

下一代毫米波无线局域网：愿景与关键使能技术

范敏¹, 邵思源¹, 贺超³, 王祥³, 王海明^{1,2}

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

3. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要: 随着信息通信技术的快速发展和广泛部署, 人类的生产生活以及社会治理向数字化、信息化、智能化方向不断深入演进。作为应用最广泛的无线通信技术之一, 无线局域网 (WLAN, wireless local area network) 需要在吞吐量、可靠性、时延等关键性能上进一步突破, 同时还需要具备感知、智能等新特性。毫米波 (mmWave, millimeter wave) 巨大的频率资源为无线局域网发展注入了新动能, 但同时也带来了新的技术挑战和需求。首先, 回顾了无线局域网的发展历程; 其次, 描述了未来无线局域网的网络结构、典型应用、发展方向和性能指标要求; 然后, 分析了毫米波频段无线信道特性及其对无线网络设计的新要求、新挑战; 最后, 对能够适应这些挑战和要求的一些潜在关键技术进行了探讨和展望。

关键词: 无线局域网; 毫米波; 中心化/云无线—光接入网; 分布式网络架构; 通信感知一体化

中图分类号: TN92/TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00354

Next-generation mmWave WLAN: vision and key enabling technologies

FAN Min¹, SHAO Siyuan¹, HE Chao³, WANG Xiang³, WANG Haiming^{1,2}

1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

3. Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China

Abstract: With the rapid development and wide applications of information and communication technologies, human production and life and social governance are evolving in the direction of digitizing, informatization, and intelligence. As one of the most widely applied wireless communication technologies, the wireless local area network (WLAN) needs to make further breakthroughs in the key performance such as data throughput, reliability, and latency and needs to add sensing functions and intelligence. The huge frequency resources of the millimeter wave (mmWave) band have injected new momentum into the development of WLAN. But the mmWave WLAN has also brought new technical challenges and requirements. Firstly, the WLAN development history was reviewed, and network structures, typical applications, development directions, and performance index requirements of WLAN in the future were summarized. Then, the characteristics of wireless channels in the mmWave band were given, and the new requirements and challenges for mmWave WLAN design were analyzed. Finally, some potential key technologies that may meet these challenges and requirements were discussed and prospected.

Key words: WLAN, mmWave, centralized/cloud wireless-optical access network, distributed network architecture, integrated sensing and communications

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2022-05-31

通信作者: 王海明, hmwang@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271133)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62271133)

0 引言

物联网技术的兴起为智能制造、智慧家居、智慧医疗等工业或医疗领域的发展提供了新范式^[1]。无线通信技术作为物联网的核心，是物联网终端实现万物互联的基石，尤其是在人口和终端相对密集的室内场景中，短距无线通信技术的性能直接决定了万物互联的广度和深度^[2]。同时，物联网技术从“万物互联”到“万物智联”的理念升级，给下一代短距无线通信提出了更高要求。

在过去的 25 年里，无线局域网(WLAN, wireless local area network)标准历经 6 轮更新换代，如今亦然成为众多网络接入技术中部署最广、效率最高的技术^[3]，最新一代的 Wi-Fi 6 基于 IEEE 802.11ax 协议，引入正交频分多址接入 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access) 和多用户多输入多输出 (MU-MIMO, multi-user multiple-input multiple-output) 等新技术^[4]，提供了更稳定的接入和更高的效率及速率。

当前的无线局域网仍具有较大的局限性，难以应对未来“万物智联”等新兴信息业务和应用场景。首先，信道带宽和传输速率不足，目前大规模商用的无线局域网均工作在厘米波频段，信道带宽较窄，难以支持密集通信场景中多用户大吞吐量的高速通信。其次，目前 IEEE 802.11ax 支持每个无线接入点 (AP, access point) 的接入设备数为 100^[4]，

为满足万物互联的需求，下一代无线局域网需要支持更大的连接数密度。此外，从“万物互联”到“万物智联”的转变需要无线局域网具有对环境的感知能力，具有智慧内生的特性，无线网络的智能化、智慧化是实现智慧家居、智能制造的关键^[5]。

毫米波 (mmWave, millimeter wave) 具有大带宽和强抗干扰能力，使得其在应对具有大流量需求的新兴无线通信场景具有巨大优势，能够支持数千兆传输速率的无线局域网^[6]。毫米波技术是近年来无线通信领域最受关注的研究领域之一，是未来无线通信向大容量、低时延、强安全方向发展的有力支撑^[7]，同时也能够保障无线通信系统实现高精度感知的能力^[8]。毫无疑问，毫米波是构建未来无线网络的关键，毫米波应用于无线局域网需要众多关键技术的支撑。毫米波固有的特性使得无线局域网在网络架构、硬件约束、信号处理和资源管理等方面都需要大幅度调整完善，毫米波无线局域网的部署面临巨大挑战^[9-11]。

