

6G 无线系统的愿景:应用、趋势、技术和开放研究问题

Walid Saad、Mehdi Bennis 和陈明哲

抽象的

与最初作为万物互联应用推动者的前提相比,5G 蜂窝系统的持续部署不断暴露出该系统的固有限制性。这些 5G 缺点正在刺激全球范围内的活动,这些活动专注于定义下一代 6G 无线系统,该系统可以真正集成从自治系统到扩展现实的广泛应用。尽管最近有 6G 倡议(一个例子是芬兰的 6Genesis 项目),但 6G 的基本架构和性能组件在很大程度上仍未定义。在本文中,我们提出了一个整体的、前瞻性的愿景,它定义了 6G 系统的原则。我们认为,6G 将不仅仅是在高频段探索更多频谱,而是将由令人兴奋的底层服务驱动的即将到来的技术趋势的融合。在这方面,我们首先从应用和伴随的技术趋势方面确定 6G 系统的主要驱动力。然后,我们提出了一组新的服务类并公开了它们的目标 6G 性能要求。然后,我们确定引入的 6G 服务的支持技术,并概述利用这些技术的综合研究议程。最后,我们为 6G 路线图提供了具体建议。最终,本文的目的是作为激励更多关于 6G 的开箱即用研究的基础。

介绍

迄今为止,无线网络演进主要是由对更高速率的需求驱动的,这要求网络容量持续增加 1000 倍。虽然这种对无线容量的需求将继续增长,但连接数百万人和数十亿台机器的万物互联 (IoE) 系统的出现,正在从以速率为中心的增强型移动宽带 (eMBB) 产生根本性的范式转变。) 向超可靠、低延迟通信 (URLLC) 提供过去几年的服务。

尽管第五代 (5G) 蜂窝系统被宣传为关键的 IoE 推动者,但通过协调一致的 5G 标准化工作,促成了第一个 5G 新无线电 (5G NR) 里程碑和随后的 3GPP 版本,5G 的初始前提 作为真正的万物互联服务的载体 尚未成为

实现。可以说,5G 的演进部分 (即支持对速率要求很高的 eMBB 服务) 已经获得了显著的动力。然而,5G 承诺的革命性前景,一个几乎完全以高频毫米波 (mmWave) 频率运行并支持异构 IoE 服务的系统,迄今为止仍然是海市蜃楼。尽管目前正在销售的 5G 系统将很容易支持基本的 IoE 和 URLLC 服务 (例如,工厂自动化),但它们能否提供未来的智慧城市 IoE 应用仍存在争议。此外,尽管 5G 最终将支持毫米波频率的固定接入,但早期的 5G 部署更有可能仍使用 6 GHz 以下来支持移动性。

与此同时,新的万物互联服务正在以前所未有的速度激增。示例包括扩展现实 (XR) 服务 (包括增强现实、混合现实和虚拟现实 (AR/

MR/VR)) 到远程医疗、触觉、飞行器、脑机接口和连接的自主系统。这些应用程序将破坏支持短包、基于传感的 URLLC 服务的最初 5G 目标。为了成功运行 XR 和连接的自治系统等 IoE 服务,无线系统必须同时为异构设备跨上行链路和下行链路提供高可靠性、低延迟和高数据速率。新兴的万物互联服务还需要对通信、控制和计算功能进行端到端的协同设计,而这在很大程度上被忽视了。

为了迎合这种新型服务,必须解决独特的挑战,从表征控制其性能的基本速率-可靠性-延迟权衡到利用低于 6 GHz 的频率,以及将无线系统转变为自我维持的智能网络结构,可灵活地提供和编排为必要的 IoE 场景量身定制的通信-计算-控制-定位-传感资源。

为了克服这些挑战,需要一个颠覆性的第六代 (6G) 无线系统,其设计本质上是针对 IoE 应用的性能要求及其伴随的技术趋势量身定制的。6G 的驱动力将是过去趋势 (例如,致密化、更高速率和大型天线) 和新兴趋势 (包括新服务和最近的互联网革命) 的融合。



图 1. 6G 愿景:应用、趋势和技术。

无线设备（例如，智能可穿戴设备、植入物、XR 设备等）、人工智能 (AI) [1]、计算和传感。

本文的主要贡献是对 6G 系统（图 1）的大胆、前瞻性愿景，确定了将推动 6G 革命的应用、趋势和颠覆性技术。

然后，这一愿景将描绘新的 6G 服务，并提供具体的研究路线图和建议，以促进从当前的 5G 系统向 6G 的飞跃。

6G 驾驶应用， 指标和新的服务类别

每一代新的蜂窝网络都是由创新应用驱动的。6G 也不例外：激动人心的新应用和技术趋势空前涌现，将塑造其性能目标，同时从根本上重新定义标准 5G 服务，6G 也不例外。接下来，我们介绍推动 6G 部署的主要应用，然后讨论随之而来的技术趋势、目标性能指标和新的服务需求。

驱动 6G 背后的应用程序及其要求

虽然直播多媒体流等传统应用仍将是 6G 的核心，但系统性能的关键决定因素将是四个新的应用领域。

多感官 XR 应用：XR 将为整个 AR/6G 带来许多杀手级应用 MR/VR 频谱。即将到来的 5G 系统仍然无法提供完整的沉浸式 XR 体验，因为它们无法为数据提供非常低的延迟

