

6G 与广域物联网

尤肖虎^{1,2}, 尹浩³, 邬贺铨⁴

(1. 东南大学, 江苏 南京 211189; 2. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;
3. 军事科学院, 北京 100091; 4. 中国信息通信科技集团, 北京 100083)

摘要: 6G 技术尚处于研究的起步阶段, 预计在未来几年, 全球将就 6G 的发展愿景与关键技术指标逐步达成共识。围绕应用范畴的再扩展与技术性能的再提升问题, 首先对未来 6G 无线接入可能涉及的技术领域进行了概括, 包括星地融合与覆盖扩展、毫米波与太赫兹通信、数据驱动的人工智能 (AI, artificial intelligence) 与安全以及大规模协作与无蜂窝系统构架创新等。在此基础上, 对以公众移动通信系统为基础的广域物联网亟需进一步突破的高可靠与低时延、无线资源全动态配比以及厘米级精确定位等若干重要技术进行了分析与展望, 最后进行了总结概述。

关键词: 6G 移动通信; 广域物联网; 星地融合通信; 毫米波与太赫兹; AI 通信

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00158

On 6G and wide-area IoT

YOU Xiaohu^{1,2}, YIN Hao³, WU Hequan⁴

1. Southeast University, Nanjing 211189, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

3. Chinese Academy of Military Science, Beijing 100091, China

4. China Information Communication Technologies Group, Beijing 100083, China

Abstract: 6G technology is still in its initial stage of research. It is expected that in the next few years, the world will gradually reach a consensus on visions and key technical parameters of 6G. Focusing on the further expansion of application areas and further enhancement of technical capability, the technical fields were summarized that may be involved in the future 6G radio access, including the coverage expansion based on the satellite-terrestrial integration, millimeter wave and terahertz communications, data-driven network artificial intelligence (AI) and security, large-scale cooperation and cell-free architecture innovation, etc. On this basis, some important technologies, such as ultra-high reliability and low latency, full dynamic radio resource allocation and centimeter level precise positioning, which need to be further broken through in the wide-area Internet of things (IoT) based on the public mobile communication system were analyzed and prospected. Finally, the conclusions were given.

Key words: 6G mobile communication, wide-area IoT, satellite-terrestrial converged communication, millimeter wave and terahertz, AI communication

1 引言

目前, 世界各国尚未就未来 6G 技术发展达成广泛的共识, 但总体来看, 6G 技术将会在现有 5G 技术的基础上, 进一步融合卫星移动通信、AI 与大数据, 构成面向 2030 年之后的泛在移动信息基础

设施。6G 技术将拓展并引入更高的频段, 提供更高的速率、更多的连接、更广阔的网络覆盖; 具备更加多样化的业务适应能力, 业务速率和时延等核心技术指标的动态范围更大, 交互形式更融合和智能化, 网络架构和服务更安全可信^[1-3]。

传统的公众移动通信系统以面向消费者的业

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 受科技部 6G 专项研究计划支持

Foundation Item: Supported by the 6G Special Research Program of the Ministry of Science and Technology

务应用为主。5G 技术以“增强宽带、万物互联”为发展愿景^[4]，其目标是为移动互联网提供更强的连接能力，并为各行各业提供万物互联的基础服务能力。5G 技术的诞生标志着公众移动通信系统服务对象的一次根本性转变，面向行业的普适性广域物联网正在成为拉动公众移动通信系统发展的主要动力。可以预计，6G 技术将以此为基础，进一步拓展未来公众移动通信系统的基础服务能力及应用范畴^[5]。

极度差异化的物联网应用需求将对 6G 乃至更长远的公众移动通信系统发展产生深刻的影响，包括：1) 户外、野外、飞机、海上等广域物联网应用场景迫切需要进一步扩展现有公众移动通信系统的无线覆盖范围；2) 需要进一步建立与完善开放网络环境下的确定性服务质量（QoS, quality of service）体系以及端到端高可靠、低时延无线传输基础技术体系，以满足现实场景下的任务关键型物联网应用需求；3) 需要进一步开发自由双工、灵活双工等新型无线资源配置技术，以满足物联网上、下行无线链路的差异化和动态化的资源配比发展需求；4) 随着 6G 技术向毫米波及太赫兹频段的逐步迁移，以公众移动通信系统为基础的广域物联网需要拓展更高的频段，在兼顾现有中、低频段覆盖优势的基础上，引入更有效的无线传输与组网技术。

2 6G 无线接入重点研发领域

目前，全世界尚未有统一的 6G 技术定义，不同国家、组织、企业与学者对 6G 特征的描述繁杂多样，对 6G 技术进行全面的概括还为时尚早。目前看来，未来 6G 技术发展将可能涉及但不限于如下 4 个较重要的技术领域。

2.1 星地融合与覆盖扩展

密集部署的地面 5G 系统可以较好地解决超大容量无线覆盖问题。根据估算，运用大规模天线与多用户—多输入多输出（MU-MIMO, multi-user multiple-input multiple-output）复用技术，系统频谱效率可达 50~100 bit/(s·Hz)，其区域频谱效率理论值可达 400~800 bit/(s·Hz·km²)。但对于偏远地区及海洋来说，地面 5G 系统缺乏有效的低成本无线覆盖方案，也难以满足未来无人系统（如无人机、无人船等）的智能化应用需求。卫星通信系统在容量方面虽然难以与地面 5G 相当，但却具有地面 5G 难以相比的覆盖优势。根据华为公司在 ITU-T 网络