1 无线局域网的发展历程

无线局域网已经成为人们日常生活的重要组成部分。从 1980 年 IEEE 802 课题被 IEEE 立项，1997 年首个无线局域网标准 IEEE 802.11 发布^[12]，到如今基于 IEEE 802.11ax 的第 6 代 Wi-Fi 成功商用，无线局域网的发展已经经历了 40 多年。IEEE 802.11 标准的发展历程及关键技术如图 1 所示。

首个无线局域网标准 IEEE 802.11 采用红外、调

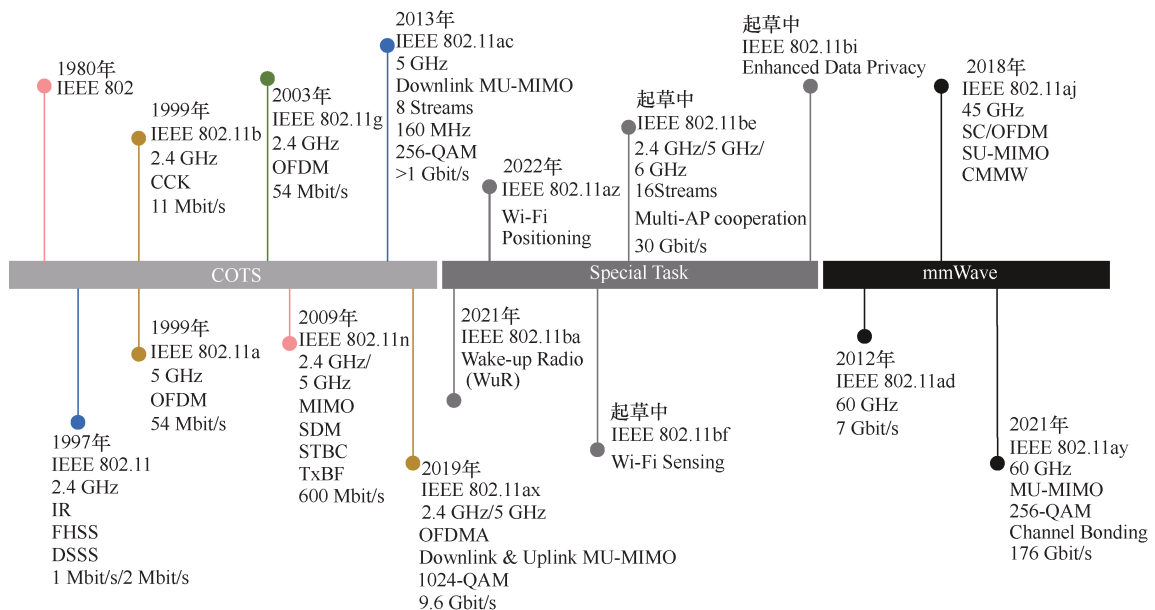


图 1 IEEE 802.11 标准的发展历程及关键技术

频技术和直接序列扩频 3 种物理层技术能够提供 2 Mbit/s 的最大传输速率和 100 m 的最大传输距离^[13]。但由于互操作性问题、成本问题以及缺乏足够的吞吐量，该协议未被广泛接受。

1999 年，两个分别工作在 2.4 GHz 和 5 GHz 频段的 IEEE 802.11b 和 IEEE 802.11a 先后推出，其中 IEEE 802.11b 引入补码键控，支持多种自适应速率选择，以降低错误导致的重传率^[14]。IEEE 802.11a 首次采用正交频分复用（OFDM, orthogonal frequency division multiplexing）技术^[15]，支持 54 Mbit/s 的传输速率，但最大传输距离仅为 50 m。IEEE 802.11a 需要采用 5 GHz 射频器件，导致成本较高，覆盖范围较小且工作频段与 IEEE 802.11b 不兼容而未得到广泛应用。工作在 2.4 GHz 并采用 OFDM 技术的 IEEE 802.11g 在 2003 年被推出并快速投入使用，保持了 54 Mbit/s 的峰值传输速率^[15-16]。

为了应对互联网和多媒体应用对无线局域网的传输速率和可靠性需求，IEEE 802.11n 引入了多输入多输出（MIMO, multiple-input multiple-output）技术，最多可传 4 个空间流的空分复用（SDM, spatial division multiplexing）、空时分组码（STBC, space-time block coding）和发射波束成形（TxBF, transmit beamforming）实现了 600 Mbit/s 吞吐量，并且能够兼容 IEEE 802.11a/b/g^[17]。

IEEE 802.11ac 最大可用信道带宽达到 160 MHz，采用 8 个 MIMO 空间流和下行链路 MU-MIMO 以及 256 阶正交幅度调制（QAM, quadrature amplitude modulation）^[18]等技术，使理论最大传输速率达到 6.8 Gbit/s。

IEEE 802.11ax 是在 IEEE 802.11ac 优势的基础上构建的第 6 代 Wi-Fi，其通过应用 1024QAM、降低子载波间隔和基于调度的资源分配来提供 9.6 Gbit/s 的峰值速率。IEEE 802.11ax 采用 2.4 GHz 和 5 GHz 两个工作频段，并与 IEEE 802.11a/g/n/ac 高效兼容。IEEE 802.11ax 注重高密度部署场景下的用户体验性能，采用 OFDMA 和上下行 MU-MIMO 技术，根据用户需求分配带宽，为多位用户提供相同的体验^[4]。