速率密集型 XR 应用。真正身临其境的 AR/MR/VR 体验需要一个联合设计，不仅集成了工程（无线、计算、存储）要求，还集成了源自人类感官、认知和生理的感知要求。最小和最大的感知要求和限制必须考虑到工程过程（计算、处理等）中。为此，需要一个新的物理体验质量 (QoPE) 度量概念，将人类用户本身的物理因素与经典 QoS（例如延迟和速率）和 QoE（例如平均意见得分）合并输入。影响 QoPE 的一些因素包括大脑认知、身体生理和手势。

例如，在 [2] 中，我们已经表明，在 URLLC 机制内，人脑可能无法区分不同的延迟测量。同时，在 [3] 中，我们表明视觉和触觉感知是最大化资源利用率的关键。简而言之，XR 服务的要求是传统 URLLC 和 eMBB 的混合，并结合了 6G 必须支持的感知因素。

互联机器人和自主系统 (CRAS)：6G 系统背后的主要驱动力是即将部署的 CRAS，包括无人机交付系统、自动驾驶汽车、自主无人机群、车辆排和自主机器人技术。在蜂窝域上引入 CRAS 并不是“又一个短数据包上行链路 IoT 服务”的简单案例。相反，CRAS 要求控制系统驱动的延迟要求以及对高清 (HD) 地图的 eMBB 传输的潜在需求。

QoPE 的概念再次适用于 CRAS；然而，物理环境现在是一个骗局

XR 将在 AR/MR/VR 领域产生许多 6G 的杀手级应用。由于无法为数据速率密集型 XR 应用提供非常低的延迟,即将推出的 5G 系统仍无法提供捕捉所有感官输入的完整沉浸式 XR 体验。真正身临其境的 AR/MR/VR 体验需要一个联合设计,不仅集成了工程要求,还集成了源自人类感官、认知和生理的感知要求。

控制系统,可能会增加人工智能。CRAS 可能是一个主要用例,需要在速率-可靠性-延迟范围内提出严格的要求,而这种平衡在 5G 中尚不可用。

无线脑机交互 (BCI):除了 XR,必须为人类用户量身定制无线系统,以支持直接 BCI 的服务。传统上,BCI 应用仅限于医疗保健场景,在这些场景中,人类可以使用大脑植入物控制假肢或邻近的计算设备。然而,最近无线脑机接口和植入物的出现将彻底改变这一领域,并引入需要 6G 连接的新用例场景。这些场景的范围从启用大脑控制的电影输入到成熟的多大脑控制的电影 [4]。使用无线 BCI 技术而不是智能手机,人们将使用离散设备与他们的环境和其他人进行交互,这些设备有些是穿戴式的,有些是植入式的,有些是嵌入在他们周围的世界中的。这将允许个人通过手势控制他们的环境,并通过触觉信息与亲人交流。这种移情和触觉通信,加上情感计算等相关思想,其中情感驱动的设备可以将其功能与用户的情绪相匹配,构成重要的 ant 6G 用例。与 5G 提供的相比,无线 BCI 服务需要完全不同的性能指标。与 XR 类似,无线 BCI 业务需要高速率、超低时延和高可靠性。然而,它们比 XR 对物理感知更敏感,并且需要 QoPE 保证。

区块链和分布式账本技术 (DLT):区块链和 DLT 将成为最具颠覆性的 IoE 技术之一。区块链和 DLT 应用程序可以被视为下一代分布式传感服务,其连接需求将需要 URLLC 和大规模机器类型通信 (mMTC) 的协同组合,以保证低延迟、可靠的连接和可扩展性。

6G:推动趋势和性能指标

上述应用导致了新的系统范围的趋势,这些趋势将为 6G 设定目标。

趋势 1 更多比特、更多频谱、更高可靠性: 6G 的大多数驱动应用都需要比 5G 更高的比特率。为了迎合 XR 和 BCI 等应用,6G 必须将数据速率再提高 1000 倍,从而实现大约 1 太比特/秒的目标。这激发了对更多频谱资源的需求,从而促使进一步探索低于 6 GHz 的频率。同时,对更高可靠性的需求将在大多数 6G 应用中普遍存在,并且在高频下将更具挑战性。

趋势 2 从面积到体积光谱和能源效率: 6G 必须处理地面和空中用户,包括智能手机和 XR/BCI 设备以及飞行器。6G 的这种 3D 特性需要向体积而不是空间 (区域)带宽定义演进。我们设想 6G 系统必须提供以 bps/Hz/m³/Joules 为单位的高频谱和能源效率 (SEE) 要求。这是从 2G (bps) 到 3G (bps/Hz),然后是 4G (bps/Hz/m²)到 5G (bps/Hz/

平方米/焦耳)。

趋势 3 智能表面和环境的出现:当前和过去的蜂窝系统使用基站 (不同大小和形式)进行传输。我们正在目睹电磁活性表面 (例如,使用超材料)的革命,其中包括人造结构,如墙壁、道路,甚至整个建筑物,伯克利电子壁纸项目 (<https://bwrc.eecs.berkeley>) 就是一个例子。教育/项目/5605/

