPP 安全工作组、 NGMN 5G 安全工作组等都对 5G 网络的隐私维护和保护提出了要求和规范。 3GPP 在第 15 版^[395]中定义了用户的隐私要求。IEEE 概述了终端用户设备的隐私 架构^[396]。ETSI 描述了信任模型,以增加非信任环境下的数据隐私保护^[397]。

为了确保 5G 网络的全球商用和电信网络的演进,5G 安全架构的标准化是 关键。3GPP 在第 15 版^[398]中提出了六级安全架构。5G 安全架构从纵向上可以分 为应用层、家庭层、服务层和传输层。这四个层是安全隔离的。它们通过标准化 的协议互联,可以支持厂商之间的安全互联和互操作。总的来说,全球产业界应 该共同努力,用标准的 5G 安全架构来解决架构、技术和商用化的安全风险。

4.4.2 6G 中的网络安全隐患问题

虽然 6G 网络面临着移动设备的激增和应用的日益丰富,但以人为中心提供 个性化服务的移动通信仍然是 6G 的核心。随着新的通信使能技术的利用,6G 网 络中可能存在的安全和隐私问题主要体现在以下几个方面。

(1) AI 带来的安全和隐私问题

AI 引发了人们对安全和隐私问题的担忧,包括数据安全、AI 模型和算法安全、AI 软件系统和框架的漏洞、AI 技术的恶意利用等。

为了数据安全,服务商需要收集大量的数据来训练 AI 模型,然而,收集到 的数据中可能包含用户的敏感信息,如用户身份、轨迹、位置等。而这些敏感信 息在数据传输和处理过程中,有很大的概率被泄露。对于 AI 模型和算法的安全 性,攻击者可以通过白盒攻击来获取 AI 模型。即使 AI 模型的架构和参数未知, 攻击者也可以通过检查输入和输出来接近模型,进一步找到 AI 模型的攻击点和 劣势。在这种情况下,对 AI 模型的动态保护,如监控数据流和模型的输出等, 就显得至关重要^[399]。

由于人工智能系统实现的复杂性,导致人工智能软件系统和框架存在一定的漏洞。例如,谷歌的深度学习系统 TensorFlow 存在一些传统的、基础的网络安全问题。通过构建一个特殊的模型文件进入深度学习框架,可以控制整个 AI 系统。 这些漏洞所带来的危害,会导致针对深度学习应用的拒绝服务攻击、控制流劫持、 分类逃逸和潜在的数据污染攻击^[400]。

(2) 物联网网络中的安全问题

大规模、低功耗的物联网设备的访问和管理很容易引起信令风暴。为了支持 大规模的 IoT 部署,需要高效的认证机制。由于 IoT 设备交互频繁,在互联方面, 应建立统一的安全标准,防止攻击者利用互联协议进行恶意操作。

传统的加密和解密安全机制依赖于密钥管理系统和计算资源。而物联网设备的安全能力受限于其计算能力、存储空间和电池能量。因此,有必要设计一种轻量级的安全机制,以支持低功耗 IoT 设备的节能访问。另一方面,海量的设备互联扩大了 IoT 网络的受攻击面。因此,6G 应加强对网络基础设施的安全防护,和对海量 IoT 设备的分布式防御机制。

(3) 无人机网络中的安全问题

受限于功率和重量的严格要求,无人机无法像地面基站那样支持复杂的加密 算法。因此,无人机更容易出现安全漏洞。应该为无人机设计轻量级加密协议。 考虑到无人机的工作模式,无人机可能会落入攻击者的手中。因此,无人机应支 持内部攻击防护机制,使得物理入侵不被允许访问操作系统内部功能,以防止物 理篡改^[401]。

4.4.3 6G 网络安全和隐私问题的可能对策

为解决上述 6G 网络中的安全和隐私问题,应发展先进的安全和隐私技术。

(1) 传统的密码学方法与更轻量级的算法

传统的基于计算复杂度的加密、认证、授权、签名、隐私保护等密码机制仍 将是保障网络安全和数据隐私的主要方式。但是,无线连接的不断发展,各种时 延敏感流量的激增,以及 6G 中终端设备在能源、处理能力、存储、硬件等方面 的限制,对更高效、低成本的安全和隐私保护方案提出了要求。基于分组认证、 匿名服务型认证策略等轻量级、灵活的解决方案^{[402][403]},将是基于密码学的安全 与隐私的主要研究和发展方向。

(2) 基于物理层的方法

物理层安全技术自 1949 年被初次提出^[404], 1975 年开始发展^[405], 物理层安 全技术有望在 6G 网络中提供除上层密码技术外的另一层防御^{[9][403][406]}。利用先 进的信道编码、大规模 MIMO、太赫兹等先进技术的优势, 物理层安全技术可以 提供无线信号的安全传输。此外, 物理层密钥和物理层认证可以为空口提供轻量 级的安全保护。为了同时满足 6G 网络中的要求(如时延、开销、可靠性和吞吐 量等), 应开发出更高效、更稳健的物理层安全技术^[403]。

(3) 基于量子的方法

与基于二进制的技术相比,包括量子通信和量子计算在内的基于量子的技术 可以提供更高的处理能力、更高的轻量级和绝对随机性。量子密码学,包括前量 子密码学和后量子密码学,被认为是解决 6G 网络中数据安全和隐私问题的有力 方案^{[406]-[408]}。量子密钥分发系统基于量子态的不确定性和不可复制性生成密钥, 并实现了密钥的随机分布,因此可以无条件保证密钥的安全性^[409]。量子密钥分 发系统在卫星网络^[410]、光网络、海洋网络等各种 6G 网络中的应用非常值得期待 ^[411]。

(4) 基于区块链的方法

由于接入设备的需求量不断增加,接入认证请求更加频繁,传统的集中式认证结构面临着巨大的压力和风险。2008 年提出的区块链技术^[139]在学术界和工业 界得到了广泛的研究,被认为是解决 6G 网络中的数据安全和隐私问题的一种很 有前景的解决方案^{[412]-[415]}。区块链作为一种去中心化的数据结构,具有较强的防 篡改能力和恢复能力,有利于认证系统的安全运行^[413]。因此,数据传输和处理 的压力显著降低,认证效率也得到了提高^[414]。在数据结构中应用了组签名、环 签名等加密算法,使数据具有较高的匿名性^{[416][417]}。

(5) 基于人工智能的方法

AI 技术,尤其是机器学习和大数据分析技术,已经被广泛应用于特定场景下的异构网络优化配置^[418]。然而,AI 技术的高复杂性限制了其在无线网络中的应用^[199]。随着 6G 网络峰值速率的提高,6G 网元的处理能力将得到极大的发展,这将促进 AI 与 6G 网络安全设计的深度融合^[419],尤其是在编码、认证和异常检测等方面^[406]。基于机器学习的自动编码器可以通过重构误差有效地检测 6G 网络中的异常流量数据^[420]。为了在 6G 网络中实现高可靠性和鲁棒性认证,有人提出了基于机器学习的物理层认证,以缓解信道时变特性对物理层属性的影响^[421]。利用大数据分析技术可以对 6G 网络数据的指数增长进行处理,为异常用户检测提供监测应用。

五、总结与展望

本文指出了当前 5G 无线通信网络的局限性后,提出了 6G 无线通信网络的 愿景、使能技术、四种新的范式转变以及未来的研究方向。同时,提出了新的性 能指标和应用场景,如提供全球覆盖、增强的频谱/能量/成本效率、更高的智能 水平、安全性和弹性等。此外,以云 VR、IoT 行业自动化、C-V2X、数字孪生体 域网、节能无线网络控制和联邦学习系统为例,本文给出了 6G 无线通信网络的 行业纵向图,并给出了实现 6G 需求的使能技术。本文研究了新型的空口和传输 技术,如新波形、多址接入、信道编码、无蜂窝大规模 MIMO、动态智能频谱共 享与接入、基于区块链的无线接入网络、光子定义无线电、uRLLC 的多连接技 术等。同时,还研究了新型网络架构,包括软件定义网络/网络功能虚拟化、网络 切片、基于服务的架构、认知服务架构、深层边缘节点和网络、无蜂窝和云/雾/ 边缘计算等。四个新的范式转变被提出,以实现 6G 网络的全面融合,即全球覆 盖(卫星、无人机、地面、海洋通信)、全频谱(sub-6 GHz、毫米波、太赫兹、 光频段)、全应用(AI 赋能无线通信)、强网络安全。本文各个部分分别指出了未 来的研究方向,希望能够为学术研究者和业界专家在未来 6G 无线通信网络的发 展方面提供一些启示。

六、附录

6.1 缩略语

	私之 入入-II-II F1/11/11/11	
英文缩写	英文全拼	中文释义
2D	two-dimensional	二维
2G	second generation	第二代
3D	three-dimensional	三维
3G	third generation	第三代
3GPP	3rd generation partnership project	第三代合作伙伴计划
4G	fourth generation	第四代
5G	fifth generation	第五代
5G-ACIA	5G alliance for connected industries and automation	工业互联与自动化 5G 联盟
5G PPP	5G infrastructure public private partnership	5G 公私联盟协会
6G	sixth generation	第六代
AAU	active antenna unit	有源天线单元
ACF	autocorrelation function	自相关函数
АСК	Acknowledgment	应答
A-CPI	application-controller plane interface	应用控制层接口
A/D	analog-to-digital	模数转换
AF	application function	应用程序功能
AI	artificial intelligence	人工智能
AMF	access and mobility management function	接入和移动管理功能
ANN	artificial neural network	人工神经网络
AP	access point	接入点
AR	augmented reality	增强现实
ASK	amplitude shift keying	幅移键控
ATP	acquisition, tracking, and pointing	采集、跟踪和指向
AUSF	authentication server function	鉴权服务功能

表 2 英文缩略词对照表

AWGN	additive white Gaussian noise	加性高斯白噪声
BB	Baseband	基带
ВСН	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem	ВСН
BCJR	Bahl, Cocke, Jelinek, and Raviv	BCJR
BER	bit error rate	误比特率
BPF	bandpass filter	带通滤波器
B-RAN	blockchain radio access network	区块链无线接入网
BS	base stations	基站
BSS	business support system	业务支撑系统
CC	central controller	中央控制器
CCF	cross-correlation function	互相关函数
CF	cell-free	无蜂窝
CGM	continuous glucose monitoring	连续血糖监测
CIR	channel impulse response	信道冲激响应
CNN	convolutional neural network	卷积神经网络
CoMP	coordinated multi-point	协同多点
COTS	commercial off-the-shelf	商用现成品
СРМ	continuous phase modulation	连续相位调制
CPU	central processing units	中央处理器
CR	cognitive radio	认知无线电
CRC	cyclic redundancy check	循环冗余校验
CSA	cognitive service architecture	认知服务架构
CSI	channel state information	信道状态信息
СТ	computed tomography	电脑断层
C-V2X	cellular vehicle to everything	蜂窝车联网
D/A	digital-to-analog	数模转换
DAS	distributed antenna system	分布式天线系统
D-CPI	data-controller plane interface	数据控制层接口
DEN ²	deep edge node and network	深度边缘节点网络
DetNet	deterministic networking	确定性网络

DL	deep learning	深度学习
DN	data network	数据网络
DNN	deep neural network	深度神经网络
DOF	degree of freedom	自由度
DRL	deep reinforcement learning	深度强化学习
EAP	extensible authentication protocol	可扩展鉴权协议
ECG	electrocardiogram	心电图
EEG	electroencephalogram	脑电图
EIRP	effective isotropic radiated power	等效全向发射功率
eMBB	enhanced mobile broadband	增强型移动宽带
EMG	electromyogram	肌电图
EMS	element management system	网元管理系统
EO	electrical-to-optical	电光
ETSI	European telecommunication standards institute	欧洲电信标准协会
euRLLC	enhanced-uRLLC	增强型高可靠低时延 通信
euRLLC EXIT	enhanced-uRLLC extrinsic information transfer	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图
euRLLC EXIT FBMC	enhanced-uRLLC extrinsic information transfer filter bank multi-carrier	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波
euRLLC EXIT FBMC FCC	enhanced-uRLLC extrinsic information transfer filter bank multi-carrier federal communications commission	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplex	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple access	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correction	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space optical	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO FTTA	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space opticalfiber-to-the-antenna	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信 光纤-天线
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO FTTA GAN	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space opticalfiber-to-the-antennagenerative adversarial network	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信 光纤-天线 生成对抗网络
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO FTTA GAN GBSM	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space opticalfiber-to-the-antennagenerative adversarial networkgeometry-based stochastic model	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信 光纤-天线 生成对抗网络 几何随机信道模型
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO FTTA GAN GBSM GFDM	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space opticalfiber-to-the-antennagenerative adversarial networkgeometry-based stochastic modelgeneralizedgeneralizedfrequencydivision	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信 光纤-天线 生成对抗网络 几何随机信道模型 广义频分复用
euRLLC EXIT FBMC FCC FDD FDMA FEC FSO FTTA GAN GBSM GFDM GPS	enhanced-uRLLCextrinsic information transferfilter bank multi-carrierfederal communications commissionfrequency division duplexfrequency division multiple accessforward error correctionfree space opticalfiber-to-the-antennagenerative adversarial networkgeometry-based stochastic modelgeneralizedglobal positioning system	增强型高可靠低时延 通信 外信息转移图 滤波器组多载波 联邦通信委员会 频分双工 频分多址接入 前向纠错 自由空间光通信 光纤-天线 生成对抗网络 几何随机信道模型 广义频分复用