IEEE 802.11be 是目前最受关注的无线局域网物理层标准之一，有望成为第 7 代 Wi-Fi 的物理层标准。它支持 2.4 GHz、5 GHz 和 6 GHz 多频段的同时使用，支持 16 个空间数据流，实现 16×16 的 MU-MIMO，同时采用了空间复用、多 AP 协作和链路自适应机制，能够应对极高吞吐量需求^[19]。

传统的无线局域网都工作在较低频段，这些频段的频谱资源难以满足未来通信业务对速率、吞吐量的更高要求。毫米波频段带宽大，频率资源丰富，被应用于新一代无线局域网的开发，有着广阔的前景。目前，基于毫米波的 IEEE 802.11 协议主要有 IEEE 802.11ad、IEEE 802.11ay 和 IEEE 802.11aj，这些标准有望服务于各种大流量数据业务应用。

IEEE 802.11ad 工作在毫米波 60 GHz 频段，理论传输速度可达 7 Gbit/s^[20]。但由于毫米波的固有特性，在自由空间传播的距离很有限，隔墙处往往没有信号。在 IEEE 802.11ad 基础上发展形成了 IEEE 802.11ay，工作频段同样为 60 GHz。IEEE 802.11ay 单流链路速率可达 44 Gbit/s，借助 MIMO 和高阶调制技术，并发传输速率最高可达 176 Gbit/s，同时支持信道绑定和多用户 MIMO 技术^[21]，适用于要求高吞吐量、低时延的应用。

IEEE 802.11aj 是我国主导制定完成的首个无线局域网标准，采用 45 GHz 非授权毫米波频段工作，采用单载波通信架构和单用户 MIMO 技术，同时支持 OFDM 传输架构^[22]。45 GHz 频段在我国还处于非授权频段，该频段的应用较少，具有较大的应用前景。

从 IEEE 802.11 到 IEEE 802.11ax，借助 OFDM、MIMO、高阶调制等新兴通信技术，无线局域网的传输速率飞速增长，极大满足了互联网多媒体对高速通信的需求。但未来智能家居、虚拟现实/增强现实（VR/AR, virtual reality/augment reality）、全息传输等物联网应用不仅对无线局域网的性能提出了更高要求，同时要求无线局域网具有内生感知、内生智能、强安全等衍生功能，以此实现“万物智联”“数字孪生”的愿景。也因此衍生了许多针对未来复杂应用需求的 IEEE 802.11 标准，如针对无线局域网感知功能开发的 IEEE 802.11bf^[23]，具有强数据安全、强隐私性的 IEEE 802.11bi^[24]，用于定位的 IEEE 802.11az^[25]等。

2 毫米波无线组网架构

频率资源和带宽等方面的巨大优势将促使未来无线局域网朝毫米波频段不断演进，然而毫米波频段通信与传统频段通信存在根本差异，同时各种新兴应用对无线局域网提出了更高更丰富的要求。从顶层网络架构至底层通信技术，毫米波无线局域网都需要进一步演进。

对于网络架构而言,首先需要解决毫米波带来的覆盖性能退化,这要求较多的 AP 部署,但同时加深了多 AP 之间互扰,也造成了用户服务区域的频繁切换,因此需要在设计新型的网络架构同时兼顾覆盖和干扰管理性能。并且未来无线局域网必须兼容现有工作模式,这意味着未来无线局域网具备多频段工作特性,多频段网络架构的兼容性及互惠性需要进一步开发。

2.1 全光组网 C-WAN 架构

得益于固定网络接入技术的兴起与发展,由光纤到户 (FTTH, fiber to the home) 发展到光纤到屋 (FTTR, fiber to the room) 的技术理念为毫米波室内覆盖提供了有力手段^[26]。下一代短距无线通信将在 FTTR 基础上进一步演进发展光纤到无线电 (FTTRadio, fiber to the radio) 技术,以多 AP 部署的方式解决毫米波室内覆盖问题。

2022 年中国宽带发展联盟推出《FTTR 光纤到房间白皮书 (2022 年)》,提出了 FTTR 新一代家庭千兆中心化/云无线—光接入网 (C-WAN, centralized/cloud wireless-optical access network) 架构,以建设千兆光网的方案应对当前大流量需求猛增形势^[27]。C-WAN 架构主要由主设备、从设备和室内光纤分布式网络构成,该架构以光纤点到多点的物理拓扑结构为基础,在接入点位置部署主设备,主设备往局端连接光线路终端 (OLT, optical line terminal) 无源光网络 (PON, passive optical network) 接口。C-WAN 以主设备为中心,支持多个从设备连接,从设备可根据业务布局延伸至用户所需部署的区域,为每个区域提供网络覆盖,实现高质量网络。