电子壁纸)。使用这种智能大型智能表面和无线通信环境将推动 6G 架构的演进。

趋势 4 小数据的海量可用性:数据革命将在不久的将来继续,从集中的大数据转向海量、分布式的“小”数据。6G 系统必须在其基础设施中利用大小数据集来增强网络功能并提供新服务。这种趋势激发了超越经典大数据分析的新机器学习技术。

趋势 5 从自组织网络 (SON) 到自维持网络:由于缺乏现实世界的需求,SON 几乎没有集成到 4G/5G 网络中。然而,CRAS 和 DLT 技术激发了对智能 SON 管理网络运营、资源和优化的迫切需求。6G 将需要从经典 SON 的范式转变,即网络仅调整其功能以适应特定的环境状态,转变为可在高度动态下永久保持其关键性能指标 (KPI) 的自我维持网络 (SSN)复杂的环境源于丰富的 6G 应用领域。SSN 必须不仅能够调整其功能,而且还能够维持其资源使用和管理 (例如,通过收集能量和利用频谱)以自主维持高、长期的 KPI。SSN 功能必须利用 AI 技术的最新革命来创建 AI 驱动的 6G SSN。

趋势 6 通信、计算、控制、定位和传感 (3CLS)的融合:过去五代蜂窝系统具有一个专有功能:无线通信。然而,6G 将通过融合 (即联合和同时提供)包括通信、计算 [5]、控制、定位和传感在内的各种功能来打破这一前提。我们将 6G 设想为一个多用途系统,可以提供多种 3CLS 服务,这些服务对于 XR、CRAS 和 DLT 等具有跟踪、控制、定位和计算功能的应用程序来说特别有吸引力,甚至是必要的。此外,传感服务将使 6G 系统能够提供

	5G	超越5G	6G
应用类型	<ul style="list-style-type: none">· eMBB· URLLC· mMTC	<ul style="list-style-type: none">· 可靠的eMBB· URLLC · mMTC·混合 (URLLC + eMBB)	新应用： <ul style="list-style-type: none">· MBRLC· mURLLC · HCS· MPS
设备类型	<ul style="list-style-type: none">· 智能手机· 传感器· 无人机	<ul style="list-style-type: none">· 智能手机· 传感器· 无人机· XR 设备	<ul style="list-style-type: none">· 传感器和DLT 设备· CRAS · XR 和BCI 设备· 智能植入物。
光谱和能源效率增益1 关于今天的网络	10x in bps/Hz/m2/Joules	100x 以bps/Hz/m2/焦耳为单位	1000x in bps/Hz/m3/Joules (体积)
费率要求	1 Gb/秒	100 Gb/秒	1 TB/秒
端到端延迟要求	5 毫秒	1 毫秒	< 1 毫秒
仅无线电延迟要求	100 纳秒	100 纳秒	10 纳秒
处理延迟	100 纳秒	50 纳秒	10 纳秒
端到端可靠性要求	99.999%	99.9999%	99.99999%
频段	<ul style="list-style-type: none">· 低于 6 GHz· 用于固定接入的毫米波。	<ul style="list-style-type: none">· 低于 6 GHz· 用于固定接入的毫米波	<ul style="list-style-type: none">· 低于 6 GHz· 用于移动接入的毫米波· 探索更高频率和太赫兹频段 (300 GHz 以上)· 非射频 (例如,光学,VLC 等)
建筑学	<ul style="list-style-type: none">· 密集的 6 GHz 以下小型基站,带有伞式宏基站。· 大约100 m 的毫米波小型蜂窝 (用于固定接入)。	<ul style="list-style-type: none">· 具有伞状宏基站的更密集的 6 GHz 以下小型蜂窝· < 100 m 的微小且密集的毫米波蜂窝	<ul style="list-style-type: none">· 由毫米波微型蜂窝支持的高频无蜂窝智能表面,可用于移动和固定访问。· 无人机基地服务的临时热点· 站或系留气球· 微型太赫兹细胞的试验。
1在这里,频谱和能源效率增益由面积频谱和能源效率的概念捕获。			

表 1. 5G 与 Beyond 5G 与 6G 的要求。

具有无线电环境 3D 映射的用户跨越不同的频率。因此,6G 系统必须紧密集成和管理 3CLS 功能。请注意,与先前趋势相关的演变将逐渐使 6G 系统能够轻松提供 3CLS。

趋势 7 智能手机时代的终结:智能手机是 4G 和 5G 的核心。然而,近年来可穿戴设备的数量有所增加,其功能正在逐渐取代智能手机的功能。XR 和 BCI 等应用进一步推动了这一趋势。与这些应用相关的设备范围从智能可穿戴设备到集成耳机和智能身体植入物,它们可以从人类感官中获取直接的感官输入,从而终结智能手机并可能推动大多数 6G 用例。

如表 1 所示,这些趋势共同提出了新的性能目标和要求,这些目标和要求将在两个阶段得到满足:超越 5G 的演进和革命性的 6G 步骤。

新的6G服务等级

除了施加新的性能指标外,新的技术趋势还将通过改造经典的 URLLC,eMBB 和 mMTC 并引入新服务来重新定义 5G 应用类型 (总结在表 2 中):