2030 焦点组会议上发布的研究结果，低轨卫星系统在无线覆盖方面具有潜在的低成本优势。研究星地融合（satellite-terrestrial converged）的移动通信系统，兼顾地面系统的容量优势与卫星系统的覆盖优势，构造覆盖空中、陆地、海洋的新一代移动信息网络^[6-7]，已成为 6G 研究热点方向之一。

利用卫星扩展移动通信系统的无线覆盖范围主要包括如下 3 种典型方式：1) 利用卫星为地面公众移动通信基站提供无线回传（wireless backhaul）功能，解决偏远地区光纤网络部署成本过高的问题；2) 在卫星上部署基站数字收发设备，并通过地面增补站或高天线增益车载终端将卫星信号转发给普通手机或物联网终端；3) 在低轨卫星上部署高增益的天线（如增益为 30 dB 以上的多波束大规模相控阵天线）以及与地面移动通信系统相兼容的基站数字收发处理装置，使普通终端（如最大发射功率为 23 dBm 的手机）能在地面移动通信系统缺乏有效覆盖时，直接与低轨卫星进行通信。其中，第 3 种方式是未来较理想的星地融合发展方式，可以实现与地面 5G 三大业务场景如增强型移动宽带（eMBB, enhanced mobile broadband）、大规模机器类通信（mMTC, massive machine type communication）和高可靠低时延通信（uRLLC, ultra-reliable and low latency communication）的无缝衔接，但对星载处理技术要求极高，且需要建立大容量的卫星星际链路。以星地融合方式扩展无线覆盖的 3 种可能的技术途径如图 1 所示。

2.2 毫米波与太赫兹通信

2019 年世界无线电通信大会（WRC-19, 2019 World Radiocommunication Conference）已达成共识，将 24.25~27.5 GHz、37~43.5 GHz、66~71 GHz 毫米波频段以及 275~296 GHz、306~313 GHz、318~333 GHz、356~450 GHz 太赫兹频段标识用于 5G 及国际移动通信系统（IMT）发展。与中、低频段（6 GHz 以下）相比，毫米波和太赫兹频段的电波传播路径损耗显著增加（即在自由空间条件下，载波频率每升高一倍，路径损耗将增加 6 dB），但频谱资源非常丰富。需要指出的是，毫米波频段兼顾了可用的电波传播距离以及连续可用的丰富带宽，将是未来公众移动通信的“黄金频段”，它的有效开发已成为 5G 演进和 6G 发展的主要技术方向之一。

毫米波与太赫兹电波传播特性研究是构建新

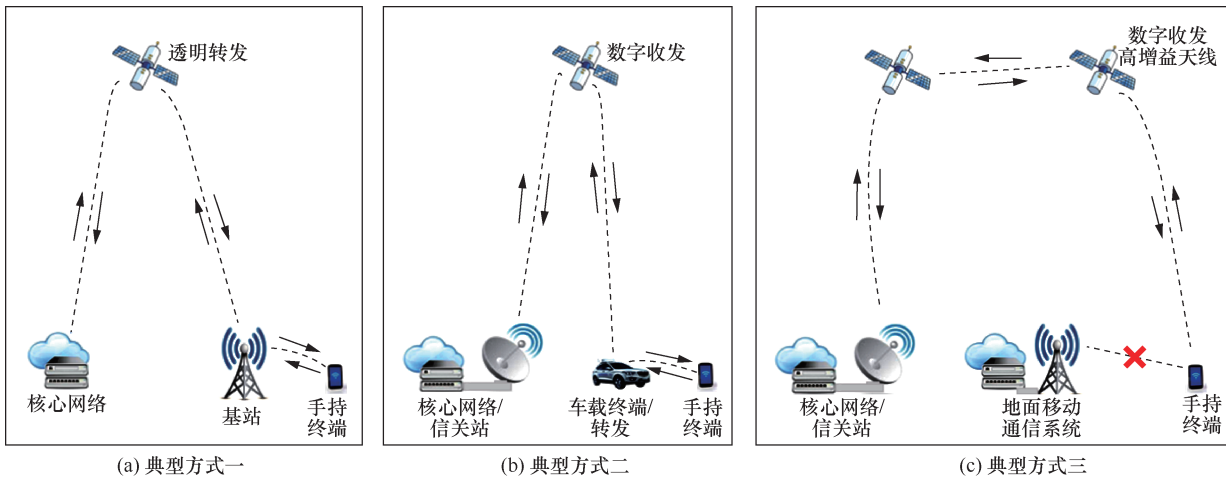


图 1 以星地融合方式扩展无线覆盖的 3 种可能的技术途径

一代移动通信系统的基础。国内外学者在此方面做出了富有成效的基础性工作, 相关成果可参见文献[8-9]。结合普适性广域物联网的典型应用场景, 进行太赫兹频段电波传播特性及系统适用性的研究, 目前尚属于探索性的研究内容。