在 C-WAN 架构中,主设备进行信息搜索和决策,对光和 Wi-Fi 传输进行中心化控制,协同统一光链路和空口链路的资源分配,从而解决目前家庭组网技术间缺乏有效协同、空口存在严重无序竞争的问题。C-WAN 根据不同终端网络要求的差异,能够按需分配网络资源,提升网络资源利用率的同时,实现动态功耗控制,达到绿色节能的目的。新一代 FTTR 基于 C-WAN 架构为带宽、连接、时延、漫游、绿色安全和运维管理方面的业务体验提供保障。

2.2 去中心化分布式网络

传统分布式网络控制不能很好地扩展,并且随着部署的 AP 数量增多,时延将显著增加^[10],分布式控制通常也有很高的控制开销。需要集中和跨层的控制机制来充分发挥毫米波通信的潜力。

FTTRadio 分布式网络架构可以借鉴软件定义网络的思想,将控制平面和数据平面分离,将网络的控制功能抽象为一个逻辑上集中的控制器^[28]。

新型的短距无线通信 FTTRadio 分布式网络架构如图 2 所示。FTTRadio 分布式网络架构根据场景物理需求,部署多个工作在毫米波频段的 AP。基于分布式架构的工作原理,这些 AP 的射频单元 (RU, radio unit) 与基带处理单元在物理空间上分离,利用高稳定、高吞吐量的光纤以分布式数字光载无线电 (DROF, digital radio over fiber) 的形式实现基带到射频的连接,所有 AP 的基带信号在同一数字处理单元 (DPU, digital processing unit) 进行协同处理,DPU 同时与互联网连接从而与外部网络进行信息交互。该短距无线通信网络架构综合了毫米波技术、全光组网和分布式网络的性能优势,以协同处理的方式解决毫米波传输特性带来的漫游和干扰问题,同时获取协同通信和协同感知带来的性能提升。

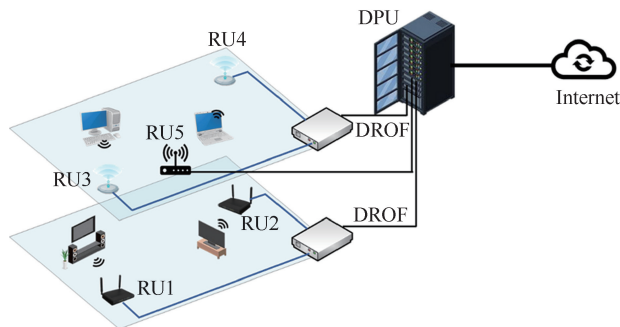


图 2 FTTRadio 分布式网络架构

这种毫米波与 FTTR 结合的接入方式使得毫米波可以全面高效覆盖每个房间,在实现大容量通信同时保障有效覆盖。同时,毫米波频段的高穿墙损耗反而为消除跨房间无线通信系统间的干扰创造了有利条件,从而为大通量零干扰无线接入建立基础。

2.3 异构网络

未来毫米波无线局域网具有多频段工作特性,并且未来无线局域网将与移动蜂窝网络、个人局域网等无线网络共存,这使毫米波网络构成了一个典型的异构网络^[29]。

对于异构网络,各种无线网络深度融合,多种无线网络之间可以取长补短,能够综合发挥各自的优势,不同类型网络之间的交互和协作成为探索异构网络潜力的关键,在移动性管理、垂直切换、小区间干扰管理等方面存在较大潜力。异构云无线接入网在频谱和能量效率性能提升方面存在较大增

益，多 AP 协作异构网络架构下，能够实现基于云计算的多点协同收发、大规模协同多天线、基于云计算的协同无线资源管理、云融合场景下基于云计算的自组织网络^[30]。毫米波无线局域网及其他无线网络深度融合组成的异构网络能够实现更优良的感知和通信性能。

3 典型应用

信息通信技术的进步推动了社会的发展，同时诱发了社会对信息智能化时代的新畅想，未来社会希望在家庭、办公园区、工程、医院等场景中实现全息传输、云办公、VR/AR 等业务，这些短距通信场景的新需求对无线局域网提出了更高、更丰富的要求。

3.1 云办公及全息传输

面向未来社会的远程办公和视频会议等新兴应用要求未来无线局域网能够通过全息通信构建办公场景的虚拟投影，能够使用模拟交互语言等^[31]。未来无线局域网需要支持超低时延、高带宽，具有协调、同步和动态适应多个数据流的能力。

3.2 VR/AR

VR/AR 是增强用户对网络虚拟世界视觉感知的新兴技术，使用户能够沉浸式体验无线网络构建的虚拟世界，创造了下一代娱乐、游戏的新范式。无线局域网是实现交互式 VR/AR 的主要途径，为实现用户沉浸式体验，无线局域网需要提供超高可靠、超低时延和无感漫游的技术性能^[32]。