НА	horn antenna	喇叭天线
НАР	high altitude platform	高空平台
HARQ	hybrid automatic repeat request	混合自动重传请求
НСС	hybrid concatenated codes	混合级联码
HD	high definition	高清
HST	high-speed train	高铁
IC	integrated circuits	集成电路
ICDT	information, communication, and data technology	信息、通信与数据技术
ICI	inter-carrier interference	载波间干扰
ICT	information and communication technology	信息与通信技术
IEN	intelligence endogenous network	智能内生网络
IETF	Internet engineering task force	互联网工程任务组
ILDP	interactive learning design paradigm	交互学习设计范式
IoE	Internet of everything	万物互联
IoT	Internet of things	物联网
IP	Internet protocol	互联网协议
IRS	intelligent reflection surface	智能反射面
ISFFT	inverse symplectic finite Fourier transform	逆有限辛傅里叶变换
ISM	industrial, scientific, and medical	工业、科学与医疗
IT	information technology	信息技术
ITS	intelligent transportation system	智能运输系统
ITU	international telecommunication union	国际电信联盟
KPI	key performance indicator	关键性能指标
LAP	low altitude platform	低空平台
LDPC	low-density parity-check code	低密度奇偶校验
LED	light emitting diode	发光二极管
LEO	low Earth orbit	低轨卫星
LO	local oscillator	本振

LOS	line of sight	视距
LSTM	long short-term memory	长短时记忆网络
LTE	long term evolution	长期演进计划
LTE-LAA	LTE license assisted access	LTE 授权辅助接入
LTE-U	LTE unlicensed	LTE 非授权频段
LTE-V	long time evolution vehicle	LTE 车联网
MAC	media access control	媒体访问控制
MAEC	multi-access edge computing	多接入边缘计算
MBD	mobile big data	移动大数据
MCS	modulation coding scheme	调制编码方案
MEC	mobile edge computing	移动边缘计算
MIMO	multiple-input multiple-output	多输入多输出
ML	machine learning	机器学习
MLSE	maximum likelihood sequence estimation	最大似然序列估计
MMSE	minimum mean squared error	最小均方根误差
mMTC	massive machine type communications	大规模机器类通信
mmWave	millimeter wave	毫米波
MPC	multipath component	多径分量
MR	maximum ratio	最大比率
MRC	maximum ratio combining	最大比合并
MRI	magnetic resonance imaging	磁共振成像
MRT	maximum ratio transmission	最大比传输
MS	mobile station	移动台
MTC	machine type communication	机器类通信
MUST	multi-user superposition transmission	多用户叠加传输
MZM	Mach-Zehnder modulator	马赫-曾德尔调制器
NAS	non-access stratum	非接入层
NEF	network exposure function	网络暴露功能
NFV	network functions virtualization	网络功能虚拟化

NFVI	NFV infrastructure	网络功能虚拟化基础 设施
NFV M&O	NFV management and orchestration	网络功能虚拟化管理 和编排
NGMN	next-generation mobile network	下一代移动网络联盟
NG-RAN	next-generation radio access network	下一代无线接入网
NLOS	non-line-of-sight	非视距
NOMA	non-orthogonal multiple access	非正交多址接入
NP	non-deterministic polynomial	非确定性多项式
NR	new radio	新空口
NRF	network function repository function	网络存储功能
NR-V	new radio vehicle	新空口车联网
NTN	non-terrestrial network	非陆地网络
NWDA	network data analytics	网络数据分析
OAM	orbital angular momentum	轨道角动量
OCC	optical camera communication	光学相机通信
OE	optical-to-electrical	光电
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing	正交频分复用
OMA	orthogonal multiple access	正交多址接入
OMC	optical mobile communication	光移动通信
ONF	open networking foundation	开放网络基金会
O-RAN	open radio access network	开放无线接入网
OSS	operations support system	运营支撑系统
OTFS	orthogonal time frequency space	正交时间频率空间调 制
OWC	optical wireless communication	光无线通信
P2P	peer-to-peer	点对点网络
PAPR	peak to average power ratio	峰均比
PCC	parallel concatenated codes	并行级联码
PCF	policy control function	策略控制功能
PDA	placement delivery array	放置分发阵列

PDF	probability density function	概率密度函数
PDP	power delay profile	功率时延分布
PLS	physical layer security	物理层安全
PSD	power spectral density	功率谱密度
QAM	quadrature amplitude modulation	正交幅度调制
Q-D	quasi-deterministic	准确定性
QKD	quantum key distribution	量子密钥分发
QoE	quality of experience	用户体验质量
QoS	quality of service	服务质量
QSDC	quantum secure direct communication	量子安全直接通信
RAN	radio access network	无线接入网
RAU	remote antenna unit	远端天线单元
RF	radio frequency	射频
RMS	root mean square	均方根
RSC	radio side controller	无线端控制器
RSS	received signal strength	接收信号强度
RTT	round trip time	往返时间
Rx	receiver	接收端
RZF	regularized zero-forcing	归一化迫零
SBA	service-based architecture	基于服务的网络架构
SC	successive cancellation	连续消除
SCC	serially concatenated code	串行级联码
SCM	spatial channel model	空间信道模型
SCMA	sparse code multiple access	稀疏码分多址接入
SDN	software defined network	软件定义网络
SFFT	symplectic finite Fourier transform	有限辛傅里叶变换
SGS	satellite ground station	卫星地面站
SIMO	single-input multiple-output	单输入多输出
SINR	signal-to-interference-plus-noise ratio	信干噪比
SISO	single-input single-output	单输入单输出

SLA	service-level agreement	服务等级协议
SLC	satellite local controller	卫星本地控制器
SMF	session management function	会话管理功能
SNR	signal-to-noise ratio	信噪比
SR	symbiotic radio	共生无线电
S-V	Saleh-Valenzuela	S-V 模型
SVM	support vector machine	支持向量机
ТСР	transmission control protocol	传输控制协议
TDD	time division duplex	时分双工
TLC	terrestrial local controller	陆地本地控制器
THz	terahertz	太赫兹
ToF	THz-over-fiber	光载太赫兹
TSAP	terrestrial-satellite access point	陆地-卫星接入点
Тх	transmitter	发射端
UAV	unmanned aerial vehicle	无人机
UDM	unified data management	统一数据管理
UDN	ultra-dense network	超密集网络
UE	user equipment	用户设备
UFMC	universal filtered multi-carrier	通用滤波多载波
uHDD	ultra-high data density	超高流量密度
uHSLLC	ultra-high-speed with low-latency communications	超高速低时延通信
uMUB	ubiquitous mobile ultra-broadband	泛在移动超宽带
UPF	user plane function	用户层功能
uRLLC	ultra-reliable and low latency communications	高可靠低时延通信
UTC-PD	uni-traveling-carrier photodiode	单行载流子光电二极 管
UV	ultraviolet	紫外线
V2C	vehicle-to-cloud	车对云
V2I	vehicle-to-infrastructure	车对基础设施

V2P	vehicle-to-pedestrian	车对行人
V2V	vehicle-to-vehicle	车对车
V2X	vehicle to everything	车联网
VHF	very high frequency	甚高频
VLC	visible light communication	可见光通信
VNF	virtualized network function	虚拟化网络功能
VR	virtual reality	虚拟现实
WSS	wide sense stationary	宽平稳
XR	extended reality	扩展现实
ZF	zero forcing	迫零

参考文献

- [1] C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122-130, Feb. 2014.
- [2] G. P. Fettweis, "The tactile Internet: Applications and challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, Mar. 2014.
- [3] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Netw.*, 2020, in press.
- [4] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, "6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 18-27, Sept. 2019.
- [5] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "From a human-centric perspective: What might 6G be," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1906.00741.pdf</u>
- [6] ITU-R M.2083 report. IMT vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. [Online]. Available: <u>https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en</u>
- [7] S. Chen, Y. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, "Vision, requirements, and technology trend of 6G: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user datarate and movement speed," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 218-228, Apr. 2020.
- [8] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, "6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sept. 2019.
- [9] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G wireless communications: vision and potential techniques," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, July-Aug. 2019.
- [10] L. Zhang, Y. Liang, and D. Niyato, "6G visions: Mobile ultra-broadband, super Internet-ofthings, and artificial intelligence," *China Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1-14, Aug. 2019.
- [11] G. Marco, P. Michele, M. Macro *et al.*, "Towards 6G networks: Use cases and technologies," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1903.12216.pdf</u>
- [12] 尤肖虎, 尹浩, 邬贺铨. 6G 与广域物联网, 物联网学报, vol. 4, pp. 12-18, 2020.
- [13] Cloud X: CG cloud VR technical specifications (Revised draft v1.0) [Online]. Available: <u>https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/white%20paper/cg-cloud-vr-technical-specifications.pdf?la=en-us</u>
- [14] Cloud XR medical white paper. [Online]. Available: https://www.huawei.com/minisite/static/cloud-xr-medical-platform-en.pdf
- [15] Cloud VR+2B scenario white paper. [Online]. Available: <u>https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/ilab/2019/cloud_vr_2b_scenario_white_paper_en.pdf</u>
- [16] S. Greengard, *Virtual Reality*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2019.
- [17] GSMA, Cloud AR/VR white paper. 2019. [Online]. Available: https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/cloud-ar-vr-whitepaper/
- [18] China mobile launches cloud-based VR service with Huawei. 2018. [Online]. Available: <u>https://www.telecomtv.com/content/vr-ar/huawei-helps-china-mobile-fujian-release-worlds-first-operator-cloud-vr-31764/</u>

- [19] LG Uplus to launch 5G-based cloud VR game service. [Online]. Available: http://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2019/07/133_271632.html
- [20] China Telecom Sichuan powers cloud VR with dual-gigabit services [Online]. Available: <u>https://www.huawei.com/en/about-huawei/publications/communicate/88/china-telecom-</u> <u>sichuan-cloud-vr-dual-gigabit</u>
- [21] M. Stengel, S. Grogorick, M. Eisemann, et al., "Adaptive image-space sampling for gazecontingent real-time rendering," Comput. Graph. Forum, vol. 35, no. 4, pp. 129-139, July 2016.
- [22] Y. Hagiwara, Y. Mizuchi, Y. Choi, and T. Inamura, "Cloud VR system with immersive interfaces to collect human gaze-controls and interpersonal-behaviors," in *Proc. SII'14*, Tokyo, Japan, Dec. 2014, pp. 169-174.
- [23] A. Kaplanyan, A. Sochenov, T. Leimkühler, et al., "DeepFovea: Neural reconstruction for foveated rendering and video compression using learned statistics of natural videos," in Proc. ACM SIGGRAPH 2019 Talks, July 2019.
- [24] Y. Liu, S. Dey, and Y. Lu, "Enhancing video encoding for cloud gaming using rendering information," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 25, no. 12, pp. 1960-1974, Dec. 2015.
- [25] L. Xu, X. Guo, Y. Lu, S. Li, O. C. Au, and L. Fang, "A low latency cloud gaming system using edge preserved image homography," in *Proc. ICME*'14, Chengdu, China, July 2014, pp. 1-6.
- [26] Z. Lai, Y. C. Hu, Y. Cui, L. Sun, N. Dai, and H. Lee, "Furion: Engineering high-quality immersive virtual reality on today's mobile devices," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 19, no. 7, pp. 1586-1602, July 2020.
- [27] P. Wang, A. I. Ellis, J. C. Hart, and C. Hsu, "Optimizing next-generation cloud gaming platforms with planar map streaming and distributed rendering," in *Proc. NetGames* '17, Taipei, Taiwan, June 2017, pp. 1-6.
- [28] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, "Recommendations for implementing the strategic initiative Industries 4.0," Final report of the Industries 4.0 Working Group, Apr. 2013. https://www.mendeley.com/catalogue/52a309ad-c197-3f0e-ac43-630a5295c48e/
- [29] 5G for connected industries & automation white paper, Second Edition, 2019. https://www.5g-acia.org/publications/5g-for-connected-industries-and-automation-white-paper/
- [30] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) SA1 TS 22.104, Service requirements for cyberphysical control applications in vertical domains, V17.2.0. TS 22.104. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22 series/22.104
- [31] J. He et al., "Cooperative Connected Autonomous Vehicles (CAV): Research, applications and challenges," in Proc. ICNP'19, Chicago, IL, USA, Oct. 2019, pp. 1-6.
- [32] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, L. Zhao, and W. Li, "A vision of C-V2X: Technologies, field testing, and challenges with chinese development," *IEEE Int. Things J.*, vol. 7, no. 5, pp. 3872-3881, May 2020.
- [33] G. Naik, B. Choudhury, and J. Park, "IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70169-70184, May 2019.
- [34] S. Lien *et al.*, "3GPP NR sidelink transmissions toward 5G V2X," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 35368-35382, Feb. 2020.
- [35] C. Guo, L. Liang, and G. Y. Li, "Resource allocation for low-latency vehicular communications: An effective capacity perspective," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 4, pp. 905-917, Apr. 2019.