大规模天线阵列是克服毫米波与太赫兹传播距离受限的有效手段之一。相比于中、低频段, 毫米波与太赫兹电波的波长很短, 易于通过 AiP (antenna in package) 技术将天线集成到芯片上或电路板上, 从而实现大规模天线阵列的小型化、低成本应用, 其本身具有广阔的应用前景。值得一提的是, 在“教育部 2011 计划”的支持下, 东南大学研究团队曾进行了长达 3 年的实地场景测量与分析研究^[10], 研究结果表明, 通过增加基站侧大规模天线阵列的阵元数, 可使 Ka 波段毫米波电波传播的室外有效距离由数十米增加至数百米乃至千米量级, 从一个方面证明了 Ka 波段毫米波频谱资源在构建公众移动通信系统方面的可用性。

相比于与中、低频段, 毫米波频段无线信道在时间和空间域均呈现欠散射 (less scattering) 或信道稀疏特性, 太赫兹则更接近光波的辐射特性。传统基于富散射 (rich scattering) 的 MIMO 空间复用技术将受到一定程度的限制。根据毫米波无线信道的特点, 研究大规模天线波束赋形与管理技术已成为近年来无线通信领域的热点方向, 涌现了很多可供借鉴的文献^[11-13]。采用分布式节点无线组网技术, 降低毫米波或太赫兹电波传播空间阻挡概率, 是一项有望改善高频段无线覆盖特性的重要技术。

对于太赫兹通信, 目前存在两种值得关注的重

要技术途径: 1) 延续现有毫米波通信的发展路径, 不断提升器件与系统的载波频率; 2) 将光通信的相关技术 (如光载太赫兹) 经过改造后应用于太赫兹通信中^[14]。总体来看, 毫米波技术的发展相对成熟, 而太赫兹频段应用于公众移动通信系统的应用场景、技术途径以及基础器件构成等均不够清晰, 是值得学术界进一步研究的前沿性领域。

2.3 数据驱动的网络 AI 与安全

AI 与新一代移动通信系统的相互结合是近年来的研究热点之一。通信领域的研究人员一般更多地关注如何利用 AI 提升移动通信网络的运行效率, 并改善用户的业务体验。该方面的探索可以归结为数据驱动的移动通信网络运行机制研究, 它是对网络中存在的大量可用数据进行分析与推断, 进而对网络节点、传输链路的状态或资源进行及时调整的一类技术, 严格来说, 它是一类数据驱动的分析推断与决策技术。

文献[15]对 AI 应用于 5G 时所涉及的主要方法、研究对象与典型范例进行了归纳, 需要补充的是, AI 技术存在无模型化和先验模型化两种类型。如目前流行的 AI 技术 (包括监督学习、无监督与自组织学习以及增强学习等) 大部分属于无模型化; 基于贝叶斯网络有向图推理模型的 AI 则属于先验模型化^[16]。无模型化的优点是不需要先验信息, 仅需通过对数据的深度学习便可实现最大似然估计与推断; 其缺点是数据学习的收敛时间长, 且难以保证全局最优性。通信系统的优化问题大多有实时性要求, 无模型化往往难以满足这种需求, 且在某些条件下, 存在可供利用的先验模型 (如流量

模型、信道模型等)信息。相关研究表明^[17-18], 基于先验模型信息的数据学习与推理方法通常可以极大地加快学习速度, 并保证收敛的全局性, 从而较好地满足通信系统的实时性要求。基于先验信息建立数据驱动的通信网络 AI 运行机制, 进而提高数据学习的有效性与时效性, 是未来极具现实意义的研究领域之一。

“数据孤岛”是限制移动通信 AI 技术发展的主要瓶颈问题之一。现有的网络每天产生大量的数据, 但由于权益保护等方面的原因, 这些数据无法被公开和共享, 使得学术界缺乏实际可供研究的数据对象。此外, 对于网络各个层面(网络层、链路层和物理层)实际产生的数据, 目前缺乏统一、科学的采集与存储规格, 从而无法建立完整的数据驱动 AI 框架, 也极大地限制了该研究领域的发展。

6G 向 3D 无线覆盖扩展, 各种无人系统及远程系统等新兴应用将不断涌现, 网络安全成为发展新兴应用必须解决的先决条件之一, 因此, 需要在网络安全体系与关键技术上取得更多突破。网络内生安全是近年来新兴的研究方向^[19-20], 一般是指在设计和建造通信网络时, 就把安全机制部署进网络的每一个节点中, 并通过网络互联将所有节点中的安全组件关联在一起, 对网络进行全面、深度的安全态势感知和防御, 并通过 AI 技术不断自主学习和演进, 使网络具有“与生俱来、自主成长”的安全防御能力。内生安全从网络内在的角度出发, 以降低安全体系对网络可用性的负面影响为目标, 将防御方式由集中式改为分布式, 将有可能引发网络安全领域的技术革新。无线物理层安全是网络内生安全的一种特殊体现形式, 它利用射频器件及无线信道的指纹(fingerprinting)等特有信息^[21], 通过上、