3.3 超高清视频传输

近年来，影视传媒高速发展，人们对观影体验质量的要求逐渐提升，这需要提升传输视频的分辨率，8K 分辨率的视频能够在较大尺寸屏幕上消除

肉眼颗粒感。但由于一小时 8K 视频流将近 10 GB，超高清视频传输需要更强的信息密度承载能力^[33]，这要求无线局域网需要具有更大的信道带宽和传输速率。

3.4 智能机器人

随着“工业 4.0”的提出和不断深化，全球制造业正在向着自动化、集成化、智能化及绿色化方向发展，智能机器人的应用也越来越广泛。在智能工业、智慧医疗领域和家庭、办公园区场景中，智能机器人都具有广阔的应用前景^[34]。机器人的服务质量取决于网络性能的稳定程度、时延、抖动和丢包率^[35]，为保证智能机器人的精确移动和控制，需要无线局域网具有较高的定位精度^[36]。具有情感交互等功能的服务型智能机器人则需要无线网络对周围环境具有较强的感知能力，如感知人类的情绪变化、身体状况等^[37]，以此为基础提供更优质的服务。

3.5 高密度场景通信

高密度用户场景的通信是短距无线通信领域最困难的场景之一。由于人群密集，小范围内通信需求较大，对无线局域网的吞吐量有较高要求^[38]。若 AP 部署较少，则信号被大量阻挡，信号范围覆盖较弱，同时也不能满足较大通信吞吐量需求。若 AP 部署较多，则 AP 覆盖范围重叠严重，从而造成较大的同频干扰问题。

4 性能指标

为满足上述新兴业务需求，基于 FTTRadio 分布式网络架构，下一代毫米波无线局域网需要向更高速率、更低功耗等通信性能演进，同时具备智能感知和交互的能力。无线局域网性能指标对比见表 1。

表 1 无线局域网性能指标对比

标准	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax	IEEE 802.11ad	下一代毫米波 WLAN
工作频率/GHz	2.4	2.4/5	5	2.4/5	60	45/60
最大信道带宽/MHz	20	40	160	160	2 160	>4 000
峰值速率/(bit·s ⁻¹)	54 M	600 M	6.8 G	9.6 G	7 G	>100 G
频谱效率/(bit·s ⁻¹ ·Hz ⁻¹)	2.7	15	40	60	6	10
能量效率/(bit·J ⁻¹)	/	/	/	/	/	10 ⁹
连接密度(devices·AP ⁻¹)				10 ²	/	10 ³ ~10 ⁴
时延/ms	/	/	30	20	/	<1
定位精度/mm	/	/	/	/	/	<5
感知准确度	/	/	/	/	/	>99.9%

4.1 极高峰值速率

为满足未来大容量业务需求,未来毫米波无线局域网需要达到超过 100 Gbit/s 的峰值速率和 10 Gbit/s 的用户体验速率。

4.2 超低时延

时延的高低极大地影响用户体验。不同应用场景对时延的要求不同,4K/8K 高清视频传输的时延需求为 15 ms^[33],VR/AR 要求无线传输时延低于 7 ms^[32],全息传输需要低于 5 ms 的传输时延^[31],用于精密控制的智能机器人需要小于 1 ms 的时延^[35]。

4.3 高连接密度

未来智能家居、办公园区等应用场景中,人-机-物之间的信息交互需要下一代无线局域网能够支持更大的连接密度。借助大带宽、大规模 MIMO 和多 AP 协同等技术,未来毫米波无线局域网期望达到每 AP $10^3 \sim 10^4$ 的连接密度。

4.4 超高频谱效率

毫米波频段实现高阶调制的难度较大,目前基于 60 GHz 频段工作的 IEEE 802.11ad 调制阶数低于 64,频谱效率较低^[19]。下一代毫米波无线局域网期望实现毫米波大规模 MIMO、高阶调制等技术以保证较高的频谱效率,在毫米波工作频段达到 10 bit/s/Hz 量级。

4.5 大信道带宽

信道带宽是传输速率提升的关键,同时决定了无线局域网能达到的最低传输时延。毫米波频段的 IEEE 802.11 标准定义了超过千兆的信道带宽,相较于传统的百兆带宽具有极大提升。

4.6 高能量效率

密集的 AP 部署和超大规模连接使得无线网络能耗急剧上升,业务需求带来的巨大能耗成为制约无线网络发展的关键。未来毫米波无线局域网需要从基带信号处理、射频器件消耗、功率分配等方面全方位提升能量效率,实现清洁、绿色的无线网络。

4.7 高定位精度和感知准确度

除了传统通信技术指标,未来众多业务对无线通信系统的内生感知能力提出了新要求。通信感知一体化是未来无线通信系统的重要组成部分,未来无线局域网需要在保障通信性能的前提下尽可能挖掘感知能力,以应对定位、健康检测、环境监测等新型感知业务。下一代无线局域网将具有较高的定位精度、感知准确度和较低的误报率。

5 信道特性及关键问题

毫米波频段存在较宽的非授权频段,频谱资源丰富,毫米波频段中的大量频谱能够大幅提高通信系统信道容量,被认为是千兆短距无线通信系统的有力解决方案^[9]。毫米波技术是未来无线局域网实现应对 VR/AR、高清视频传输等大流量业务应用的关键。毫米波频段新信道特性为下一代无线局域网带来了重要的性能增益,大带宽特性使下一代毫米波无线局域网能够实现大容量通信、高精度感知^[39],窄波束和方向性提供了天然的保密性和抗干扰通信^[40],同时能够有效提升感知的角度分辨率^[36],短波长特性使得基于毫米波传输的射频天线及链路更容易实现低成本、小型化设计。