- [36] E. Pateromichelakis, C. Zhou, P. Keshavamurthy, and K. Samdanis, "End-to-end QoS optimization for V2X service localization," in *Proc. GLOBECOM'19*, Waikoloa, HI, USA, Dec. 2019, pp. 1-6.
- [37] C.-L. I and C. PaN. Special topic: C-V2X industry and technologies. ZTE Commun., 2020.
- [38] W. Huang, K. Wang, Y. Lv, and F. Zhu, "Autonomous vehicles testing methods review," in *Proc. ITSC'16*, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2016, pp. 163-168.
- [39] L. Gao, Y. Li, J. Misener, and S. Patil, "C-V2X based basic safety related its spectrum requirement analysis," in *Proc. VTC'17-Fall*, Toronto, Canada, Sept. 2017, pp. 1-5.
- [40] M. Latva-aho, K. Leppanen, *Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence. White paper.* 6G Flagship research program, 2019.
- [41] China Electronic Information Industry Development Research Institute. 6G concept and vision white paper (in Chinese). 2019. http://www.ccidwise.com/uploads/soft/200311/1-200311133959.pdf
- [42] J. Santos, T. Wauters, B. Volckaert *et al.*, "Fog computing: Enabling the management and orchestration of smart city applications in 5G networks," *Entropy*, vol. 20, no. 1, pp. 1-26, Dec. 2017.
- [43] Yole Développement. Medical wearables: Market and technology trends 2019. [Online]. Available: <u>https://s3.i-micronews.com/uploads/2019/03/YD19008-Medical-Wearables-2019-Yole-Sample-2.pdf</u>
- [44] PEPP-PT [Online]. Available: www.pepp-pt.org
- [45] G. P. Fettweis *et al.*, "5G-and-beyond scalable machines," in *Proc. VLSI-SoC'19*, Cuzco, Peru, Oct. 2019, pp. 105-109.
- [46] G. Fettweis, M. Hassler, R. Wittig et al., "A low-power scalable signal processing chip platform for 5G and beyond," in Proc. 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, California, USA, Nov. 2019, pp. 896-900.
- [47] Z. E. Ankarali, B. Peköz, and H. Arslan, "Flexible Radio Access Beyond 5G: A future projection on waveform, numerology, and frame design principles," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18295-18309, Mar. 2017.
- [48] P. Raviteja, K. T. Phan, Y. Hong, and E. Viterbo, "Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 6501-6515, Oct. 2018.
- [49] R. Hadani, S. Rakib, S. Kons *et al.*, "Orthogonal time frequency space modulation," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1808.00519.pdf</u>
- [50] P. Raviteja, K. T. Phan, and Y. Hong, "Embedded pilot-aided channel estimation for OTFS in delay–Doppler channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 5, pp. 4906-4917, May 2019.
- [51] B. Murmann, "ADC performance survey 1997-2020," [Online]. Available: http://web.stanford.edu/~murmann/adcsurvey.html_
- [52] G. Fettweis, M. Dörpinghaus, S. Bender, L. Landau, P. Neuhaus, and M. Schlüter, "Zero crossing modulation for communication with temporally oversampled 1-Bit quantization," in *Proc. ACSSC'19*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2019, pp. 207-214.
- [53] L. T. N. Landau, M. Dörpinghaus, R. C. de Lamare, and G. P. Fettweis, "Achievable rate with 1-bit quantization and oversampling using continuous phase modulation-based sequences," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 7080-7095, Oct. 2018.

- [54] M. Vaezi, Z. Ding, H. Poor, *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. Springer, 2019.
- [55] Y. Li, W. Wang, J. Wang, et al. "Fast-convolution multicarrier based frequency division multiple access," Sci. China Inf. Sci., vol. 62, no. 8, pp. 1-17, Aug. 2019.
- [56] A. D. Wyner, "Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple-access channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 40, no. 6, pp. 1713-1727, Nov. 1994.
- [57] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
- [58] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)," in *Proc. PIMRC'13*, London, UK, Sept. 2013, pp. 611-615.
- [59] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on downlink multiuser superposition
transmission for LTE," 2015. TR 36.859.https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.859
- [60] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation (Release 15), 2019. TR 38.211. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38 series/38.211
- [61] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Study on non-orthogonal multiple access (NOMA)forNR(Release16),2018.TR38.812.https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.812
- [62] H. Nikopour, and H. Baligh, "Sparse code multiple access," in *Proc. PIMRC'13*, London, UK, Sept. 2013, pp. 332-336.
- [63] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmissions," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 8, pp. 6010-6023, Aug. 2016.
- [64] R. M. Augustine, and A. Chockalingam, "Interleaved time-frequency multiple access using OTFS modulation," in *Proc. VTC'19-Fall*, Honolulu, HI, USA, Sept. 2019, pp. 1-5.
- [65] Z. Ding, R. Schober, P. Fan, and H. Vincent Poor, "OTFS-NOMA: An efficient approach for exploiting heterogenous user mobility profiles," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 11, pp. 7950-7965, Nov. 2019.
- [66] L. Zhu, Z. Xiao, X. Xia, and D. O. Wu, "Millimeter-wave communications with nonorthogonal multiple access for B5G/6G," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116123-116132, Aug. 2019.
- [67] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, "A survey on mobile edge computing: The communication perspective," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2322-2358, Fourth Quarter 2017.
- [68] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, "Impact of non-orthogonal multiple access on the offloading of mobile edge computing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 375-390, Jan. 2019.
- [69] H. Zhang, Y. Qiu, K. Long, G. K. Karagiannidis, X. Wang, and A. Nallanathan, "Resource allocation in NOMA-based fog radio access networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 110-115, June 2018.
- [70] F. Schaich, T. Wild, and Y. Chen, "Waveform contenders for 5G suitability for short packet and low latency transmissions," in *Proc. VTC'14- Spring*, Seoul, South Korea, May 2014, pp. 1-5.

- [71] Z. Ding, R. Schober, P. Fan, and H. V. Poor, "Simple semi-grant-free transmission strategies assisted by non-orthogonal multiple access," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 6, pp. 4464-4478, June 2019.
- [72] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948.
- [73] M. Seidl, A. Schenk, C. Stierstorfer, and J. B. Huber, "Polar-coded modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 10, pp. 4108-4119, Oct. 2013.
- [74] D. Shin, S. Lim, and K. Yang, "Mapping selection and code construction for 2^m-ary polarcoded modulation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 905-908, June 2012.
- [75] F. C. M. Lau, and W. M. Tam, "Reducing the bit-mapping search space of a bit-interleaved polar-coded modulation system," in *Proc. ATC'17*, Quy Nhon, Vietnam, Oct. 2017, pp. 198-203.
- [76] M. Mondelli, S. H. Hassani, and R. Urbanke, "Construction of polar codes with sublinear complexity," in *Proc. ISIT*'17, Aachen, Germany, June 2017, pp. 1853-1857.
- [77] C. Schürch, "A partial order for the synthesized channels of a polar code," in *Proc. ISIT'16*, Barcelona, Spain, July 2016, pp. 220-224.
- [78] M. Mondelli, S. H. Hassani, and R. L. Urbanke, "Unified scaling of polar codes: Error exponent, scaling exponent, moderate deviations, and error floors," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 62, no. 12, pp. 6698-6712, Dec. 2016.
- [79] I. Tal, and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 5, pp. 2213-2226, May 2015.
- [80] H. Mahdavifar, M. El-Khamy, J. Lee, and I. Kang, "Polar coding for bit-interleaved coded modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 5, pp. 3115-3127, May 2016.
- [81] L. Hanzo, T. Liew, B. Yeap, Y. S. Tee, and S. X. Ng, Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding: Exit-Chart-Aided Near-Capacity Designs for Wireless Channels. 2rd Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [82] M. Hanif, and M. Ardakani, "Polar codes: Bounds on bhattacharyya parameters and their applications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 12, pp. 5927-5937, Dec. 2018.
- [83] P. Trifonov, "Design of polar codes for Rayleigh fading channel," in *Proc. ISWCS'15*, Brussels, Belgium, Aug. 2015, pp. 331-335.
- [84] A. Bravo-Santos, "Polar codes for the rayleigh fading channel," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2352-2355, Dec. 2013.
- [85] S. Liu, Y. Hong, and E. Viterbo, "Polar codes for block fading channels," in *Proc. WCNCW'17*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2017, pp. 1-6.
- [86] F. Gabry, V. Bioglio, I. Land, and J. Belfiore, "Multi-kernel construction of polar codes," in Proc. ICC Workshops'17, Paris, France, May 2017, pp. 761-765.
- [87] M. Benammar, V. Bioglio, F. Gabry, and I. Land, "Multi-kernel polar codes: Proof of polarization and error exponents," in *Proc. ITW'17*, Kaohsiung, Taiwan, Nov. 2017, pp. 101-105.
- [88] X. Zuo, I. Perez-Andrade, R. G. Maunder, B. M. Al-Hashimi, and L. Hanzo, "Improving the tolerance of stochastic LDPC decoders to overclocking-induced timing errors: A tutorial and a design example," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1607-1629, Apr. 2016.