移动宽带可靠低延迟沟通:从上面可以看出,dis

eMBB 和 URLLC 之间的过渡将不再持续支持 XR、无线 BCI 或 CRAS 等应用,因为这些应用不仅需要高可靠性和低延迟,还需要高 5G-eMBB 级别的数据速率。

因此,我们提出了一种称为移动宽带可靠低延迟通信 (MBRLC) 的新服务类别,它允许 6G 系统在速率可靠性延迟空间内提供任何所需的性能。如图 2 所示,MBRLC 泛化了经典的 URLLC 和 eMBB 服务。

能源效率是 MBRLC 的核心,不仅因为它对可靠性和速率的影响,还因为 6G 设备的资源有限性质。

大规模 URLLC: 5G URLLC 意味着满足非常特定的上行链路 IoE 应用程序的可靠性和延迟,例如智能工厂,之前的工作 [6] 提供了所需的基础。

然而,6G 必须在整个设备维度上扩展经典 URLLC,从而导致新的大规模 URLLC (mURLLC) 服务将 5G URLLC 与传统 mMTC 合并。mURLLC 带来了可靠性-延迟-可扩展性权衡,它要求与基于平均值的网络设计 (例如,平均吞吐量/延迟)有很大不同。

相反,需要一个原则性和可扩展的框架来考虑延迟、可靠性、数据包大小、架构、拓扑 (跨接入、边缘和核心)和不确定性下的决策[7]。

服务	性能指标	示例应用
MBRLLC	<ul style="list-style-type: none">· 严格的速率-可靠性-延迟要求· 能源效率 · 移动环境中的速率-可靠性-延迟	<ul style="list-style-type: none">· XR/AR/VR · 自动驾驶汽车系统 · 自动驾驶无人机 · 传统eMBB 和 URLLC
mURLLC	<ul style="list-style-type: none">· 超高可靠性 · 大连接 · 高可靠性 · 可扩展的 URLLC	<ul style="list-style-type: none">· 经典物联网 · 用户跟踪 · 区块链和分布式账本技术 · 大规模传感 · 自主机器人
HCS	<ul style="list-style-type: none">· QoPE 捕获原始无线指标以及人为和物理因素	<ul style="list-style-type: none">· BC · 触觉 · 移情沟通 · 情感沟通
MPS	<ul style="list-style-type: none">· 控制稳定性 · 计算延迟 · 定位精度 · 传感和映射精度 · 通信延迟和可靠性 · 能源	<ul style="list-style-type: none">· CRAS · 远程医疗 · 环境测绘和成像 · XR 服务的一些特殊情况

表 2. 6G 服务类别、其性能指标和示例应用的总结。

以人为中心的服务 :我们提出了一种新的 6G 服务类别,称为以人为中心的服务 (HCS),它需要 QoPE 目标 (与其人类用户紧密耦合,如上所述),而不是原始的速率-可靠性-延迟指标。无线 BCI 是 HCS 的主要示例,其中网络性能由人类用户的生理机能及其行为决定。

对于此类服务,必须定义一套全新的 QoPE 指标并将其作为原始 QoS 和 QoE 指标的函数提供。

多用途 3CLS 和能源服务 : 6G 系统必须共同提供 3CLS 服务及其衍生服务。它们还可以通过无线能量传输为小型设备提供能量。这种多用途的 3CLS 和能源服务 (MPS) 对于 CRAS 等应用尤其重要。MPS 需要联合上行链路-下行链路设计,并且必须满足控制 (例如,稳定性)、计算 (例如,计算延迟)、能量 (例如,要传输的目标能量)、定位 (例如,定位精度)和定位的目标性能。传感和映射功能 (例如,映射的无线电环境的准确性)。

6G :使能技术

为了启用上述服务并保证其性能,必须将一系列新的颠覆性技术集成到 6G 中。

6G 以上的 6GHz 从小型蜂窝到微型蜂窝 :根据趋势 1 和 2,6G 对更高数据速率和随时随地 SEE 的需求促使人们探索低于 6GHz 的更高频段。作为第一步,这包括进一步开发毫米波技术,以使移动毫米波在早期 6G 系统中成为现实。随着 6G 的发展,在太赫兹 (THz) 频段利用毫米波以外的频率将变得必要 [8]。为了利用更高的毫米波和太赫兹频率,6G 蜂窝的大小必须从小蜂窝缩小到“小蜂窝”

其半径只有几十米。这激发了新的架构设计,这些设计需要更密集地部署微型小区和新的射频移动管理技术。

具有集成频段的收发器 :密集的高频微小蜂窝本身可能无法提供移动 6G 服务所需的无缝连接。相反,需要一个能够利用微波/毫米波/太赫兹频谱中的多个频率 (例如,使用多模基站)的集成系统,以在广域和局域级别提供无缝连接。

与大型智能表面的通信 :由于需要更好的 SEE、更高的数据速率和更高的频率,Massive MIMO 将成为 5G 和 6G 不可或缺的一部分 (趋势 1)。然而,对于 6G 系统,根据趋势 3,我们设想从传统大规模 MIMO 向大型智能表面 (LIS) 和智能环境 [9] 的初步飞跃,可为无线通信和异构设备提供大规模表面 (趋势 7)。LIS 支持创新的通信方式,例如使用全息射频 (RF) 和全息 MIMO。