此外,新毫米波信道特性也为毫米波无线局域网系统的设计提出了新的挑战。毫米波系统需要具有前述新的架构特性,信号处理、射频天线及电路设计也与传统较低频段工作的无线局域网存在明显的差异^[11]。信道模型是无线通信与感知信号处理的基础,毫米波频段与传统 2.4 GHz 和 5 GHz 频段存在明显差异,传统信道模型不再适用于下一代毫米波无线局域网的研究,同时信道特性是毫米波无线局域网 AP 部署和系统优化的重要支撑^[41]。因此,在对毫米波无线局域网关键技术的研究探讨之时,首先需要在毫米波频段开展信道特性研究。

5.1 毫米波信道特性

无线传播环境对不同波长信号的影响存在差异,从而导致毫米波信道与传统 Sub-6 GHz 信道不同。传统低频段信道模型参数主要分为大尺度传播特性参数和小尺度传播特性参数,大尺度传播特性参数主要包括平均路径损耗、路径损耗因子和阴影衰落,用于衡量信道的路径损耗和阴影衰落;小尺度传播特性参数主要包括均方根时延扩展、角度扩展、多普勒频移、分簇、多路径时延扩展等,用于衡量信道的时频空选择性衰落^[41]。

对毫米波信道特性的研究主要继承了低频段信道研究方法,但有与低频段信道不同的传播特性参数,且毫米波信道特性与通信场景密切相关。目前,对诸多典型室内环境,针对 IEEE 802.11 标准中涉及的 60 GHz 和 45 GHz 毫米波频段的信道特性测量及研究已广泛展开,包括毫米波大/小尺度传播特性、毫米波室内传输的准光学特性、极化对毫米波传输的影响等^[42-46]。此外,毫米波对障碍物

的敏感性较高，与低频段信道特性有明显差异，且毫米波信道测量存在样本数据获取困难等诸多难题，为此，一些对动态室内环境中毫米波信道特性、信道相似性度量以及新型信道测量与建模方法的研究被逐步展开^[47-50]。

相对于 60 GHz 毫米波频段的信道特性的丰富研究，目前对 45 GHz 中国毫米波（CMMW, China millimeter wave）频段的信道测量活动相对较少。对 MIMO 信道、极化信道、动态信道的测量与建模活动也主要集中在 Sub-6 GHz 频段和 60 GHz 频段^[51]，45 GHz 频段相关研究还有待展开与深入。此外，毫米波高传输损耗使得室内 AP 部署区域密集化，AP 的架设位置和 AP 之间的干扰特性，以及室内房屋材料特性、结构、门的开启状态等对信道特性影响的研究亟待展开。同时，跨频段跨场景信道相似性、普适信道模型^[48,52]及信道参数提取方法^[53]等能够为毫米波无线局域网与低频段无线局域网、个域网、移动通信网等无线组网的深度融合提供重要的信道特性及信道模型支撑。

5.2 关键问题与挑战

虽然毫米波大带宽特性对无线通信容量方面有着巨大增益，但毫米波路径损耗、穿透损耗和大气衰减较高，多径分量较少，衍射能力较弱，对障碍物的阻挡很敏感，具有准光学特性。这些毫米波特性和对下一代毫米波无线局域网提出了新的要求和挑战。

首先，毫米波自由空间传输损耗、穿透损耗较大，不利于无线信号覆盖。为保证有效的无线覆盖，毫米波无线局域网的 AP 部署密度将急剧增加。部署多个 AP 时，需要考虑多 AP 协作，从而保证有效的干扰管理、空间复用、稳健的网络连接和良好的服务质量等^[10]。然而，在这种密集部署的多 AP 工作方式下，通信用户的跨区域移动会导致 AP 频段切换，从而影响通信质量，因此需要考虑多 AP 协作下用户无感漫游的实现。

定向波束成形技术是保障毫米波无线局域网传输距离和覆盖范围的关键推动技术^[54]，其需要设计高增益毫米波定向天线^[55]、高发射功率和灵敏度的收发机^[9]，需要借助毫米波频段的波束成形技术^[40]。

波束成形同时使得毫米波传输具有窄波束特性，因此在提升传输距离的同时还能够减轻相邻 AP 并发通信造成的相互干扰^[9]。但由于定向传输，第三方节点无法执行载波侦听，从而产生耳聋问

题，需要借助介质访问控制层的协调机制进行并发传输以大大提高网络容量^[56]。用户的移动性，使得收发机的相对位置不断改变，为了保证通信质量，需要使用户和 AP 之间的定向波束指向彼此，这需要复杂度较低、快速的波束训练和追踪方法^[57]。