- [89] I. Perez-Andrade, S. Zhong, R. G. Maunder, B. M. Al-Hashimi, and L. Hanzo, "Stochastic computing improves the timing-error tolerance and latency of turbo decoders: Design guidelines and tradeoffs," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1008-1038, Feb. 2016.
- [90] Z. Xu, and K. Niu, "Successive cancellation decoders of polar codes based on stochastic computation," in *Proc. PIMRC'14*, Washington, DC, USA, Sept. 2014, pp. 908-912.
- [91] B. Yuan, and K. K. Parhi, "Successive cancellation decoding of polar codes using stochastic computing," in *Proc. ISCAS'15*, Lisbon, Portugal, May 2015, pp. 3040-3043.
- [92] X. Liang, C. Zhang, M. Xu, S. Zhang, and X.-H. You, "Efficient stochastic list successive cancellation decoder for polar codes," in *Proc. SOCC'15*, Beijing, China, Sept. 2015, pp. 421-426.
- [93] B. Yuan, and K. K. Parhi, "Belief propagation decoding of polar codes using stochastic computing," in *Proc. ISCAS'16*, Montreal, QC, Canada, May 2016, pp. 157-160.
- [94] M. Xu, X. Liang, B. Yuan, Z. Zhang, X.-H. You, and C. Zhang, "Stochastic belief propagation polar decoding with efficient re-randomization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 6, pp. 6771-6776, June 2020.
- [95] K. Han, J. Wang, W. J. Gross, and J. Hu, "Stochastic bit-wise iterative decoding of polar codes," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 5, pp. 1138-1151, Mar. 2019.
- [96] J. M. Wozencraft, "Sequential decoding for reliable communication," Technical Report 325, Jan. 1957.
- [97] J. Wozencraft, B. Reiffen, Sequential Decoding. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [98] R. W. Hamming, "Error detecting and error correcting codes," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 29, no. 2, pp. 147-160, Apr. 1950.
- [99] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Serial concatenation of interleaved codes: performance analysis, design, and iterative decoding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 909-926, May 1998.
- [100] D. Divsalar, and F. Pollara, "Hybrid concatenated codes and iterative decoding," in *Proc. ISIT'97*, Ulm, Germany, June-July 1997, pp. 10-10.
- [101] M. Moher, "An iterative multiuser decoder for near-capacity communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 7, pp. 870-880, July 1998.
- [102] M. C. Reed, C. B. Schlegel, P. D. Alexander, and J. A. Asenstorfer, "Iterative multiuser detection for CDMA with FEC: Near-single-user performance," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 12, pp. 1693-1699, Dec. 1998.
- [103] R. Bauer, and J. Hagenauer, "On variable length codes for iterative source/channel decoding," in *Proc. DCC'01*, Snowbird, UT, USA, Mar. 2001, pp. 273-282.
- [104] R. Thobaben, and J. Kliewer, "Robust decoding of variable-length encoded Markov sources using a three-dimensional trellis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 7, no. 7, pp. 320-322, July 2003.
- [105] R. Thobaben, and J. Kliewer, "Low-complexity iterative joint source-channel decoding for variable-length encoded Markov sources," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 12, pp. 2054-2064, Dec. 2005.
- [106] T. J. Richardson, and R. L. Urbanke, "The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 47, no. 2, pp. 599-618, Feb. 2001.
- [107] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "Analysis, design, and iterative decoding of double serially concatenated codes with interleavers," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 2, pp. 231-244, Feb. 1998.

- [108] M. Tuchler, "Convergence prediction for iterative decoding of threefold concatenated systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM'02*, Taipei, Taiwan, Nov. 2002, pp. 1358-1362.
- [109] F. Brannstrom, L. K. Rasmussen, and A. J. Grant, "Optimal scheduling for multiple serially concatenated codes," in *Proc. Int. Symp. on Turbo Codes and Rel. Topics*, Brest, France, 2003, pp. 383-386.
- [110] F. Brannstrom, L. K. Rasmussen, and A. Grant, "Convergence analysis and optimal scheduling for multiple concatenated codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 9, pp. 3354-3364, Sept. 2005.
- [111] A. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 13, no. 2, pp. 260-269, Apr. 1967.
- [112] L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate (Corresp.)," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 20, no. 2, pp. 284-287, Mar. 1974.
- [113] C. Xu, S. Sugiura, S. X. Ng, P. Zhang, L. Wang, and L. Hanzo, "Two decades of MIMO design tradeoffs and reduced-complexity MIMO detection in near-capacity systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18564-18632, May 2017.
- [114] L. Hanzo, O. Alamri, M. El-Hajjar, and N. Wu, Near-Capacity Multi-Functional MIMO Systems: Sphere-Packing, Iterative Detection and Cooperation. New York: Wiley-IEEE Press, 2009.
- [115] S. ten Brink, "Convergence of iterative decoding," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 10, pp. 806-808, May 1999.
- [116] A. Ashikhmin, G. Kramer, and S. ten Brink, "Extrinsic information transfer functions: model and erasure channel properties," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 11, pp. 2657-2673, Nov. 2004.
- [117] Y. Chen, X. Gao, X. Xia, and L. You, "Robust MMSE precoding for massive MIMO transmission with hardware mismatch," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 61, no. 4, pp. 173-186, Apr. 2019.
- [118] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone," in *Proc. SPAWC'15*, Stockholm, Sweden, June-July 2015, pp. 201-205.
- [119] D. Wang, Z. Zhao, Y. Huang, H. Wei, X. Wang, and X.-H. You, "Large-scale multi-user distributed antenna system for 5G wireless communications," in *Proc. VTC'15 Spring*, Glasgow, UK, May 2015, pp. 1-5.
- [120] 尤肖虎, 王东明, 王江舟. 分布式 MIMO 与无蜂窝移动通信, 科学出版社, 2019.
- [121] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO versus small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.
- [122] Y. Feng, M. Wang, D. Wang, and X.-H. You, "Low complexity iterative detection for a largescale distributed MIMO prototyping system," in *Proc. ICC'19*, Shanghai, China, May 2019, pp. 1-6.
- [123] Z. Chen and E. Björnson, "Channel hardening and favorable propagation in cell-free massive MIMO with stochastic geometry," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 11, pp. 5205-5219, Nov. 2018.

- [124] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, "Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 160-171, Feb. 2013.
- [125] G. Interdonato, P. Frenger, and E. G. Larsson, "Scalability aspects of cell-free massive MIMO," in *Proc. ICC'19*, Shanghai, China, May 2019, pp. 1-6.
- [126] Y. Liang, K. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: An overview," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 7, pp. 3386-3407, Sept. 2011.
- [127] S. Lien, K. Chen, Y. Liang, and Y. Lin, "Cognitive radio resource management for future cellular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 1, pp. 70-79, Feb. 2014.
- [128] Y.-C. Liang. Dynamic spectrum management: From cognitive radio to blockchain and artificial intelligence. Springer Nature, 2020.
- [129] L. Zhang, M. Xiao, G. Wu, M. Alam, Y. Liang, and S. Li, "A survey of advanced techniques for spectrum sharing in 5G networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 44-51, Oct. 2017.
- [130] R. Yin, G. Yu, A. Maaref, and G. Y. Li, "LBT-based adaptive channel access for LTE-U systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 10, pp. 6585-6597, Oct. 2016.
- [131] S. Han, Y. Liang, Q. Chen, and B. Soong, "Licensed-assisted access for LTE in unlicensed spectrum: A MAC protocol design," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 10, pp. 2550-2561, Oct. 2016.
- [132] J. Tan, L. Zhang, Y. Liang, and D. Niyato, "Intelligent sharing for LTE and WiFi systems in unlicensed bands: A deep reinforcement learning approach," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 2793-2808, May 2020.
- [133] G. Yang, Q. Zhang, and Y. Liang, "Cooperative ambient backscatter communications for green Internet-of-Things," *IEEE Int. Things J.l*, vol. 5, no. 2, pp. 1116-1130, Apr. 2018.
- [134] Q. Zhang, H. Guo, Y. Liang, and X. Yuan, "Constellation learning-based signal detection for ambient backscatter communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 2, pp. 452-463, Feb. 2019.
- [135] R. Long, Y. Liang, H. Guo, G. Yang, and R. Zhang, "Symbiotic radio: A new communication paradigm for passive internet of things," *IEEE Int. Things J.*, vol. 7, no. 2, pp. 1350-1363, Feb. 2020.
- [136] W. Liu, Y. Liang, Y. Li, and B. Vucetic, "Backscatter multiplicative multiple-access systems: Fundamental limits and practical design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 5713-5728, Sept. 2018.
- [137] Q. Zhang, L. Zhang, Y. Liang, and P. Kam, "Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and Internet-of-things networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20000-20013, Feb. 2019.
- [138] Q. Zhang, Y. Liang, and H. V. Poor, "Intelligent user association for symbiotic radio networks using deep reinforcement learning," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 7, pp. 4535-4548, July 2020.
- [139] S. Nakamoto, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," *Technical Report*, 2008.
- [140] G. Wood, "Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger," *Ethereum Project Yellow Paper*, vol. 151, pp. 1-32, 2014.
- [141] X. Ling, J. Wang, T. Bouchoucha, B. C. Levy, and Z. Ding, "Blockchain radio access network (B-RAN): Towards decentralized secure radio access paradigm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 9714-9723, Jan. 2019.
- [142] Y. Le, X. Ling, J. Wang, and Z. Ding, "Prototype design and test of blockchain radio access network," in *Proc. ICC Workshops'19*, Shanghai, China, May 2019, pp. 1-6.
- [143] M. B. H. Weiss, K. Werbach, D. C. Sicker, and C. E. C. Bastidas, "On the application of blockchains to spectrum management," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 2, pp. 193-205, June 2019.
- [144] R. Yang, F. R. Yu, P. Si, Z. Yang, and Y. Zhang, "Integrated blockchain and edge computing systems: A survey, some research issues and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1508-1532, Second Quarter 2019.
- [145] X. Ling, Y. Le, J. Wang, and Z. Ding, "Hash access: Trustworthy grant-free IoT access enabled by blockchain radio access networks," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 1, pp. 54-61, Jan.-Feb. 2020.
- [146] M. A. Ferrag, M. Derdour, M. Mukherjee, A. Derhab, L. Maglaras, and H. Janicke, "Blockchain technologies for the internet of things: Research issues and challenges," *IEEE Int. Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2188-2204, Apr. 2019.
- [147] Z. Guan, G. Si, X. Zhang, L. Wu, N. Guizain, X. Du, and Y. Ma, "Privacy-preserving and efficient aggregation based on blockchain for power grid communications in smart communities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 7, pp. 82-88, July 2018.
- [148] N. A. Ali, A. M. Taha, and E. Barka, "Integrating blockchain and IoT/ITS for safer roads," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 1, pp. 32-37, Jan./Feb. 2020.
- [149] J. Backman, S. Yrjölä, K. Valtanen, and O. Mämmelä, "Blockchain network slice broker in 5G: Slice leasing in factory of the future use case," in *Proc. ITBMUN'17*, Copenhagen, Denmark, Nov. 2017, pp. 1-8.
- [150] Y. Dai, D. Xu, S. Maharjan, Z. Chen, Q. He, and Y. Zhang, "Blockchain and deep reinforcement learning empowered intelligent 5G beyond," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 3, pp. 10-17, May-June 2019.
- [151] X. Ling, et al. "Blockchain radio access network beyond 5G," IEEE Wireless Commun., 2020, in press.
- [152] X. Ling, Y. Le, J. Wang, Z. Ding, and X. Gao, "Practical modeling and analysis of blockchain radio access network," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1911.12537.pdf</u>
- [153] P. Kuo, A. Mourad and J. Ahn, "Potential applicability of distributed ledger to wireless networking technologies," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 4, pp. 4-6, Aug. 2018.
- [154] V. Bagaria, S. Kannan, D. Tse, G. Fanti, and P. Viswanath, "Deconstructing the blockchain to approach physical limits," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1810.08092.pdf</u>
- [155] J. Garay, A. Kiayias, and N. Leonardos, "The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications," in *Proc. AICTACT'15*, Sofia, Bulgaria, Apr. 2015, pp. 281–310.
- [156] T. Nagatsuma, "Terahertz wireless communications based on photonics technologies," Opt. Express, vol. 21, no. 20, pp. 23736-23747, Oct. 2013.
- [157] A. J. Seeds, H. Shams, M. J. Fice, and C. C. Renaud, "TeraHertz photonics for wireless communications," J. Lightw. Technol. vol. 33, no. 3, pp. 579-587, Feb 2015.
- [158] K. Huang and Z. Wang, "Terahertz terabit wireless communication," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 108-116, June 2011.