下行无线链路的协作配合, 为无线节点的接入认证和信息传输提供附加的防护, 对于卫星、无人机等空中无线链路及其他广域物联网应用均具有重要的潜在应用价值。

2.4 大规模协作构架与无蜂窝移动通信

近年来, 飞速发展的网络云化与虚拟化技术使得移动通信基站间的联合信号处理成为可能。大规模协作无蜂窝(cell-free)移动通信系统应运而生^[22-25], 它可以在相同的频率上以分布式 MU-MIMO 的方式为多个基站覆盖范围内的多个用户同时提供无线连接, 从而突破了传统蜂窝系统中由频率资源静态支配所带来的局限。在理论上, 当无线网络侧的天线数充分多时, 无蜂窝系统的总容量可随着覆盖范围内总用户数的增加而线性增加^[25], 是进一步提升频谱利用率的理想移动通信方式。通过运用大规模协作无蜂窝系统构架, 未来 6G 系统的总频谱利用率可由现有 5G 系统的 50~100 bit/(s·Hz)提升至 500 bit/(s·Hz)左右, 至少这在理论上是完全可能的。值得一提的是, 大规模协作无蜂窝系统是更具普遍意义的移动通信无线网络架构, 传统蜂窝及近年来兴起的 Relay、Small Cell 等无线协作通信方式等均是其特殊形式^[25]。

图 2 显示了传统蜂窝系统与基于分布式 MU-MIMO 的无蜂窝系统在构架上的区别, 两者的本质区别在于空间自由度的利用方式不同。传统蜂窝系统构架由于无法进行小区间的联合处理, 相邻小区位置接近的用户无法在相同频率上同时通信, 空间复用增益无法得到开发利用。而对于无蜂窝系统来说, 只要无线网络侧的天线数足够多, 就可以在相同频率上支持足够多的用户同时通信, 即分布式 MU-MIMO 通信, 其系统总频谱效率与由此构成

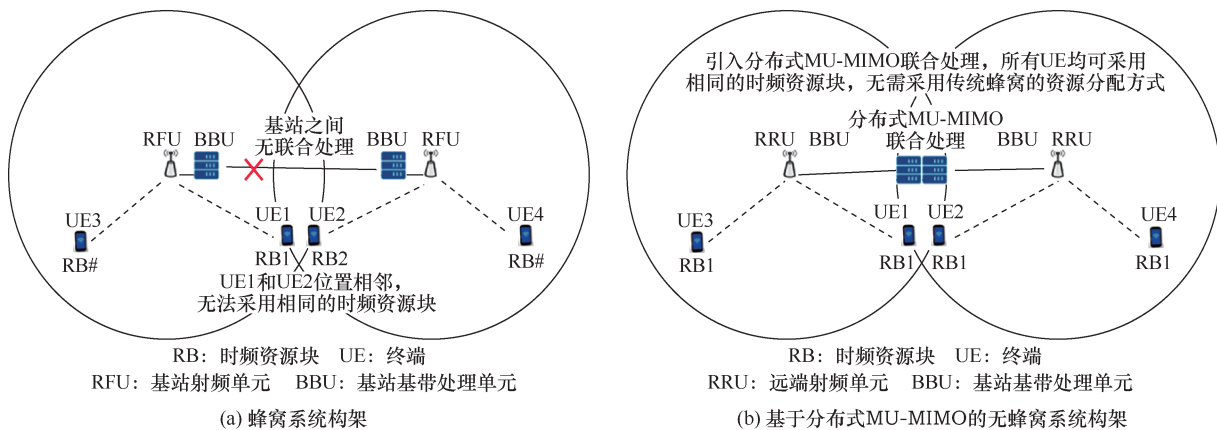


图 2 蜂窝系统与基于分布式 MU-MIMO 的无蜂窝系统构架对比

的分布式 MU-MIMO 的空间自由度成正比。综上所述,传统蜂窝系统以“时间—频率”域的无线资源开发利用为基础,而大规模协作无蜂窝系统则以“时间—频率—空间”域的无线资源开发利用为基础,后者显然更具性能优势。

需要指出的是,上述大规模协作无蜂窝系统的性能提升以系统计算复杂度和部署成本的增加为代价。1) 无线基站(或称为无线节点)间需要具备高速连接能力,否则难以进行分布式 MU-MIMO 处理;2) 大规模分布式 MU-MIMO 信道估计与实时处理本身就具有较大的挑战性;3) 无线节点间的时频同步和通道一致性校正^[25]同样需要付出一定的代价。研究各种退化场景下的无蜂窝系统构建方式,本着“够用就好”的原则,在系统性能、复杂度以及成本之间寻求可能的折中,是未来 6G 移动通信系统研发的重要努力方向。根据已有的 5G 商用部署经验,成本与经济性逐渐成为制约未来移动通信系统商业化实施的关键因素之一。