天线阵列需要以点可控的方式使其波束可以指向任何方向并在该方向实现高增益，同时也在所有其他方向提供非常低的增益^[10]。高发射功率需求和毫米波巨大的带宽会导致功率放大器（PA, power amplifier）出现严重的非线性失真^[58]，实现毫米波 PA 的线性化是毫米波电路设计的关键。此外，相位噪声和 IQ 失衡也是射频集成电路面临的具有挑战性的问题。

为了保证毫米波无线局域网的覆盖范围，同时兼容现有商用 Wi-Fi 标准，未来无线局域网需要毫米波系统与传统频段系统共存，因此对多频段工作的异构网络进行研究和探讨也是毫米波无线局域网发展的关键^[59]。

其次，毫米波频段室内传输，在大多数场景下多径分量较少，呈现明显的信道稀疏性。这种稀疏特性可以用于信道估计和均衡以及预编码器/组合器设计中^[11]，同时这使得具有窄波束特点的毫米波无线局域网具有较强的空间复用潜力^[9]，但这也使得 MIMO 预编码的分集增益较低^[60]。毫米波频段基于多 AP 协作的多用户 MIMO 预编码及波束成形还需要进一步研究。

同时，毫米波频段衍射能力较弱，对障碍物的阻挡很敏感，加之多径分量较少，使得毫米波通信存在较大的阻塞问题^[10]。且随着用户设备向服务区边缘移动，链路阻塞概率几乎呈线性增加。需要利用反射、中继或多跳等物理层和网络层方法来保障网络连接的稳健性。

毫米波无线局域网需要借助高功率的发射机和密集的 AP 部署来增益区域覆盖和信号传输能力，但这也导致能耗急剧上升。毫米波频段的无线通信系统的能量效率较低，为顺应绿色、清洁的发展理念，同时降低成本，需要提升能量效率^[61]。同时，通信业务和场景要求未来毫米波无线局域网具有较强的智能和感知能力，毫米波通信、感知和人工智能的集成将为未来毫米波无线局域网提供重要新动能。通信和感知信道特性^[62]、射频电路的智能设计^[63]、通信和感知的智能信号处理^[36]都是未来毫米波无线局域网研究的关键。

6 关键使能技术

毫米波的大容量特性为下一代无线局域网应对超大数据量需求带来了希望,同时通信频段和感知频段逐渐靠拢的趋势促进了通信感知一体化的发展,结合新兴人工智能技术,未来毫米波无线局域网有望实现具有内生感知、内生智能、能够承载超大数据流量的无线网络。需要借助一些新兴关键技术将毫米波技术等转化为实际生产动能,同时解决由此带来的一些关键问题。

6.1 毫米波电路及天线设计

射频电路及天线是无线通信系统的关键组成部分,能够实现基带信号和电磁信号的互相转换,并进行电磁信号的收发过程。与传统工作在 Sub-6 GHz 频段的射频电路系统不同,由于较高的载波频率和较大的带宽,毫米波电路元件及天线的设计存在诸多技术挑战^[58]。

6.1.1 毫米波电路

毫米波的波长短,毫米波电路的性能对制造加工产生的误差更敏感,使得毫米波电路的鲁棒性设计更加困难^[64]。毫米波压控振荡器难以实现宽带频率调谐,毫米波压控振荡器产生的本振功率难以实现大功率^[64],这使得毫米波混频器需要具有较大的转换增益才能实现稳定的频率转换,但需要考虑折衷混频器线性度和功耗。

低噪声放大器(LNA, low noise amplifier)需要保证良好的噪声系数和线性度,同时尽可能提高增益,单级毫米波 LNA 难以满足性能要求,往往需要多级 LNA 级联,这导致了更大的设计难度和更高的成本。此外,毫米波电路性能对加工误差更敏感,使得毫米波频段 LNA 的优良性能获取更加困难^[63]。

PA 是毫米波射频系统的关键,为了保证信息正确传输,需要具有足够的线性度,同时又要具有较高的输出功率和效率,以补偿毫米波带来的高路径损耗。此外,作为无线通信系统最主要的耗能器件,PA 的功率效率极低,如何有效提升毫米波 PA 的功率效率对绿色通信理念的实现极为重要。因此,高性能集成的毫米波射频芯片设计较难。

6.1.2 毫米波天线

毫米波高损耗特性、窄波束需求等对毫米波天线设计提出了更多更高要求。毫米波天线需要有较大的增益和定向性,同时必须避免在不需

的方向上出现大波瓣。毫米波无线局域网需要电子可控天线阵列^[10],且阵列规模较传统无线局域网更大^[54],以应对高增益和波束成形的需求。大规模天线阵列的集成封装需要避免人为和环境因素对方向图等性能的影响,天线元件之间的耦合必须最小化^[54]。同时,天线小型化、低成本设计也是未来毫米波天线研究的重点。

目前,针对毫米波频段的天线和电路研究发展迅速,逐渐趋于成熟。但在功能的融合性设计上有待挖掘,毫米波电路、天线集成和一体化设计方法有待拓展^[65]。此外,由于在毫米波无线局域网中 AP 部署密集,多 AP 之间的协作能够有效增强无线网络各方面的性能,分布式架构对天线设计的增益还有待研究。