- [159] T. Nagatsuma, K. Kato, and J. Hesler, "Enabling technologies for realtime 50-Gbit/s wireless transmission at 300 GHz," in *Proc. AICNCC'15*, Boston, USA, Sept. 2015, pp. 1-5.
- [160] X. Li, J. Yu, J. Xiao, and Y. Xu, "Fiber-wireless-fiber link for 128-Gb/s PDM-16QAM signal transmission at *W*-band," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 19, pp. 1948-1951, Oct. 2014.
- [161] H. Huang, W. Liang, C. Lin, C. Wei, and S. Chi, "100-GHz DD-OFDM-RoF system over 150-km fiber transmission employing pilot-aided phase noise suppression and bit-loading algorithm," Opt. Express, vol. 22, no. 4, pp. 3938-3943, Oct. 2014.
- [162] H. Song, K. Ajito, Y. Muramoto, A. Wakatsuki, T. Nagatsuma, and N. Kukutsu, "Unitravelling-carrier photodiode module generating 300 GHz power greater than 1 mW," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 363-365, July 2012.
- [163] M. Martiskainen and J. Coburn, "The role of information and communication technologies (ICTs) in household energy consumption prospects for the UK," *Energy Efficiency*, vol. 4, no. 2, pp. 209-221, May 2011.
- [164] G. Carpintero, K. Balakier, Z. Yang, et al. "Microwave photonic integrated circuits for millimeter-wave wireless communications," J. Lightw. Technol., vol. 32, no. 20, pp. 3495-3501, Oct. 2014.
- [165] K. Eriksson, I. Darwazeh, and H. Zirath, "InP DHBT wideband amplifiers with up to 235 GHz bandwidth," in *Proc. IMS'14*, Tampa, FL, USA, June 2014, pp. 1-4.
- [166] A. Abbas, M. Karabiyik, and N. Pala, "Graphene-based field-effect transistor structures for terahertz applications," in *Proc SPIE'12*, Baltimore, MD, May 2012.
- [167] J. Tong, M. Muthee, S.-Y. Chen, S. K. Yngvesson, and J. Yun, "Antenna enhanced graphene THz emitter and detector," *Nano Lett.*, vol. 15, no. 8, pp. 5295-5301, May 2015.
- [168] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case," 2019. TR 38.824. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38 series/38.824
- [169] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S.Verdu, "Channel coding rate in the finite block length regime," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, June 2010.
- [170] G. Durisi, T. Koch, and P. Popovski, "Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets," *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, Sept. 2016.
- [171] A. Wolf, P. Schulz, M. Dörpinghaus, J. C. S. Santos Filho, and G. Fettweis, "How reliable and capable is multi-connectivity?" *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 2, pp. 1506-1520, Feb. 2019.
- [172] X.-H. You, D. Wang, B. Sheng, X. Gao, X. Zhao, and M. Chen, "Cooperative distributed antenna systems for mobile communications [Coordinated and Distributed MIMO]," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 35-43, June 2010.
- [173] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multipleantenna channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073-1096, May 2003.
- [174] V. Nguyen, A. Brunstrom, K. Grinnemo, and J. Taheri, "SDN/NFV-based mobile packet core network architectures: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 3, pp. 1567-1602, Third Quarter 2017.
- [175] Open Networking Foundation. SDN architecture overview. [Online]. Available: <u>https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/SDN-architecture-overview-1.0.pdf</u>

- [176] X. Huang, S. Cheng, K. Cao, P. Cong, T. Wei, and S. Hu, "A survey of deployment solutions and optimization strategies for hybrid SDN networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1483-1507, Second Quarter 2019.
- [177] R. Amin, M. Reisslein, and N. Shah, "Hybrid SDN networks: A survey of existing approaches," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3259-3306, Fourth Quarter 2018.
- [178] C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, "SDN & NFV in 5G: Advancements and challenges," in *Proc. ICIN'17*, Paris, France, Mar. 2017, pp. 107-111
- [179] Gray and Ken, "ETSI NFV ISG. Network functions virtualization," [Online]. Available: https://portal.etsi.org/nfv/nfv_white_paper.pdf
- [180] A. J. Gonzalez, G. Nencioni, A. Kamisiński, B. E. Helvik, and P. E. Heegaard, "Dependability of the NFV orchestrator: state of the art and research challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3307-3329, Fourth Quarter 2018.
- [181] Ed T. SDN vs. NFV: What's the difference [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/software-defined-networking/sdn-vs-nfv.html_
- [182] J. Gil Herrera and J. F. Botero, "Resource allocation in NFV: A comprehensive survey," *IEEE Trans. Netw. Service Manage.*, vol. 13, no. 3, pp. 518-532, Sept. 2016.
- [183] V. Saro, "Role of NFV in 5G network," [Online]. Available: https://www.thetech.in/2019/01/role-of-nfv-in-5g-network.html_
- [184] N. Gianfranco, R. G. Garroppo, A. J. Gonzalez, B. E. Helvik, and P. Gregorio, "Orchestration and control in software-defined 5G networks: Research challenges," *Wireless Commun. Mob. Com.*, vol. 2018, no. 6923869, pp. 1-18, July 2018.
- [185] P. Rost, C. Mannweiler, D. S. Michalopoulos, C. Sartori, V. Sciancaleppore, N. Sastry, O. Holland, S. Tayade, B. Han, D. Bega, D. Aziz, and H. Bakker, "Network slicing to enable scalability and flexibility in 5G mobile networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, pp. 72-79, May 2017.
- [186] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, "Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 2429-2453, Third Quarter 2018.
- [187] NGMN Alliance, *Description of Network Slicing Concept, NGMN 5G P1 Requirements & Architecture.* Work Stream End-to-End Architecture, Version 1.0. 2016.
- [188] X. Li, M. Samaka, H. A. Chan, D. Bhamare, L. Gupta, C. Guo, and R. Jain, "Network slicing for 5G: Challenges and opportunities," *IEEE Int. Com.*, vol. 21, no. 5, pp. 20-27, Sept. 2017.
- [189] IETF Network Working Group, "Network slicing architecture," [Online]. Available: https://tools.ietf.org/id/draft-geng-netslices-architecture-01.html
- [190] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "System architecture for the 5G system," 2018. TS 23.501. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501
- [191] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "5G system: Technical realization of service-
based architecture," Mar. 2018. TS 29.500.
https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29 series/29.500
- [192] G. Brown, Serviced-based architecture for 5G core network. White Paper. Huawei Technology Co. Ltd. 2017. https://www.3g4g.co.uk/5G/5Gtech_6004_2017_11_Service-Based-Architecture-for-5G-Core-Networks HR Huawei.pdf

- [193] H. C. Rudolph, A. Kunz, L. L. Iacono, and H. V. Nguyen, "Security challenges of the 3GPP 5G service based architecture," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 3, no. 1, pp. 60-65, Mar. 2019.
- [194] N. Alliance, "Service-based architecture in 5G: Case study and deployment recommendations," [Online]. Available: <u>https://www.ngmn.org/wpcontent/uploads/Publications/2019/190919-NGMNService-</u> BasedArchitecturein5GCaseStudyandDeploymentRecommendations-v2.4.pdf
- [195] Huawei Technology Co. Ltd, "Partnering with the industry for 5G security assurance," [Online]. Available: <u>https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/trust-center/huawei-5g-security-white-paper-4th.pdf</u>
- [196] S. Wang, Y. Guo, N. Zhang, P. Yang, A. Zhou, and X. S. Shen, "Delay-aware microservice coordination in mobile edge computing: A reinforcement learning approach," *IEEE Trans. Mob. Com.*, 2020, in press.
- [197] S. Wang, J. Xu, N. Zhang, and Y. Liu, "A survey on service migration in mobile edge computing," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23511-23528, Apr. 2018.
- [198] 张平, 牛凯, 田辉, 聂高峰, 秦晓琦, 戚琦, 张娇. 6G 移动通信技术展望, 通信学报, vol. 40, no. 1, pp. 141-148, May 2019.
- [199] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y. A. Zhang, "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, Aug. 2019.
- [200] L. Loven, T. Leppanen, E. Peltonen, J. Partala, and J. Riekki, "Edge AI: A vision for distributed, edge-native artificial intelligence in future 6G networks." in *Proc. 6G Wireless Summit*'19, Lapland, Finland, Mar. 2019, pp. 1-2.
- [201] X. Qiao, P. Ren, S. Dustdar, L. Liu, H. Ma, and J. Chen, "Web AR: A promising future for mobile augmented reality—State of the art, challenges, and insights," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 4, pp. 651-666, Apr. 2019.
- [202] V. Donald, "Advanced mobile phone service: The cellular concept," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, no. 1, pp. 15-41, Jan. 1979.
- [203] W. R. Young, "Advanced mobile phone service: introduction, background, and objectives," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 58, no. 1, pp. 1-14, Jan. 1979.
- [204] A. Lozano, R. W. Heath, and J. G. Andrews, "Fundamental limits of cooperation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 9, pp. 5213-5226, Sept. 2013.
- [205] T. Han, X. Ge, L. Wang, K. S. Kwak, Y. Han, and X. Liu, "5G converged cell-less communications in smart cities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 3, pp. 44-50, Mar. 2017.
- [206] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger, and E. G. Larsson, "Ubiquitous cell-free massive mimo communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 2019, no. 1, pp. 179, Aug. 2019.
- [207] J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, J. Zheng, B. Ai, and L. Hanzo, "Cell-free massive MIMO: A new next-generation paradigm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, July 2019.
- [208] S. Buzzi and C. D'Andrea, "Cell-free massive MIMO: User-centric approach," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 6, pp. 706-709, Dec. 2017.
- [209] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 77-90, Jan. 2020.

- [210] H. Q. Ngo, L. Tran, T. Q. Duong, M. Matthaiou, and E. G. Larsson, "On the total energy efficiency of cell-free massive MIMO," *IEEE Trans. Cog. Commun. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 25-39, Mar. 2018.
- [211] C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R. H. Glitho, M. J. Morrow, and P. A. Polakos, "A comprehensive survey on fog computing: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 416-464, First Quarter 2018.
- [212] ETSI, "Mobile-edge computing—Introductory technical white paper," [Online]. Available: <u>https://portal.etsi.org/portals/0/tbpages/mec/docs/mobile-edge</u> computing-introductory <u>technical white paper v1%2018-09-14.pdf</u>
- [213] M. Chiang and T. Zhang, "Fog and IoT: An overview of research opportunities," *IEEE Int. Things J.*, vol. 3, no. 6, pp. 854-864, Dec. 2016.
- [214] OpenFog Consortium, "Openfog reference architecture technical paper," [Online]. Available: <u>https://www.openfogconsortium.org/wp-</u> <u>content/uploads/OpenFogReferenceArchitecture20917-FINAL-1.pdf</u>
- [215] Y. Yang, J. Huang, T. Zhang, and J. Weinman., Fog and fogonomics: Challenges and practices of fog computing. Wiley, 2020.
- [216] Y. Yang, X. Luo, X. Chu, and M.-T. Zhou, Fog-enabled intelligent IoT systems. Springer, 2019.
- [217] N. Chen, Y. Yang, T. Zhang, M. Zhou, X. Luo, and J. K. Zao, "Fog as a service technology," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 11, pp. 95-101, Nov. 2018.
- [218] M. Mukherjee, L. Shu, and D. Wang, "Survey of fog computing: Fundamental, network applications, and research challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 1826-1857, thirdquarter 2018.
- [219] J. Park, S. Samarakoon, M. Bennis, and M. Debbah, "Wireless network intelligence at the edge," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 11, pp. 2204-2239, Nov. 2019.
- [220] Y. Yang, "Multi-tier computing networks for intelligent IoT," *Nat. Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 4-5, Jan. 2019.
- [221] R. Gopal and N. BenAmmar, "Framework for unifying 5G and next generation satellite communications," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 16-24, Sept.-Oct. 2018.
- [222] L. Boero, R. Bruschi, F. Davoli, M. Marchese and F. Patrone, "Satellite networking integration in the 5G ecosystem: research trends and open challenges," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 9-15, Sept.-Oct. 2018.
- [223] G. Giambene, S. Kota, and P. Pillai, "Satellite-5G integration: A network perspective," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 25-31, Sept.-Oct. 2018.
- [224] H. Yao, L. Wang, X. Wang, Z. Lu, and Y. Liu, "The space-terrestrial integrated network: an overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 9, pp. 178-185, Sept. 2018.
- [225] S. A. R. Naqvi, S. A. Hassan, H. Pervaiz, and Q. Ni, "Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 36-42, Jan. 2018.
- [226] N. Cheng, W. Xu, W. Shi, Y. Zhou, N. Lu, H. Zhou, and X. Shen, "Air-ground integrated mobile edge networks: architecture, challenges, and opportunities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 8, pp. 26-32, Aug.2018.