3 需要进一步突破的广域物联网若干关键技术

6G 除了需要提供更高的传输速率和更广阔的网络覆盖之外,还需要针对普适性的广域物联网应用特点,开发更有效的连接与服务方式。

3.1 高可靠与低时延

5G 新空口(NR, new radio)首次将高可靠、低时延列为公众移动通信系统的核心技术指标。一方面,5G NR 通过引入更短的时隙调度单位、业务优先抢占与免许可接入获准机制等,降低了空中接口的传输时延;另一方面,通过引入重复发送、多点发送(multi-TRP)或多连接发送等机制,提高了无线传输链路的可靠性^[26]。

为了制定网络端到端的 uRLLC 解决方案,业界探讨了多种可能的技术途径,包括能够兼顾时分复用(TDM, time-division multiplexing)和统计复用两者优点的光承载技术 FlexE,能够为链路层提供低时延、高可靠保障的时间敏感网络(TSN, time sensitive network)以及为 5G 网络层切片及 QoS 提供保障的确定性网络(DetNet)等,其总体目标是解决传统 IP 网络尽力而为、无法保障端到端时延及服务质量的瓶颈问题^[27]。其中,所涉及的一项关键技术是面向以太网(Ethernet)网络同步的 IEEE 1588 PTP v2 协议,文献^[25]利用该技术构建了大规模分布

式协作 5G 实验平台,解决了分布式 MU-MIMO 无线节点间的时间同步问题,但对于精确度更高、规模更大的应用,还需要在网络同步机制方面进一步发展与创新。

尽管 5G NR 在高可靠、低时延研究方面取得了重要进展,但应客观地看到,端到端 uRLLC 技术研究仍处于不断成熟的初期。一方面,uRLLC 尚未出现大规模推广应用的成功范例,需要在实践中不断完善;另一方面,在网络规模较大时,目前缺乏有效的整体性能分析与评测手段。在网络节点较多时,能否通过 uRLLC 确保业务应用所需的 QoS,其本身就极具挑战性。

制约 uRLLC 技术发展的另外一个根本性因素是学术界尚未建立相对统一的高可靠、低时延理论与方法体系,具体原因论述如下。

1) 以无线链路的高可靠性研究为例。5G NR 和窄带物联网(NB-IoT, narrow band Internet of things)以相同信息在多个无线资源块之间的重复发送为其基本手段^[26,28],在提高无线链路可靠性的同时,极大地降低了无线资源的利用效率,且可能产生较大的传输时延。显然,完整的研究方法需要统筹地考虑无线链路的可靠性、无线资源的利用率、所使用的天线数以及无线链路的传输时延,并寻求其最优折中。但是,目前似乎并不存在相应的理论支撑体系。其次,目前 5G NR 的主要支撑技术——大规模 MIMO 本身就具备空间复用和空间分集的折中能力^[29],这意味着借助于大规模 MIMO,系统可以在吞吐率与分集度(可靠性)之间进行有效的折中。在此方面仅有少数文献^[30-31],且尚不能适用于 MU-MIMO。第三,由于分布式 MIMO 具有天然的多连接特性,在改善系统无线覆盖特性、提高传输可靠性方面,已被证明极具优势^[25],但目前尚未得到充分的重视,也未能发挥其应有的作用。

2) 以无线链路的低时延研究为例。5G NR 为了降低时延,采用更短的时隙调度单位等技术手段。在同样的系统配置与传输速率条件下,这意味着更短的信道编码分块长度。Gellager 给出的经典随机编码理论指出,在二进制对称信道(BSC)的信道条件下,无线传输成对(pairwise)差错概率受限于 2^{-NR_0} ,其中, N 为信道编码分块长度, R_0 为编码截止速率(cutoff rate),由此看出,降低信道编码分块长度将带来系统传输可靠性的显著下降。文献^[32-33]将上述结果推广至 MIMO 衰落信

道情形, 结果表明, 对于给定的系统配置与传输可靠性要求, 编码分块长度必须要满足一定的约束条件, 这意味着传输时延不可能无限制地减小。为了应对未来 6G 提出的更高传输要求, 从理论上深入研究有限编码分块长度对系统性能的影响十分重要。文献[34-35]研究了有限编码分块长度条件下多天信道容量界的退化结果, 更为一般意义上的有限编码分块长度效应研究需要学术界付出进一步的努力, 从而为未来 6G uRLLC 技术发展提供系统性的理论基础。

3.2 无线资源全动态配比

与传统移动互联网的应用模式不同, 物联网业务千差万别, 呈现极大的动态性和极度的差异性^[36]。针对物联网业务, 实时进行上、下行链路的无线资源动态配比, 满足物联网业务 QoS 的需求, 是基于公众移动通信系统的广域物联网必须具备的基本属性。为了适应门类繁杂的业务应用, 5G NR 提出了灵活空中接口与灵活双工的基本概念, 涵盖了上、下行时隙动态配比的时分双工 (TDD, time division duplex) 技术以及上、下行带宽动态配比的频分双工 (FDD, frequency division duplex) 技术等。交叉链路无线干扰 (CLI, cross-link interference) 是限制灵活双工技术应用的主要瓶颈, 通常需要引入复杂的干扰避让技术加以解决^[37]。