边缘人工智能 :由于最近在深度学习方面的突破、可用数据的增加 (趋势 4)和智能设备的兴起 (趋势 7),无线社区 [1] 对人工智能产生了前所未有的兴趣。即将到来的 6G 用例 (尤其是强化学习)围绕着创建 SSN (趋势 5),可以自主维持高 KPI 并管理资源、功能和网络控制。人工智能还将使 6G 能够自动向其用户提供 MPS,并发送和创建 3D 无线电环境地图 (趋势 6)。这些短期的支持人工智能的 6G 功能将得到所谓的“集体网络智能”的补充,其中网络智能被推到边缘,在边缘设备上运行人工智能和学习算法 (趋势 7)以提供分布式自治。这一新的边缘 AI 飞跃将创建一个 6G 系统,可以集成上述服务,实现 3CLS,并有可能取代经典的帧结构。

集成地面、机载和卫星网络 :除了作为 6G 用户不可避免的作用之外,无人机还可以通过提供与热点和基础设施稀缺地区的连接来补充地面网络。

同时,无人机和地面基站都可能与低轨道卫星 (LEO) 和 CubeSat 的卫星连接,以提供回程支持和额外的广域覆盖。将地面、机载和卫星网络 [10] 和 [11] 集成到单个无线系统中对于 6G 至关重要。

能量转移和收集 : 6G 可能是可以提供能量的蜂窝系统,以及 3CLS (趋势 6)。随着无线能量传输日趋成熟,我们预计 6G 基站将为设备提供基本的电力传输,尤其是植入物和传感器 (趋势 7)。附加的以能量为中心的想法,例如能量收集和反向散射,也将成为 6G 的组成部分。

超越 6G :少数技术将与 6G 同时成熟,因此可能在 6G 标准化和研究进程的尾声中发挥作用。一个突出的例子是量子计算和

可以提供安全和远程网络的通信。目前,主要研究工作集中在量子领域,我们预计它们将与 6G 相交。

6G 以外的其他类似技术包括射频和非射频链路的集成 (包括光学、神经、分子和其他通道)。

6G:研究议程和未解决的问题

基于上述确定的趋势和使能技术,我们现在提出了 6G 的研究议程 (表 3)。

3D 速率-可靠性-延迟基础:需要 6G 系统在速率-可靠性-延迟权衡和 SEE 方面的基本 3D 性能。此类分析必须量化 6G 所需的频谱、能量和通信要求,以支持已确定的驾驶应用。最近在 [7] 和 [12] 中的工作提供了朝这个方向迈出的第一步。

探索集成的异构高频频段:在 6G 中利用毫米波和太赫兹带来了几个新的开放问题。对于毫米波,在毫米波频率下支持高移动性将是一个核心问题。对于太赫兹,需要新的收发器架构和传播模型[8]。高功率、高灵敏度和低噪声系数是克服非常高的太赫兹路径损耗所需的关键收发器特性。一旦充分理解了这些物理层方面,就需要开发新的网络和链路层协议,以优化跨频资源的使用,同时考虑到毫米波和太赫兹环境的高度变化和不确定性。

另一个重要的方向是研究太赫兹、毫米波和微波单元在所有层的共存,建立在早期工作如 [13] 的基础上。

3D 网络:由于地面和空中网络的整合,如上所述,6G 必须支持 3D 空间中的通信,包括以 3D 服务用户和部署 3D 基站 (例如,系留气球或临时无人机)。这需要在各个方面进行协同研究。首先,需要对 3D 传播环境进行测量和 (数据驱动)建模。其次,必须开发新的 3D 频率和网络规划方法 (例如,在哪里部署基站、系留气球,甚至无人机基站)。我们在 [10] 中的工作表明,由于新的高度维度和相关的自由度,这种 3D 规划与传统的 2D 网络有很大不同。最后,需要针对 3D 中的移动性管理、路由和资源管理进行新的网络优化。

与 LIS 的通信:根据趋势 3,6G 将通过智能 LIS 环境提供无线连接,包括有源频率选择表面、金属无源反射器、无源 /

主动反射阵列,以及不可重构和可重构的超表面。这里的开放问题范围从无源反射器和超表面的优化部署到 LIS 的 AI 驱动操作。需要在 [9] 中的早期工作的基础上进行基础分析,以了解智能表面的性能,包括速率、延迟、可靠性和覆盖时间。