- [227] S. Sekander, H. Tabassum, and E. Hossain, "Multi-tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: challenges, trends, and prospects," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 3, pp. 96-103, Mar. 2018.
- [228] G. Xiong, F. Zhu, X. Dong, H. Fan, B. Hu, Q. Kong, W. Kang, and T. Teng, "A kind of novel ITS based on space-air-ground big-data," *IEEE Intell. Transp. Systems Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 10-22, Jan. 2016.
- [229] N. Zhang, S. Zhang, P. Yang, O. Alhussein, W. Zhuang, and X. S. Shen, "Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 7, pp. 101-109, July 2017.
- [230] J. Liu, Y. Shi, Z. M. Fadlullah, and N. Kato, "Space-air-ground integrated network: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741, Fourthquarter 2018.
- [231] Z. Zhou, J. Feng, C. Zhang, Z. Chang, Y. Zhang, and K. M. S. Huq, "SAGECELL: Softwaredefined space-air-ground integrated moving cells," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 8, pp. 92-99, Aug. 2018.
- [232] M. Vondra, M. Ozger, D. Schupke, and C. Cavdar, "Integration of satellite and aerial communications for heterogeneous flying vehicles," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 5, pp. 62-69, Sept.-Oct. 2018.
- [233] Y. Ruan, Y. Li, C.-X. Wang, R. Zhang, and H. Zhang, "Performance evaluation for underlay cognitive satellite-terrestrial cooperative networks," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 61, no. 10, pp. 213-223, Aug. 2018.
- [234] S. Zhang, H. Zhang, B. Di and L. Song, "Cellular UAV-to-X communications: Design and optimization for multi-UAV networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 1346-1359, Feb. 2019.
- [235] R. d. Silva and S. Rajasinghege, "Optimal desired trajectories of UAVs in private UAV networks," in *Proc. ATC'18*, Ho Chi Minh City, Vietnam, Oct. 2018, pp. 310-314.
- [236] M. Hua, Y. Wang, C. Li, Y. Huang and L. Yang, "UAV-Aided mobile edge computing systems with one by one access scheme," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 664-678, Sept. 2019.
- [237] P. Zhou, X. Fang, Y. Fang, R. He, Y. Long, and G. Huang, "Beam management and selfhealing for mmWave UAV mesh networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1718-1732, Feb. 2019.
- [238] G. Kim, I. Mahmud, and Y. Cho, "Hello-message transmission-power control for network self-recovery in FANETs," in *Proc. ICUFN'18*, Prague, Czech Republic, July 2018, pp. 546-548.
- [239] H. Shakhatreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, and M. Guizani, "Unmanned serial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, Apr. 2019.
- [240] X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu and H. Yanikomeroglu, "Airborne communication networks: a survey," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 1907-1926, Sept. 2018.
- [241] Iskandart, S. Gratsia, and M. E. Ernawan, "LTE uplink cellular capacity analysis in a high altitude platforms (HAPS) communication," in *Proc. TSSA'17*, Lombok, Indonesia, Oct. 2017, pp. 1-5.

- [242] D. Hidayat and Iskandar, "Pilot-based estimation for SC-FDMA LTE in high altitude platforms (HAPS) channel," in *Proc. TSSA'15*, Bandung, Indonesia, Nov. 2015, pp. 1-5.
- [243] P. G. Sudheesh, M. Mozaffari, M. Magarini, W. Saad, and P. Muthuchidambaranathan, "Sumrate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 1240-1243, June 2018.
- [244] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M. Alouini, "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 218-224, Jan. 2018.
- [245] Z. Lian, L. Jiang, C. He, and D. He, "A non-stationary 3-D wideband GBSM for HAP-MIMO communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 2, pp. 1128-1139, Feb. 2019.
- [246] B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends," *IEEE Int. Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241-2263, Apr. 2019.
- [247] T. Xia, M. M. Wang, J. Zhang, and L. Wang, "Maritime Internet of things: Challenges and solutions," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 188-196, Apr. 2020.
- [248] T. Xia, M. M. Wang, and X.-H. You, "Satellite machine-type communication for maritime Internet of things: an interference perspective," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76404-76415, May 2019.
- [249] M. Wang, "Machine-type communication for maritime Internet of things: A design," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2020, in press.
- [250] J. Zhang, M. M. Wang, T. Xia, and L. Wang, "Maritime IoT: An architectural and radio spectrum perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93109-93122, Apr. 2020.
- [251] N. Cheng, W. Quan, W. Shi, H. Wu, Q. Ye, H. Zhou, W. Zhuang, X. Sherma, and B. Bai, "A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 1, pp. 178-185, Feb. 2020.
- [252] 牛志升, S. SHEN, 张钦宇, 唐余. 面向沉浸式体验的空天地一体化车联网体系架构与 关键技术, 物联网学报, vol. 1, no. 2, pp. 17-27, Sept. 2017.
- [253] N. Cheng, F. Lyu, W. Quan, C. Zhou, H. He, W. Shi, and X. Shen, "Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: A learning-based approach," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, no. 5, pp. 1117-1129, May 2019.
- [254] X. Shen, J. Gao, W. Wu, K. Lyu, M. Li, W. Zhuang, X. Li, and J. Rao, "AI-assisted networkslicing based next-generation wireless networks," *IEEE Open J. Veh. Technol.*, vol. 1, pp. 45-66, Jan. 2020.
- [255] J. Chen, Q. Ye, W. Quan, S. Yan, P. T. Do, P. Yang, W. Zhuang, X. Shen, X. Li, and J. Rao, "SDATP: An SDN-based traffic-adaptive and service-oriented transmission protocol," *IEEE Trans. Cog. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 2, pp. 756-770, June 2020.
- [256] C. T. Neil, M. Shafi, P. J. Smith, P. A. Dmochowski, and J. Zhang, "Impact of microwave and mmWave channel models on 5G systems performance," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6505-6520, Dec. 2017.
- [257] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations," 2003. TR 25.996. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25 series/25.996
- [258] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on 3D channel model for LTE," 2014. TR 36.873. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.873

- [259] L. Liu, C. Oestges, J. Poutanen, K. Haneda, P. Vainikainen, F. Quitin, F. Tufvesson, and P. D. Doncker, "The COST 2100 MIMO channel model," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 92-99, Dec. 2012.
- [260] Aalto University, et. al, "5G channel model for bands up to 100 GHz, v2.0," 2014. http://www.5gworkshops.com/2015/5G_Channel_Model_for_bands_up_to100_GHz(2015-12-6).pdf
- [261] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 2017. TR 38.901. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38 series/38.901
- [262] L. Li, D. Wang, X. Niu, Y. Chai, L. Chen, L. He, X. Wu, F. Zheng, T. Cui, and X.-H. You, "MmWave communications for 5G: implementation challenges and advances," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 61, no. 2, pp. 5-23, Feb. 2018.
- [263] H. Song and T. Nagatsuma, "Present and future of terahertz communications," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 256-263, Sept. 2011.
- [264] I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, and C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," *Phy. Commun.*, vol. 12, pp. 16–32, Sept. 2014.
- [265] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel and T. Kurner, "Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 24-39, Dec. 2007.
- [266] Z. Chen, X. Ma, B. Zhang, Y. Zhang, Z. Niu, and N. Kuang, "A survey on terahertz communications," *China Communications*, vol.16, no. 2, pp. 1-35, Feb. 2019.
- [267] F. C. Commission, "Fcc takes steps to open spectrum horizons for new services and technologies," [Online]. Available: <u>https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-356588A1.pdf</u>
- [268] C. Lin and G. Y. Li, "Indoor terahertz communications: How many antenna arrays are needed?" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 3097-3107, June 2015.
- [269] J. Shin, E. G. Sirer, H. Weatherspoon, and D. Kirovski, "On the feasibility of completely wireless datacenters," in *Proc. ANCS'12*, Austin, TX, USA, Oct. 2012, pp. 3-14.
- [270] F. Okano, "Ultrahigh-definition television system with 4000 scanning lines," in Proc. NAB Broadcast Enginner Conference '04, 2004, pp. 437-440.
- [271] H. Haas, L. Yin, C. Chen, S. Videv, D. Parol, E. Poves, H. Alshaer, and M. S. Islim, "Introduction to indoor networking concepts and challenges in LiFi," *IEEE J. Opt. Commun. Newt.*, vol. 12, no. 2, pp. A190-A203, Feb. 2020.
- [272] Z. Wang, D. Tsonev, S. Videv, and H. Haas, "On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 8, pp. 1612-1623, Aug. 2015.
- [273] K. Yoshida, P. Manousiadis, R. Bian, Z. Chen, C. Murawski, M. Gather, H. Haas, G. Turnbull, and I. Samuel, "245 MHz bandwidth organic light emitting diodes used in a gigabit optical wireless data link," *Nat. Commun*, vol.11, pp. 1-7, Mar. 2020.
- [274] R. Bian, I. Tavakkolnia, and H. Haas, "15.73 Gb/s visible light communication with off-theshelf LEDs," J. Lightw. Technol., vol. 37, no. 10, pp. 2418-2424, May, 2019.
- [275] J. Kosman, O. Almer, T. Abbas, N. Dutton, R. Walker, S. Videv, K. Moore, H. Haas, and R. Henderson "A 500Mb/s -46.1dBm CMOS SPAD receiver for laser diode visible-light communications," in *Proc. ISSCC'19*, San Francisco, USA, Feb. 2019, pp. 468–470.

- [276] Y. Tan, X. Wu, and H. Haas, "Performance comparison between coherent and DCO-OFDM LiFi systems," in *Proc. ICC'19*, Shanghai, China, May 2019, pp. 1-6.
- [277] Z. Zhang, J. Dang, L. Wu, H. Wang, J. Xia, W. Lei, J. Wang, and X.-H. You, "Optical mobile communications: principles, implementation, and performance analysis," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 471-482, Jan. 2019.
- [278] E. Panayirci, A. Yesilkaya, T. Cogalan, H. V. Poor, and H. Haas, "Physical-layer security with optical generalized space shift keying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 3042-3056, May 2020.
- [279] B. Zhu, Z. Zhu, Y. Wang, and J. Cheng, "Optimal optical omnidirectional angle-of-arrival estimator with complementary photodiodes," *J. Lightw. Technol.*, vol. 37, no. 13, pp. 2932-2945, Jul, 2019.
- [280] B. Zhu, J. Cheng, Y. Wang, J. Yan, and J. Wang, "Three-dimensional VLC positioning based on angle difference of arrival with arbitrary tilting angle of receiver," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 1, pp. 8-22, Jan. 2018.
- [281] Jovicic, J. Li and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 26-32, Dec. 2013.
- [282] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, and A. Neild, "Visible light positioning: a roadmap for international standardization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 12, pp. 68-73, Dec. 2013.
- [283] S. Yang, H. Kim, Y. Son, and S. Han, "Three-dimensional visible light indoor localization using AOA and RSS with multiple optical receivers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 2480-2485, July 2014.
- [284] Z. Zeng, M. Dehghani Soltani, Y. Wang, X. Wu, and H. Haas, "Realistic indoor hybrid WiFi and OFDMA-based LiFi networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 2978-2991, May 2020.
- [285] B. Genovés Guzmán, V. P. Gil Jiménez, M. C. Aguayo-Torres, H. Haas, and L. Hanzo, "Downlink performance of optical OFDM in outdoor visible light communication," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 76854-76866, Nov. 2018.
- [286] M. S. Islim, S. Videv, M. Safari, E. Xie, J. J. D. McKendry, E. Gu, M. D. Dawson, and H. Haas, "The impact of solar irradiance on visible light communications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 2376-2386, June 2018.
- [287] H. Haas, S. Videv, S. Das, J. Fakidis, and H. Stewart, "Solar cell receiver free-space optical for 5G backhaul," in *Proc. OFC'19*, San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1-3.
- [288] X. Wu and H. Haas, "Handover skipping for LiFi," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38369-38378, Mar. 2019.
- [289] G. N. Arvanitakis, R. Bian, J. J. D. McKendry, C. Cheng, E. Xie, X. He, G. Yang, M. S. Islim, A. A. Purwita, E. Gu, H. Haas, and M. D. Dawson, "Gb/s underwater wireless optical communications using series-connected GaN micro-LED arrays," *IEEE Photon. J.*, vol. 12, no. 2, pp. 1-10, Apr. 2020.
- [290] Y. Kaymak, R. Rojas-Cessa, J. Feng, N. Ansari, M. Zhou, and T. Zhang, "A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 1104-1123, Second Quarter 2018.
- [291] G. A. Cap, H. H. Refei, and J. J. Sluss, "Optical tracking and auto-alignment transceiver system," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 25, no. 9, pp. 26-34, Sept. 2010.