近年来, 学术界已研究出多种新型的双工资源配置方式, 包括同时同频全双工 (CCFD, co-time co-frequency full duplex)^[38]、带内多点协作全双工 (ComPflex)^[39]等, 其中, CCFD 备受关注, 但需解决收发设备的近端自干扰这一核心技术瓶颈。北京大学研究团队已于 2014 年研制出了具备 100 dB 自干扰消除能力的 CCFD 收发设备, 从而将这一技术向实用化方向推进了重要一步。

为了更好地满足 6G 所面临的新型物联网应用, 需要进一步探索更灵活适用的无线资源配比方式。为此, 需要在收发设备的自干扰消除以及交叉链路的互干扰消除等方面取得进一步的突破。应注意的是, 收发设备自干扰的消除更多地依赖于电路器件的研究进展, 而交叉链路的互干扰消除则依赖于无线网络构架的革新。举例来说, 若系统采用 cell-free 构架, 由于所有的上行或下行链路均进行联合处理, 则不存在蜂窝构架中相邻基站的多个上行链路之间以及多个下行链路之间的相互干扰问题, 仅需处理上行链路对下行链路 (U2D, up-link to

down-link) 的干扰以及下行链路对上行链路 (D2U, down-link to up-link) 的干扰问题, 从而极大地简化了 CLI 消除问题。若进一步考虑以下事实: 整体上, D2U 干扰在无线网络侧是可以事先确知的, 因而, 可以采用类似于 CCFD 的自干扰消除技术, 在 cell-free 系统层面对其进行整体性消除, 最终剩余的问题是解决 U2D 问题。

基于上述思路, 文献[40]引入了一种基于 cell-free 构架的网络辅助全双工 (NAFD, network-assisted full-duplex) 技术。本质上, NAFD 是一种更广泛意义上的灵活空口技术, TDD、FDD、CCFD 以及 5G NR 灵活双工均是其特殊形式。文献[40]较完整地论述了终端为 TDD 或半双工情形下的 D2U 以及 U2D 消除问题。

3.3 厘米级精确定位

物联网应用时常伴随着较高精确度的定位服务 (LBS, location based service) 需求。全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 在开阔的室外场景可以提供 10 m 级精确度的位置服务。进一步地, 若通过卫星导航地面基准站, 为移动用户提供实时动态 (RTK, real time kinematic) 载波相位差分信息, 可使室外 GNSS 的定位服务精确度达到厘米级^[41]。但对于室内以及高楼林立的城市密集区来说, GNSS 信号难以有效接收, 较大程度上限制了 LBS 应用。

在极具发展前景的各种无人系统或远程系统 (如无人飞机、无人车船等) 中, 精确定位是首先必须具备的关键技术。此外, 在备受关注的工业互联网与 5G 融合的应用场景中, 需要为室内环境的机器人及其他制造与搬运装备等随时提供厘米级精确度的位置信息, 从而为云端控制的智能制造提供便利。

基于公众移动通信基础设施的 LBS 技术得到了持续发展^[42]。文献[43]较详尽地对 5G 定位技术的发展进行了概述, 需要进一步说明, 5G NR R15 标准通过引入更多样化的参考信号 CSI-RS, 为开发更高精确度的 LBS 技术提供了基础手段。3GPP 已公布 5G NR R17 研究计划, 定位增强被列为核心内容之一, 其目标是为物联网及 V2X (vehicle to everything) 等物联网应用提供 3D 厘米级精确度的 LBS 技术。

基于公众移动通信基础设施的定位技术可以概括为两大类: 间接定位法和直接定位法。间接定

位法较常见,其基本原理是:运用移动终端至3个基站的到达时间(ToA, time of arrival)或到达时间之差(TDoA, time difference of arrival),或者运用移动终端至两个基站的到达角度(AoA, angle of arrival),再由基站侧LBS服务器综合计算移动终端位置^[42]。直接定位法最初被应用于解决多个主动式目标源的定位问题^[44],近年来被扩展应用于解决多基站环境下的移动终端定位问题^[45-47]。该类方法的基本原理是:利用多个基站至移动终端的无线信道模型,建立有关移动终端位置的最大似然函数,并通过迭代方法直接求解。此类方法计算较复杂,但可以提供远好于间接定位法的精准度^[45];在基站采用单天线配置且基站数较多时,定位精确度可达亚米级别,且可以解决严重的多径时延扩展问题^[46-47]。若基站采用大规模天线配置,则定位精确度可得到进一步提升,厘米级精确定位是可以预期的。直接定位法的另外一种形式是基于多天线信道特征的指纹识别技术^[48-50],其实施较简单,但需要处理的数据量较大。

展望未来10年,基于公众移动通信系统的精确定位技术将进入重要的潜在突破期。1)网络架构的创新将使得精确定位的实施更便利,C-RAN、分布式MIMO以及无蜂窝构架等技术将使得基站间的联合处理更便捷迅速。2)随着载频的升高,移动通信信号带宽将从现有5G的100 MHz增加至500 MHz,多径时延分辨率可与超宽带(UWB, ultra wide band)定位技术相当;此外,基站侧天线阵元数将达到1 000~10 000个,角度分辨率可达1°甚至更小;相关技术发展及演进将为厘米级精确定位提供潜在的技术可行性。3)毫米波及太赫兹频段的电波二次反射相对较弱,制约精确定位的多径时延扩展问题将更加易于解决。基于上述有利条件,发展基于公众移动通信系统的厘米级精确定位有望成为未来6G研究的一个重要分支。