另一个重要方向是调查

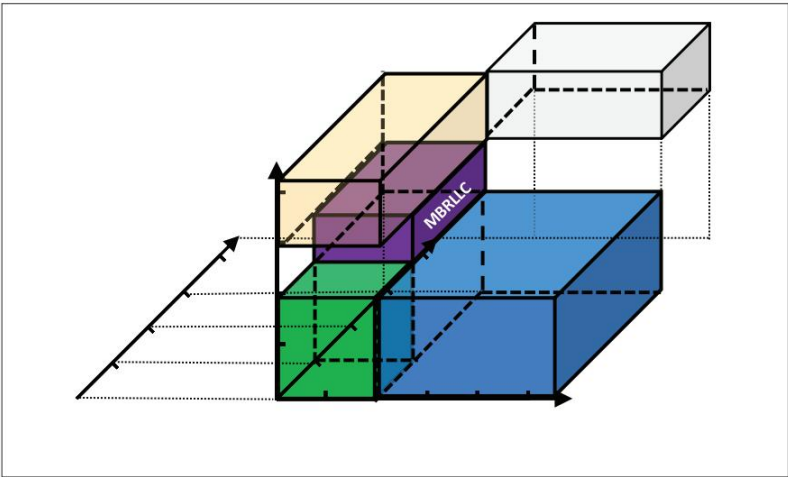


图 2.速率-可靠性-延迟空间内的 MBRLLC 服务和几种特殊情况 (包括经典 eMBB 和 URLLC)。其他未显示的相关指标包括能源和网络规模。

使用基于 LIS 的反射表面来增强微小单元的范围和覆盖范围以及动态修改传播环境的潜力。

AI for Wireless: AI为6G提出了许多主要研究方向。除了需要海量、小型数据分析以及使用机器学习 (ML) 和基于 AI 的 SSN (使用强化学习和博弈论实现) 之外,还需要在 6G 上可靠地运行 ML 算法以提供前面列出的应用程序。为了执行这些关键的应用程序任务,需要低延迟、高可靠性和可扩展的 AI,以及可靠的基础架构 [1] 和 [3]。这种 ML 和无线网络的联合设计是 6G 的关键研究领域。

QoPE 指标:QoPE 指标的设计整合了来自人体生理学 (用于 HCS 服务)或来自控制系统 (用于 CRAS) 的物理因素,是一个重要的 6G 研究领域,特别是考虑到新出现的设备 (趋势 7)。这既需要真实世界的心理物理实验,也需要结合 QoS、QoE 和人类感知的 QoPE 新的、严格的数学表达式。QoPE 的理论发展可以使用来自其他学科的技术来实现,例如运筹学 (例如,多属性效用理论 (参见 [14]))和机器学习 (参见 [2])。6G 将是第一代能够利用多种人类认知感官的新型应用程序 (无线 BCI)。

联合通信和控制: 6G需要普遍支持CRAS。CRAS 的性能由实际控制系统控制,其操作需要从无线 6G 链路输入数据。因此,在 6G 系统上运行 CRAS 需要通信和控制协同设计,从而优化 6G 无线链路的性能以满足控制系统的稳定性,反之亦然。由于传统的以无线电为中心的焦点 (3GPP 和 IEEE 论坛),这种协同设计在 5G 中被忽视了。同时,网络控制的先前工作抽象了无线网络的细节,不能应用于蜂窝通信。这使得通信-控制协同设计成为 6G 的重点研究课题。

研究领域	挑战	未解决的问题
3D 速率-可靠性-延迟基础	<ul style="list-style-type: none">基本通信限制6G 系统的 3D 特性	<ul style="list-style-type: none">速率-可靠性-延迟区域的 3D 性能分析可实现的速率-可靠性-延迟目标的表征3D SEE 表征表征速率-可靠性-延迟目标的能量和频谱需求
探索集成的异构高频段	<ul style="list-style-type: none">高移动性系统中的操作挑战易受阻塞短距离缺乏传播模型需要高保真硬件频段共存	<ul style="list-style-type: none">毫米波和太赫兹系统的有效移动管理跨频带物理、链路和网络层优化覆盖和范围改进毫米波和太赫兹微型蜂窝设计太赫兹新高保真硬件设计跨毫米波和太赫兹频段的传播测量和建模
3D网络	<ul style="list-style-type: none">用户和基站以 3D 形式呈现高机动性	<ul style="list-style-type: none">3D 传播建模3D 性能指标3D 移动性管理和网络优化。
与 LIS 的通信	<ul style="list-style-type: none">LIS 表面的复杂性缺乏现有的性能模型缺乏传播模型6G 设备和服务的异构性LIS 提供不同功能的能力（反射器、基站等）	<ul style="list-style-type: none">LIS 表面的最佳部署和位置LIS 反射器与 LIS 基站用于能量传输的 LIS支持 AI 的 LIS跨 6G 服务的 LISLIS 发射器和反射器的基本性能分析频率
无线人工智能	<ul style="list-style-type: none">低复杂度人工智能解决方案设计海量、小数据	<ul style="list-style-type: none">SON 的强化学习大小数据分析人工智能驱动的网络管理无线系统上的边缘人工智能
新的 QoPE 指标	<ul style="list-style-type: none">将原始指标与人类感知相结合人类感知和生理学的准确建模	<ul style="list-style-type: none">QoPE 指标的理论发展实证 QoPE 表征真实的心理物理学实验定义现实的 QoPE 目标和测量
联合沟通与控制	<ul style="list-style-type: none">控制和通信指标的集成处理动态和多个时间尺度	<ul style="list-style-type: none">通信和控制系统协同设计支持控制的无线指标支持无线的控制指标CRAS 联合优化
3CLS	<ul style="list-style-type: none">集成多种功能缺乏现有模型	<ul style="list-style-type: none">3CLS 指标设计联合 3CLS 优化支持 AI 的 3CL节能 3CLS
6G协议设计	<ul style="list-style-type: none">6G 协议必须在 3D 空间和跨不同的传播环境存在具有不同功能和移动模式的异构设备需要能够学习和适应环境的协议环境	<ul style="list-style-type: none">不需要预先确定的刚性帧结构的调度、协调和信令协议的设计自适应多址协议的开发可以应对的主动和动态切换机制的设计3D 空间中的不同移动模式引入针对 6G 量身定制的新身份验证和识别协议设备设计用于执行多个 6G 的分布式、边缘 AI 启发协议功能
射频和非射频链路一体化	<ul style="list-style-type: none">射频/非射频接口的不同物理性质	<ul style="list-style-type: none">联合射频/非射频硬件设计联合射频/非射频系统的系统级分析将射频/非射频系统用于各种 6G 服务
全息收音机	<ul style="list-style-type: none">缺乏现有模型硬件和物理层挑战	<ul style="list-style-type: none">使用 LIS 设计全息 MIMO全息射频性能分析全息无线电上的 3CLS全息无线网络优化