- [292] MiWEBA Project, "Channel modeling and characterization, v1.0," 2014. https://www.miweba.eu/wp-content/uploads/2014/07/MiWEBA_D5.1_v1.011.pdf
- [293] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Börner, and L. Thiele, "QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 6, pp. 3242-3256, June 2014.
- [294] S. Jaeckel *et al.*, Fraunhofer Heinrich Hertz institute, Technical Report v2.0.0., "QuaDRiGaquasi deterministic radio channel generator, user manual and documentation," 2017.
- [295] V. Nurmela, METIS, ICT-317669/D1.4, "METIS channel models," 2015. https://metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.4_v1.0.pdf
- [296] H2020-ICT-671650-mmMAGIC/D2.2, v1, "Measurement results and final mmMAGIC channel models," 2017. https://bscw.5gmmmagic.eu/pub/bscw.cgi/d202656/mmMAGIC_D2-2.pdf
- [297] A. Maltsev, IEEE doc. 802.11-15/1150r9, "Channel models for IEEE 802.11ay," 2016. https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1150-09-00ay-channel-models-for-ieee-802-11ay.docx
- [298] ITU-R, R15-WP5D-170613-TD-0332, "Preliminary draft new report ITU-R M, [IMT-2020.EVAL]," 2017. https://www.itu.int/md/R15-WP5D-170214-TD-0297/en
- [299] C.-X. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang, and M. Zhang, "A survey of 5G channel measurements and models," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3142-3168, Fourth Quarter 2018.
- [300] J. Huang, C.-X. Wang, R. Feng, J. Sun, W. Zhang, and Y. Yang, "Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 7, pp. 1591-1605, July 2017.
- [301] J. Huang, C.-X. Wang, Y. Liu, J. Sun, and W. Zhang, "A novel 3D GBSM for mmWave MIMO channels," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 61, no. 10, pp. 198-212, Oct. 2018.
- [302] J. Huang, C.-X. Wang, H. Chang, J. Sun, and X. Gao, "Multi-frequency multi-scenario millimeter wave MIMO channel measurements and modeling for B5G wireless communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2020, vol. 38, no. 9, Sept. 2020.
- [303] J. Huang, Y. Liu, C.-X. Wang, J. Sun, and H. Xiao, "5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: Recent developments and future challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 1, pp. 138-145, Jan. 2019.
- [304] S. Priebe, C. Jastrow, M. Jacob, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, and T. Kürner, "Channel and propagation measurements at 300 GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 5, pp. 1688-1698, May 2011.
- [305] S. Kim and A. G. Zajić, "Statistical characterization of 300-GHz propagation on a desktop," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 8, pp. 3330-3338, Aug. 2015.
- [306] S. Kim and A. Zajić, "Characterization of 300-GHz wireless channel on a computer motherboard," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 64, no. 12, pp. 5411-5423, Dec. 2016.
- [307] A. Al-Kinani, C.-X. Wang, L. Zhou, and W. Zhang, "Optical wireless communication channel measurements and models," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 1939-1962, Third Quarter 2018.
- [308] A. M. Al-Saegh, A. Sali, J. S. Mandeep, and F. Pérez Fontán, "Channel measurements, characterization, and modeling for land mobile satellite terminals in tropical regions at Kuband," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 897-911, Feb. 2017.

- [309] L. Bai, C.-X. Wang, G. Goussetis, S. Wu, Q. Zhu, W. Zhou, and E. M. Aggoune, "Channel modeling for satellite communication channels at Q-band in high latitude," *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 137691-137703, Dec. 2019.
- [310] A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M. Alouini, and P. Dobbins, "A survey of channel modeling for UAV communications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2804-2821, Fourth Quarter 2018.
- [311] W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U. Fiebig, and N. Schneckenburger, "A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2361-2391, Third Quarter 2019.
- [312] J. Wang, H. Zhou, Y. Li, Q. Sun, Y. Wu, S. Jin, T. Q. S. Quek, and C. Xu, "Wireless channel models for maritime communications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 68070-68088, Nov. 2018.
- [313] Y. Liu, C.-X. Wang, and J. Huang, "Recent developments and future challenges in channel measurements and models for 5G and beyond high-speed train communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 9, pp. 50-56, Sept. 2019.
- [314] R. He, C. Schneider, D. Dupleich, R. S. Thomä, M. Boban, J. Luo, Z. Zhong, and Y. Zhang, "Propagation channels of 5G millimeter-wave vehicle-to-vehicle communications: Recent advances and future challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 15, no. 1, pp. 16-26, Mar. 2020.
- [315] A. F. Ian and J. M. Josep "Realizing ultra-massive MIMO (1024×1024) communication in the (0.06-10) terahertz band," *Nano Commun. Netw.*, vol. 8, pp. 46-54, Mar. 2016.
- [316] Y. Yao, X. Liang, M. Zhu, W. Zhu, J. Geng, and R. Jin, "Analysis and experiments on reflection and refraction of orbital angular momentum waves," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, no. 4, pp. 2085-2094, Apr. 2019.
- [317] W. Wang, S. L. Capitaneanu, D. Marinca, and E. Lohan, "Comparative analysis of channel models for industrial IoT wireless communication," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 91627-91640, July 2019.
- [318] C.-X. Wang, J. Huang, H. Wang, X. Gao, X.-H. You, and Y. Hao, "6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2020, submitted for publication.
- [319] 王承祥, 黄杰, 王海明, 高西奇, 尤肖虎, 郝阳. 面向 6G 的无线通信信道特性分析与 建模, 物联网学报, vol. 4, no. 1, pp. 19-32, Mar. 2020.
- [320] R. Feng, Y. Liu, J. Huang, J. Sun, C.-X. Wang, and G. Goussetis, "Wireless Channel parameter estimation algorithms: recent advances and future challenges," *China Commun.*, vol. 14, no. 5, pp. 211-228, May 2018.
- [321] W. Tang, X. Li, J. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, and T. Cui "Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results," *China Commun.*, vol. 16, no. 5, pp. 46-61, May 2019.
- [322] J. Huang, C.-X. Wang, L, Bai, J. Sun, Y. Yang, J. Li, O. Tirkkonen, and M. Zhou, "A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems," *IEEE Trans. Big Data*, vol. 6, no. 2, pp. 211-222, June 2020.
- [323] C.-X. Wang, M. D. Renzo, S. Stanczak, S. Wang, and E. G. Larsson, "Artificial intelligence enabled wireless networking for 5G and beyond: recent advances and future challenges," *IEEE Wireless Commun.* vol. 27, no. 1, pp.16-23, Feb. 2020.

- [324] S. Wu, C.-X. Wang, H. Aggoune, M. M. Alwakeel, and X.-H. You, "A general 3D nonstationary 5G wireless channel model," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 7, pp. 3065-3078, July 2018.
- [325] E. Ahmed, I. Yaqoob, I. A. T. Hashem, J. Shuja, M. Imran, N. Guizani, and S. T. Bakhsh, "Recent advances and challenges in mobile big data," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 2, pp. 102-108, Feb. 2018.
- [326] J. Zhu, C. Gong, S. Zhang, M. Zhao, and W. Zhou, "Foundation study on wireless big data: Concept, mining, learning and practices," *China Commun.*, vol. 15, no. 12, pp. 1-15, Dec. 2018.
- [327] T. Wang, S. Wang, and Z. Zhou, "Machine learning for 5G and beyond: From model-based to data-driven mobile wireless networks," *China Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 165-175, Jan. 2019.
- [328] M. E. Morocho Cayamcela, and W. Lim, "Artificial intelligence in 5G technology: A survey," in *Proc. ICTC'18*, Jeju, Korea, Oct. 2018, pp. 860-865.
- [329] M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi, O. Zhao, K. Ishizu, and F. Kojima, "Big data analytics, machine learning, and artificial intelligence in next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32328-32338, May 2018.
- [330] H. Chiroma, U. A. Abdullahi, S. M. Abdulhamid, A. A. Alarood, L. A. Gabralla, N. Rana, L. Shuib, I. A. T. Hashem, D. E. Gbenga, A. I. Abubakar, A. M. Zeki, and T. Herawan, "Progress on artificial neural networks for big data analytics: A survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70535-70551, Nov. 2019.
- [331] Q. Mao, F. Hu, and Q. Hao, "Deep learning for intelligent wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 2595-2621, Fourth Quarter 2018.
- [332] Y. Li, Y. Zhang, K. Luo, T. Jiang, Z. Li, and W. Peng, "Ultra-dense HetNets meet big data: Green frameworks, techniques, and approaches," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, pp. 56-63, June 2018.
- [333] R. Li, Z. Zhao, X. Zhou, G. Ding, Y. Chen, Z. Wang, and H. Zhang "Intelligent 5G: When cellular networks meet artificial intelligence," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 175-183, Oct. 2017.
- [334] S. Han, C.-L. I, G. Li, S. Wang, and Q. Sun, "Big data enabled mobile network design for 5G and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 9, pp. 150-157, Sept. 2017.
- [335] C.-L. I, Q. Sun, Z. Liu, S. Zhang, and S. Han, "The big-data-driven intelligent wireless network: Architecture, use cases, solutions, and future trends," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 20-29, Dec. 2017.
- [336] Z. Qin, H. Ye, G. Y. Li, and B. F. Juang, "Deep learning in physical layer communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 2, pp. 93-99, Apr. 2019.
- [337] X.-H. You, C. Zhang, X. Tan, S. Jin, and H. Wu "AI for 5G: Research directions and paradigms," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 62, pp. 1-13, July 2019.
- [338] H. Ye, G. Y. Li, and B. Juang, "Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 114-117, Feb. 2018.
- [339] J. Xu, P. Zhu, J. Li, and X.-H. You, "Deep learning-based pilot design for multi-user distributed massive MIMO systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 1016-1019, Aug. 2019.

- [340] N. Samuel, T. Diskin, and A. Wiesel, "Deep MIMO detection," in *Proc. SPAWC'17*, Sapporo, Japan, July 2017, pp. 1-5.
- [341] Y. Wang, S. Zhang, C. Zhang, X. Chen, and S. Xu, "A low-complexity belief propagation based decoding scheme for polar codes - decodability detection and early stopping prediction," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 159808-159820, Oct. 2019.
- [342] M. Kim, N. Kim, W. Lee, and D. Cho, "Deep learning-aided SCMA," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 4, pp. 720-723, Apr. 2018.
- [343] H. He, S. Jin, C. Wen, F. Gao, G. Y. Li, and Z. Xu, "Model-driven deep learning for physical layer communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 77-83, Oct. 2019.
- [344] X. Gao, S. Jin, C. Wen, and G. Y. Li, "ComNet: Combination of deep learning and expert knowledge in OFDM receivers," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2627-2630, Dec. 2018.
- [345] H. He, C. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 852-855, Oct. 2018.
- [346] H. He, C. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Model-driven deep learning for MIMO detection," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 1702-1715, Feb. 2020.
- [347] X. Tan, W. Xu, K. Sun, Y. Xu, Y. Be'ery, X.-H. You, and C. Zhang, "Improving massive MIMO message passing detectors with deep neural network," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 2, pp. 1267-1280, Feb. 2020.
- [348] W. Xu, Z. Wu, Y. Ueng, X.-H. You, and C. Zhang, "Improved polar decoder based on deep learning," in *Proc. SiPS'17*, Lorient, France, Oct. 2017, pp. 1-6.
- [349] W. Xu, Z. Zhang, X.-H. You, and C. Zhang, "Reconfigurable and low-complexity accelerator for convolutional and generative networks over finite fields," *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, 2020, in press.
- [350] J. Zhang, Y. Huang, J. Wang, and X.-H. You, "Intelligent beam training for millimeter-wave communications via deep reinforcement learning," in *Proc. GLOBECOM'19*, Waikoloa, HI, USA, Dec. 2019, pp. 1-7.
- [351] J. Zhang, Y. Huang, Y. Zhou, and X.-H. You, "Beam alignment and tracking for millimeter wave communications via bandit learning," *IEEE Trans. Commun.*, 2020, in press.
- [352] C. Zhang *et al.*, "Artificial intelligence for 5G and beyond 5G: Implementations, algorithms, and optimizations," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 149-163, June 2020.
- [353] Y. Zhou, Z. M. Fadlullah, B. Mao, and N. Kato, "A deep-learning-based radio resource assignment technique for 5G ultra dense networks," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 6, pp. 28-34, Nov.-Dec. 2018.
- [354] Y. Fu, S. Wang, C.-X. Wang, X. Hong, and S. McLaughlin, "Artificial intelligence to manage network traffic of 5G wireless networks," *IEEE Netw.*, vol. 32, no. 6, pp. 58-64, Nov.-Dec. 2018.
- [355] J. Riihijarvi and P. Mahonen, "Machine learning for performance prediction in mobile cellular networks," *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 13, no. 1, pp. 51-60, Feb. 2018.
- [356] A. Adeel, H. Larijani, A. Javed, and A. Ahmadinia, "Critical analysis of learning algorithms in random neural network based cognitive engine for LTE systems," in *Proc. VTC'15-Spring*, Glasgow, UK, May 2015, pp. 1-5.