4 结束语

5G技术开启了“增强宽带、万物互联”的公众移动通信发展新纪元。可以预计,6G将以此为基础,进一步深化与拓展移动通信的应用范畴,提升移动互联网与广域物联网的基础服务能力,使其成为推动社会及行业数字化、移动化、网络化、智能化发展的普适性技术与基础设施,并以更强的渗透性和带动性,加速全球发展模式的转型与

创新发展。

本文对未来6G无线接入潜在的重点技术研发领域进行了概述,并对以公众移动通信系统为基础的广域物联网所需进一步突破的若干关键技术进行了分析与展望。本文未涉及其他较重要的6G技术研发方向,包括6G网络构架创新与前传网络承载技术、新型调制编码技术、新型射频前端与电磁调控技术创新等。面向2030年之后的6G移动通信技术尚处于发展的萌芽时期,对其进行全面的论述还为时尚早。此外,文中涉及的部分技术还可能被提前应用于5G技术的后续演进中。谨以此文献给读者,希望所提出的观点及对未来技术走向的分析预测,能对促进6G技术研究有所裨益。

参考文献:

- [1] DAVID K, ELMIRGHANI J, HAAS H, et al. Defining 6G: challenges and opportunities[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 14-16.
- [2] LETAIEF K B, CHEN W, SHI Y M, et al. The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(8): 84-90.
- [3] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963-987.
ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication network: vision, challenge and key technology[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49(8): 963-987.
- [4] 王晓云, 刘光毅, 丁海煜, 等. 5G技术与标准[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
WANG X Y, LIU G Y, DING H Y, et al. 5G technology and standard[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [5] ZHANG L, LIANG Y C, NIYATO D. 6G visions: mobile ultra broadband, super Internet of things, and artificial intelligence[J]. China Communications, 2019, 16(8): 1-14.
- [6] NIEPHAUS C, KRETSCHMER M, GHINEA G. QoS provisioning in converged satellite and terrestrial networks: a survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2415-2441.
- [7] ZHU X M, JIANG C X, KUANG L L, et al. Cooperative transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 204-210.
- [8] HUANG J, LIU Y, WANG C X, et al. 5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: recent developments and future challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 57(1): 138-145.
- [9] HOSSAIN Z, MOLLICA C, JORNET J M. Stochastic multipath channel modeling and power delay profile analysis for terahertz-band communication[C]//The 4th ACM International Conference on Nanoscale Computing & Communication. ACM, 2017: 1-7.

- [10] WANG H M, ZHANG P, LI J, et al. Radio propagation and wireless coverage of LSAA-based 5G millimeter-wave mobile communication systems[J]. *China Communications*, 2019, 16(5): 1-18.
- [11] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(3): 366-385.
- [12] LI L M, WANG D M, NIU X, et al. mmWave communications for 5G: implementation challenges and advances[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(2): 5-23.
- [13] HEATH R W, GONZÁLEZ-PRELCIC N, RANGAN S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 10(3): 436-453.
- [14] BARH A, PAL B P, AGRAWAL G P, et al. Specialty fibers for terahertz generation and transmission: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 365-379.
- [15] 尤肖虎, 张川, 谈晓思, 等. 基于 AI 的 5G 技术——研究方向与范例[J]. *中国科学: 信息科学*, 2018, 48(12): 1589-1602.
YOU X H, ZHANG C, TAN X S, et al. AI for 5G: research directions and paradigms[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2018, 48(12): 1589-1602.
- [16] YEDIDIA J S, FREEMAN W T, WEISS Y. Understanding belief propagation and its generalizations[M]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 2003.
- [17] XU Z B, SUN J. Model-driven deep-learning[J]. *National Science Review*, 2018, 5(1): 26-28.
- [18] ZHANG C, YANG C, PANG X, et al. Efficient sparse code multiple access decoder based on deterministic message passing algorithm[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Accepted & Early Access Paper, 2020.
- [19] 郭江兴. 网络空间拟态防御导论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
WU J X. Introduction to cyberspace mimicry defense[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [20] LI Z M. Telecommunications 4.0[C]//*IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2019.
- [21] SHIU Y S, CHANG S Y, WU H C, et al. Physical layer security in wireless networks: a tutorial[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(2): 66-74.
- [22] YOU X H, WANG D M, SHENG B, et al. Cooperative distributed antenna systems for mobile communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 26(14): 1794-1796.
- [23] WANG D M, WANG J Z, YOU X H, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(10): 2112-2127.
- [24] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3): 1834-1850.
- [25] 尤肖虎, 王东明, 王江舟. 分布式 MIMO 与无蜂窝移动通信[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
YOU X H, WANG D M, WANG J Z. Distributed MIMO and cell-free mobile communications[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [26] 3GPP TR 38.824. Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case[S]. 2019.
- [27] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. *通信学报*, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. *Journal of Communications*, 2019, 40(6): 160-176.
- [28] YANG W J, WANG M, ZHANG J J, et al. Narrowband wireless access for low-power massive Internet of things: a bandwidth perspective[J]. *IEEE wireless communications*, 2017, 24(3): 138-145.
- [29] ZHENG L Z, TSE D N C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels[J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 2003, 49(5): 1073-1096.
- [30] BAI B, CHEN W, LATAIEF K B, et al. Outage exponent: a unified performance metric for parallel fading channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(3): 1657-1677.
- [31] SHIN H, WIN M Z. Gallager's exponent for MIMO channels: a reliability-rate tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(4): 972-985.
- [32] XUE J, RATNARAJAH T, ZHONG C J, et al. Reliability analysis for large MIMO systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(6): 553-556.
- [33] WOLF A, SCHULZ P, DORPINGHAUS M, et al. How reliable and capable is multi-connectivity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(2): 1506-1520.
- [34] YANG W, DURISI G, KOCH T, et al. Quasi-static multiple antenna fading channels at finite blocklength[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2014, 60(7): 4232-4265.
- [35] ZHOU L, WOLF A, MOTANI M. On lossy multi-connectivity: finite blocklength performance and second-order asymptotics[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 735-748.
- [36] CENTENARO M, VANGELISTA L. A study on M2M traffic and its impact on cellular networks[C]//*IEEE 2nd World Forum on Internet of Things*. IEEE, 2015: 154-159.
- [37] LG Electronics. Revised WID on cross link interference (CLI) handling and remote interference management (RIM) for NR[S]. 2018.
- [38] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D, et al. In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(9): 1637-1652.
- [39] THOMSEN H, POPOVSKI P, CARVALHO E D, et al. CoMPflex: CoMP for in-band wireless full duplex[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2016, 5(2): 144-147.
- [40] WANG D M, WANG M H, ZHU P C, et al. Performance of network-assisted full-duplex for cell-free massive MIMO[C]//*IEEE Transactions on Communications*. IEEE, 2019.
- [41] 董大南, 陈俊平, 王解先. GNSS 高精度定位原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
DONG D N, CHEN J P, WANG J X. Principle of GNSS high precision positioning[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019.
- [42] LIU Y, SHI X F, HE S B, et al. Prospective positioning architecture and technologies in 5G networks[J]. *IEEE Networks*, 2017, 31(6):