表 3.研究领域总结。

3CLS:联合通信和控制的思想必须扩展到整个3CLS功能的联合设计。计算、通信、控制、定位、传感、能源和映射之间的相互依赖关系尚未以端到端的方式得到充分探索。

关键问题包括如何共同满足所有 3CLS 服务的性能,以及用于重建 3D 图像的多模态传感器融合以及在未知环境中导航以用于导航机器人、自动驾驶等。包括 CRAS、XR 和 DLT 在内的各种应用都需要 3CLS。

6G 协议设计:由于之前讨论的所有趋势及其挑战,与 5G 相比,6G 将需要全新的协议设计。例如,6G 必须引入新的 AI 驱动的信令、调度和协调协议,以取代依赖预先确定的网络参数和刚性框架结构的传统 5G 协议。相比之下,这些新的 6G 协议将不断适应无线环境的当前和预计状态。随着 6G 的发展,将需要新的动态多址 [15] 协议,该协议可以根据应用程序和网络的需要动态更改所使用的多址类型 (正交或非正交、随机或调度) 状态。此外,必须设计新的切换协议来考虑 6G 系统的 3D 特性以及不同类型移动设备的存在。

还需要新的身份验证和识别协议来处理包括无人机、车辆以及嵌入式和植入设备在内的新型无线设备。

最后,所有 6G 协议必须是分布式的,并且能够利用分布在网络边缘的数据集。

射频和非射频链路集成: 6G 将见证射频和非射频链路的融合,包括光学、可见光通信 (VLC)、分子通信和神经通信等。这种联合射频/非射频系统的设计是一个开放的研究领域。

全息无线电:由于使用 LIS 和类似结构,6G 可以实现射频全息 (包括全息 MIMO)和空间光谱全息摄影。全息射频允许通过空间光谱全息和空间波场合成来控制整个物理空间和电磁场的完整闭环。这大大提高了频谱效率和网络容量,有助于成像和无线通信的融合。如何实现全息无线电是一个非常开放的领域。

图 3 显示了与这些开放问题相关的必要分析工具和基本原理的概述。

结论和建议

本文为 6G 系统提出了一个大胆的新愿景,概述了趋势、挑战和相关研究。虽然许多主题将随着 5G 的自然演进而出现,但 LIS 通信、3CLS、全息无线电等新的研究途径将为未来十年创造令人兴奋的研究议程。我们最后提出几点建议:

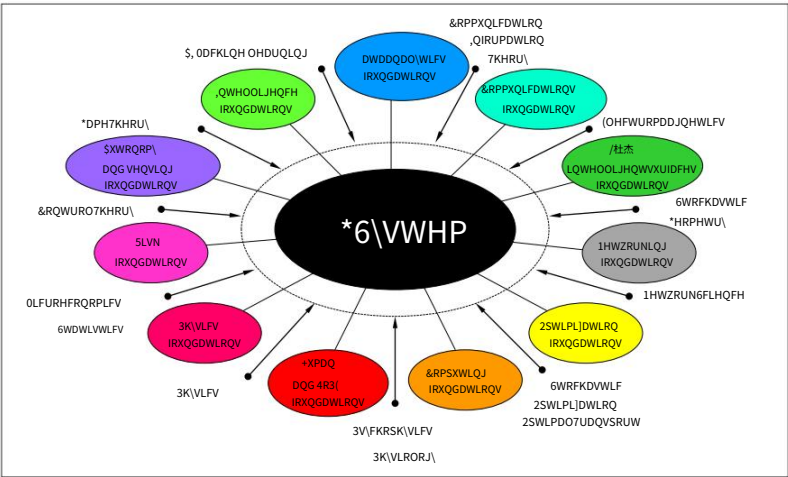


图 3. 6G 的必要基础和相关分析工具。

- 建议1:迈向6G 的第一步是在高频毫米波频段及更高频段 (即太赫兹)启用MBRLLC 和移动性管理。
- 建议2: 6G 需要从以无线电为中心的系统设计 (即 3GPP)转向在AI 驱动的智能基础的编排下的端到端3CLS 协同设计。
- 建议3: 6G 愿景将不是一个简单的案例,即探索额外的高频段以提供更多容量。相反,它将由各种应用、技术和技术组合驱动 (图 1 和图 3) 。
- 建议4: 6G 将从智能手机基站范式过渡到智能表面与人类嵌入式植入物通信的新时代。
- 建议 5: 6G 的性能分析和优化需要在 3D 空间中运行,并从简单的平均转向处理尾部、分布和 QoPE 的细粒度分析。