- [357] Y. Zang, F. Ni, Z. Feng, S. Cui, and Z. Ding, "Wavelet transform processing for cellular traffic prediction in machine learning networks," in *Proc. ChinaSIP*'15, Chengdu, China, July 2015, pp. 458-462.
- [358] W. Y. B. Lim, N. C. Luong, D. T. Hoang, Y. Jiao, Y. Liang, Q. Yang, D. Niyato, and C. Miao, "Federated learning in mobile edge networks: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2020, in press.
- [359] H. Ye, L. Liang, G. Ye Li, J. Kim, L. Lu, and M. Wu, "Machine learning for vehicular networks: Recent advances and application examples," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 13, no. 2, pp. 94-101, June 2018.
- [360] L. Liang, H. Ye, G. Yu, and G. Y. Li, "Deep-learning-based wireless resource allocation with application to vehicular networks," *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 2, pp. 341-356, Feb. 2020.
- [361] E. Li, Z. Zhi, and C. Xu, "Edge intelligence: On-demand deep learning model co-inference with device-edge synergy," in *Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Mobile Edge Communications*, Budapest, Hungary, 2018.
- [362] Z.-L. Ning *et al.*, "Deep reinforcement learning for vehicular edge computing: An intelligent offloading system," *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, vol. 10, pp. 1-24, 2019.
- [363] L. T. Tan and R. Q. Hu, "Mobility-aware edge caching and computing in vehicle networks: A deep reinforcement learning," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10190-10203, Nov. 2018.
- [364] S.-W. He, W. Huang, J. Wang, J. Ren, Y. Huang, and Y. Zhang, "Cache-enabled coordinated mobile edge network: Opportunities and challenges," 2019. [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1912.11626.pdf</u>
- [365] Z. Zhang, Y. Yang, M. Hua, C. Li, Y. Huang, and L. Yang, "Proactive caching for vehicular multi-view 3D video streaming via deep reinforcement learning," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 5, pp. 2693-2706, May 2019.
- [366] Z. Zhang, H. Chen, M. Hua, C. Li, Y. Huang, and L. Yang, "Double coded caching in ultradense networks: Caching and multicast scheduling via deep reinforcement learning," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 2, pp. 1071-1086, Feb. 2020.
- [367] Z. Zhang, M. Hua, C. Li, Y. Huang, and L. Yang, "Placement delivery array design via attention-based sequence-to-sequence model with deep neural network," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 372-375, Apr. 2019.
- [368] Y. He, N. Zhao, and H. Yin, "Integrated networking, caching, and computing for connected vehicles: A deep reinforcement learning approach," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 1, pp. 44-55, Jan. 2018.
- [369] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6G be?" *Nat. Electron.*, vol. 3, pp. 20-29, 2020.
- [370] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Debbah, "Distributed federated learning for ultra-reliable low-latency vehicular communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 2, pp. 1146-1159, Feb. 2020.
- [371] W. Miao, L. Wei, H. Wu, and J. Shi, "Fault processing algorithm of power backbone communication networks based on artificial intelligence and state perception," in *Proc. IEEE ISGT'19-Asia*, Chengdu, China, May 2019, pp. 1045-1050.
- [372] H.-L. Yang, A. Alphones, Z. Xiong, D. Niyato, J. Zhao, and K. Wu, "Artificial intelligenceenabled intelligent 6G networks," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1912.05744.pdf</u>

- [373] C.-L. I, S. Han, and S. Bian, "Energy-efficient 5G for a greener future," *Nat. Electron.*, vol. 3, pp. 182-184, Apr. 2020.
- [374] G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, C. Yang, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "Energy-efficient wireless communications: Tutorial, survey, and open issues," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 28-35, Dec. 2011.
- [375] C.-L. I, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li and Z. Pan, "Toward green and soft: a 5G perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 66-73, Feb. 2014.
- [376] D. Kreutz, F. M. V. Ramos, P. E. Veríssimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76, Jan. 2015.
- [377] C.-L. I, S. Han, Z. Xu, S. Wang, Q. Sun and Y. Chen, "New paradigm of 5G wireless Internet," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 3, pp. 474-482, Mar. 2016.
- [378] S. Bi, R. Zhang, Z. Ding and S. Cui, "Wireless communications in the era of big data," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 10, pp. 190-199, Oct. 2015.
- [379] K. Zheng, Z. Yang, K. Zhang, P. Chatzimisios, K. Yang and W. Xiang, "Big data-driven optimization for mobile networks toward 5G," *IEEE Netw.*, vol. 30, no. 1, pp. 44-51, Jan. 2016.
- [380] K. Chen, S. Huang, L. Zheng and H. V. Poor, "Communication theoretic data analytics," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 4, pp. 663-675, Apr. 2015.
- [381] C.-L. I, Q. Sun, Z. Liu, S. Zhang and S. Han, "The big-data-driven intelligent wireless network: Architecture, use cases, solutions, and future trends," *IEEE Veh. Tech. Mag.*, vol. 12, no. 4, pp. 20-29, Dec. 2017.
- [382] J. Liu, F. Liu, and N. Ansari, "Monitoring and analyzing big traffic data of a large-scale cellular network with Hadoop," *IEEE Netw.*, vol. 28, no. 4, pp. 32-39, July-Aug. 2014.
- [383] Y. He, F. R. Yu, N. Zhao, H. Yin, H. Yao, and R. C. Qiu, "Big data analytics in mobile cellular networks," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1985-1996, Mar. 2016.
- [384] C.-L. I, Y. Liu, S. Han, S. Wang, and G. Liu, "On big data analytics for greener and softer RAN," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 3068-3075, Aug. 2015.
- [385] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Study of enablers for network automation for 5G. TR 23.791. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.791
- [386] T. O'Shea and J. Hoydis, "An introduction to deep learning for the physical layer," *IEEE Trans. Cog. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, pp. 563-575, Dec. 2017.
- [387] S. Dörner, S. Cammerer, J. Hoydis, and S. t. Brink, "Deep learning based communication over the air," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 12, no. 1, pp. 132-143, Feb. 2018.
- [388] C.-L. I et al., "Artificial intelligence enabled air interface for 6G: Solutions, challenges, and standardization impact," *IEEE Commun. Mag.*, 2020, in press.
- [389] L. Sun and Q. Du, "Physical layer security with its applications in 5G networks: A review," *China Commun.*, vol. 14, no. 12, pp. 1-14, Dec. 2017.
- [390] Y. Wu, A. Khisti, C. Xiao, G. Caire, K. Wong, and X. Gao, "A survey of physical layer security techniques for 5G wireless networks and challenges ahead," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 4, pp. 679-695, Apr. 2018.
- [391] G.-L. Long and X.-S. Liu, "Theoretically efficient high-capacity quantum-key-distribution scheme," *Physical Review A*, vol. 65, 2002.
- [392] D. Pan et al., "Quantum-memory-free two-step quantum secure direct communication relying on Einstein-Podolsky-Rosen pairs," *IEEE Access*, 2020, submitted for publication.

- [393] N. Hosseinidehaj, Z. Babar, R. Malaney, S. X. Ng, and L. Hanzo, "Satellite-based continuous-variable quantum communications: State-of-the-art and a predictive outlook," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 881-919, First Quarter 2019.
- [394] I. Ahmad, T. Kumar, M. Liyanage, J. Okwuibe, M. Ylianttila, and A. Gurtov, "Overview of 5G security challenges and solutions," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 36-43, Mar. 2018.
- [395] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Group services and system aspects; 3GPP system
architecture evolution (SAE). TS 33.401.https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/33_series/33.401
- [396] IEEE Standards Association. P1912 Standard for Privacy and Security Architecture for Consumer Wireless Devices. 2015. https://standards.ieee.org/project/1912.html
- [397] CYBER. Attribute based encryption for attribute based access control. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsits/103500103599/103532/01.01.0160/ts103532v010101p.pdf, 2018.
- [398] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Security architecture and procedures for 5G system. TS 33.501. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/33_series/33.501.
- [399] https://blog.csdn.net/feibabeibei beibei/article/details/102766347
- [400] 中国网络安全现状研究报告,清华大学经济管理学院互联网发展与治理研究中心, 2018. <u>https://anquan.baidu.com/upload/ue/_le/20180903/1535953023531343.pdf</u>
- [401] I. Ahmad, S. Shahabuddin, T. Kumar, J. Okwuibe, A. Gurtov, and M. Ylianttila, "Security for 5G and beyond," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3682-3722, Fourth Quarter 2019.
- [402] J. Ni, X. Lin, and X. S. Shen, "Efficient and secure service-oriented authentication supporting network slicing for 5G-enabled IoT," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 3, pp. 644-657, Mar. 2018.
- [403] N.-H. Mahmood, H. Alves, O. A. López, M. Shehab, D. P. M. Osorio, and M. Latva-aho, "Six key enablers for machine type communication in 6G," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1903.05406.pdf</u>
- [404] C.-E. Shannon, "Communication theory of secrecy systems," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 28, pp. 656-715, 1949.
- [405] A. D. Wyner, "The wire-tap channel," Bell Syst. Tech. J., vol. 54, pp. 1355-1387, 1975.
- [406] F. Tariq, M. Khandaker, K.-K. Wong, M. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1902.06700.pdf</u>
- [407] M. Niemiec and A. R. Pach, "Management of security in quantum cryptography," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 8, pp. 36-41, Aug. 2013.
- [408] K. Inoue, "Quantum key distribution technologies," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 888-896, July 2006.
- [409] S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzzaman, "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46317-46350, Apr. 2019.
- [410] V. Sharma and S. Banerjee, "Analysis of quantum key distribution based satellite communication," in *Proc. ICCCNT'18*, Bangalore, India, July 2018, pp. 1-5.

- [411] S. Tarantino, D. Cozzolino, K. Rottwitt and D. Bacco, "Feasibility of quantum communications in aquatic scenario," in *Proc. IEEE IPC'18*, Reston, VA, USA, Sept.-Oct. 2018, pp. 1-2.
- [412] E. Yaacoub and M. S. Alouini, "A key 6G challenge and opportunity-connecting the remaining 4 billions: A survey on rural connectivity," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1906.11541.pdf</u>
- [413] A. Dorri, S. S. Kanhere, and R. Jurdak, "Blockchain in Internet of things: Challenges and solutions," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/1608.05187.pdf</u>
- [414] Y. Zhang, R. Deng, E. Bertino, and D. Zheng, "Robust and universal seamless handover authentication in 5G HetNets," *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, 2020, in press.
- [415] Y. Sun, L. Zhang, G. Feng, B. Yang, B. Cao, and M. A. Imran, "Blockchain-enabled wireless internet of things: Performance analysis and optimal communication node deployment," *IEEE Int. Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5791-5802, June 2019.
- [416] A. Fitwi, Y. Chen, and S. Zhu, "A lightweight blockchain-based privacy protection for smart surveillance at the edge," in *Proc. IEEE Blockchain'19*, Atlanta, GA, USA, July 2019, pp. 552-555.
- [417] Y. Li, W. Susilo, G. Yang, Y. Yu, X. Du, D. Liu, and N. Guizani, "Toward privacy and regulation in blockchain-based cryptocurrencies," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 5, pp. 111-117, Sept.-Oct. 2019.
- [418] X. Wang, X. Li and V. C. M. Leung, "Artificial intelligence-based techniques for emerging heterogeneous network: State of the arts, opportunities, and challenges," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1379-1391, Aug. 2015.
- [419] F. Tang, Y. Kawamoto, N. Kato and J. Liu, "Future intelligent and secure vehicular network toward 6G: Machine-learning approaches," *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 2, pp. 292-307, Feb. 2020.
- [420] R. Alhajri, R. Zagrouba, and F. Al-Haidari, "Survey for anomaly detection of IoT botnets using machine learning auto-encoders," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 14, no. 10, pp. 2417-2421, 2019.
- [421] M. Shakiba-Herfeh, A. Chorti, and H. V. Poor, "Physical layer security: Authentication, integrity and confidentiality," [Online]. Available: <u>https://arxiv.org/pdf/2001.07153.pdf</u>