- 115-121.
- [43] 张平, 陈昊. 面向 5G 的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
ZHANG P, CHEN H. A survey of positioning technology for 5G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(5): 1-12.
- [44] WAX M, KAILATH T. Optimum localization of multiple sources by passive arrays[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1983, 31(5): 1210-1217.
- [45] BIALER O, RAPHAELI D, WEISS A J. Maximum-likelihood direct position estimation in dense multipath[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 2069-2079.
- [46] GARCIA N, WYMEERSCH H, LARSSON E G, et al. Direct localization for massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(10): 2475-2487.
- [47] LIAN L X, LIU A, LAU V K N. User location tracking in massive MIMO systems via dynamic variational bayesian inference[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(21): 5628-5642.
- [48] 郭红成, 罗海勇, 尹浩, 等. 基于线性插值和动态指纹补偿的分布式定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(12): 1795-1801.
GUO H C, LUO H Y, YIN H, et al. A distributed localization algorithm based on linear interpolation and dynamic fingerprinting correction[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(12): 1795-1801.
- [49] DEFRANCO P, MACKIE J D, MORIN M, et al. Bio-inspired electromagnetic orientation for UAVs in a GPS-denied environment using MIMO channel sounding[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(10): 5250-5259.
- [50] SAVIC V, LARSSON E G. Fingerprinting-based positioning in distributed massive MIMO systems[C]//IEEE 82nd Vehicular Technology Conference, 2015: 1-5.

[作者简介]



尤肖虎(1962-), 男, 东南大学移动通信国家重点实验室主任、博士生导师、长江学者计划特聘教授, 主要研究方向为无线移动通信理论与技术研究。先后担任国家 863 计划 3G、4G 及 5G 重大项目专家组组长, 国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”副总师, 国家 IMT-2020 (5G) 推进组副组长等; 1998 年获国家杰出青年基金资助; 作为第一完成人, 于 2011 年获国家技术发明一等奖, 并于同年当选为 IEEE Fellow; 获 2014 年度陈嘉庚科学奖; 曾任 IEEE WCNC 2014、VTC Spring 2016 和 ICC 2019 等国际学术会议大会主席。



尹浩(1959-), 男, 中国科学院院士、军事科学院研究员、博士生导师, 通信网络领域专家; 中国电子学会常务理事、中国通信学会常务理事, 工业和信息化部通信科学技术委员会常委等; 主要从事通信网络技术研究, 在复杂环境通信网络理论方法研究、体系结构设计和技术应用等方面取得了多项创新性成果, 主持完成 20 多项国家和国防重大科研项目, 获国家科技进步奖、省部级科技进步奖多项。



邬贺铨(1943-), 男, 中国工程院院士, 光纤传送网与宽带信息网专家, 现任中国电子学会名誉副理事长兼常务理事、国家信息化专家咨询委员会副主任、国家标准化专家委员会主任、国家“互联网+”行动专家咨询委员会主任、国家物联网专家组组长。