致谢

这项研究得到了美国国家科学基金会 Grant CNS-1836802 的支持。它还得到了芬兰科学院项目 CARMA 的部分支持;芬兰科学院项目使命;芬兰科学院SMARTER项目;信息技术项目 NOOR;诺基亚贝尔实验室项目 FOGGY;和诺基亚基金会。

参考

[1] M. Chen 等人,“基于人工神经网络的无线网络机器学习:教程”, IEEE Commun. 调查和教程,将于 2019 年出版。
[2] A. Taleb Zadeh Kasgari,W. Saad 和 M. Debbah,“人类在环无线通信:机器学习和大脑感知资源管理”,IEEE Trans. Com mun.,将于 2019 年亮相。
[3] J. Park 等人,“边缘的无线网络智能”,arXiv 预印本 arXiv:1812.02858,2018 年 12 月。
[4] P. Zioga 等人,“Enheduanna a Manifesto of Falling Live Brain Computer Cinema Performance: Performer and Audience Participation, Cognition and Emotional Engagement Using Multi Brain BCI Interaction”,《神经科学前沿》,卷。12,2018 年 4 月,第 191 页。
[5] Y. Li 等,“移动云计算中具有不确定用户需求的无线电和虚拟机资源的联合优化”,IEEE Trans.多媒体,卷。20,没有。9,2018 年 9 月,第 2427-38 页。

[6] G. Durisi,T. Koch 和 P. Popovski, “使用短数据包实现大规模、超可靠和低延迟的无线通信”,Proc. IEEE,第一卷。104,没有。9, 2016 年 9 月,第 1711-26 页。

[7] M. Bennis,M. Debbah 和 HV Poor, “超可靠和低延迟无线通信:尾部、风险和规模”,过程。IEEE,第一卷。106,没有。10,2018 年 10 月,第 1834-53 页。

[8] Y. Xing 和 TS Rappaport, “140 GHz 的传播测量系统和方法 移动到 6G 和 100 GHz 以上”,Proc. IEEE 全球通讯。会议。(GLOBECOM),阿拉伯联合酋长国阿布扎比,2018 年 12 月。

[9] S. Hu,F. Rusek 和 O. Edfors, “超越大规模 MIMO:具有大型智能表面的数据传输潜力”,IEEE Trans.信号处理,第一卷。66,没有。10, 2018 年 5 月,第 2746-58 页。

[10] M. Mozaffari 等人, “使用无人机超越 5G:3D 无线蜂窝网络的基础”,IEEE Trans.无线通讯,卷。18,没有。1,2019 年 1 月,第 357-72 页。

[11] X. Cao 等人, “来宾社论机载通信网络”,IEEE J. 通讯中的选定区域,第一卷。36,没有。9,2018 年 9 月,第 1903-06 页。

[12] ATZ Kasgari 和 W. Saad, “无模型超可靠低延迟通信 (URLLC):深度学习强化学习框架”,Proc. IEEE Inr l。会议。交流。(ICC),中国上海,2019 年 5 月。

[13] O. Semirari 等人, “集成毫米波和低于 6 GHz 的无线网络:联合移动宽带和超可靠低延迟通信的路线图”,IEEE 无线通信,第一卷。26,没有。2,2019 年 4 月,第 109-15 页。

[14] M. Chen,W. Saad 和 C. Yin, “无线网络上的虚拟现实:服务质量模型和基于学习的资源管理”,IEEE Trans.通讯,卷。66,没有。2018 年 11 月 11 日,第 5621-35 页。

[15] B. Cao 等人, “多访问边缘计算中的智能卸载:最先进的审查和框架”,IEEE Commun.杂志,卷。57,没有。3,2019 年 3 月,第 56-62 页。

传记

Walid Saad [S 07, M 10, SM 15, F 19] 获得博士学位。2010 年获得奥斯陆大学博士学位。目前,他是弗吉尼亚理工大学电气和计算机工程系的教授,负责领导网络科学、无线和安全 (NEWS) 实验室演讲。他的研究兴趣包括无线网络、机器学习、博弈论、网络安全、无人机、蜂窝网络和网络物理系统。他是八项会议最佳论文奖和 2015 年 IEEE ComSoc Fred W. Ellersick 生病奖的作者/合著者。他是 IEEE Fellow 和 IEEE Distinguished Lecturer。

Mehdi Bennis [SM 15] 是芬兰奥卢大学无线通信中心的副教授和芬兰科学院研究员。他曾获得多个奖项,包括 IEEE 通信协会的 Fred W. Ellersick 奖和最佳教程奖,以及无线通信和网络杂志的 EURASIP 最佳论文奖。他目前是 IEEE Transactions on Communications 的编辑。

陈明哲获得博士学位。2019年毕业于北京邮电大学,获学士学位。2016年至2019年在弗吉尼亚理工大学电气与计算机工程系做访问研究员。目前在香港中文大学、中国深圳和普林斯顿大学电机工程系从事博士后研究。他的研究兴趣包括机器学习、虚拟现实、无人机、博弈论、无线网络和缓存。他是 2018 年 IEEE Transactions on Communications 的模范审稿人。