6.2 基带信号处理

毫米波的应用给电路和天线设计带来了新的挑战,高性能的毫米波电路实现较难,高增益天线需要更大的阵列规模。这些毫米波硬件限制为波束成形、波束训练等基带信号处理带来了新的挑战。

6.2.1 波束成形

在传统的 MIMO 系统中,每路天线都与相应的射频链路连接,波束成形主要由基带信号处理实现^[11]。在毫米波 MIMO 系统中,天线阵列规模上升,这种连接使得由射频电路带来的成本上升^[66],同时紧随天线连接的射频电路在毫米波频段极易产生互耦效应,导致系统性能退化^[60]。因此毫米波系统的射频链路数量要小于天线数量,这使得基于 MIMO 的波束成形策略需要相应调整,此外,由于波束方向性强,毫米波频段缺乏多径,基带预编码的分集增益较低。对此,模拟波束成形和基于模拟和数字相结合的混合波束成形结构被提出。

与模拟波束成形相比,混合波束成形支持空间复用的多流传输,能够实现与全数字波束成形接近的频谱效率,同时大大降低了硬件复杂性,被认为是毫米波系统中收发器结构的有希望的候选者^[66]。

由于毫米波频段展现的稀疏性以及和传统信道的差异,对给定信道状态信息,需要新的算法来设计单独的预编码器。同时,毫米波大带宽信道特性对基带信号处理也提出了新挑战,多 AP 协作对波束成形的性能挖掘也有待研究。

6.2.2 波束训练

毫米波的窄波束特性及用户的移动性可能导致在无线通信过程中频繁地出现波束切换^[54],为防

止通信中断，实现高速和高质量的数据传输，需要在定向数据通信前执行波束训练。现阶段波束训练主要通过穷举波束搜索方法来找到最佳的发射和接收波束对^[67]，但该方法效率较低，会产生较大的时延，实现高效率波束搜索是波束训练的关键课题。

在 IEEE 802.11ad 协议中，提供有限数量的关联波束成形训练时隙进行波束训练，其中每个时隙仅允许一个用户同时占用。在这种机制下，在密集用户场景下时隙竞争碰撞的概率非常大，从而导致波束训练失败，因此还需要降低波束训练过程中的碰撞概率^[68]。

在多用户和多 AP 协作机制下的波束训练研究还较少^[69]。同时，通信感知一体化技术的研究使得通信和感知相辅相成，利用感知信息进行波束预测和追踪的方法受到广泛关注^[36]。此外，目前针对 IEEE 802.11aj 中国毫米波频段的波束训练协议研究亟待展开。

6.2.3 分布式 MIMO 和多 AP 协作

由于室内毫米波无线通信系统的传输距离较短、覆盖范围较小、穿透能力弱，毫米波短距离传输对路径阻塞的敏感性很高，因此毫米波无线局域网需要在室内进行多 AP 部署^[59]。基于毫米波的多 AP 部署能够极大提升无线网络的吞吐量，同一区域下能够支持更大规模设备连接。

分布式 MIMO 的天线单元处于不同的地理位置，将无线通信系统的天线单元与处理单元分离，其远端射频终端通过光纤与 DPU 连接，通过 DPU 进行 AP 间的联合信号处理，形成多用户分布式 MIMO 系统^[70]。这种分布式 MIMO 架构能够与毫米波多 AP 密集部署的需求契合，以分布式 MIMO 架构形成的多 AP 协作技术有望在通信和感知信号处理、干扰管理、无感漫游、资源分配等方面带来新的性能增益。

分布式 MIMO 架构无线局域网可以在同时-同频条件下为所有用户提供服务，无须进行传统意义上的小区间频率规划，能够解决毫米波架构下的同频干扰问题，使系统资源被全维度动态利用，能够显著改善资源配置的灵活性，大幅度提升无线资源利用率。

同时，多 AP 协作形式能够增强毫米波波束成形训练的性能，能够融合多个 AP 获得的感知数据，提升感知性能^[71]，未来需要进一步开发多 AP 协同对毫米波系统通信和感知性能的提升。多 AP

协作与基于云的无线接入网、异构网络、软件定义光载无线网络等网络架构的融合增益也待进一步研究^[30,59]。

6.2.4 载波聚合

增加带宽是提升系统容量的重要方法，毫米波的大带宽特性能够使无线局域网容量得到巨大提升。将多个连续或非连续的分量载波聚合，可以获取更大的传输带宽，从而进一步提升峰值速率和吞吐量。这种载波聚合 (CA, carrier aggregation) 方法作为关键技术之一被用于 LTE-A 中将单用户可用的带宽从 20 MHz 扩大到了 100 MHz^[72]。

载波聚合分为连续载波聚合和非连续载波聚合。连续载波聚合的复杂度、成本和能量效率比非连续载波聚合更优，更容易实现资源分配和管理算法。然而，在毫米波频谱分配政策下，连续大带宽的载波聚合难以实现，因此非连续载波聚合提供了一种可行方案。

对基于毫米波传输的下一代短距无线通信而言，无线信道特性和传输性能，如传播路径损耗和多普勒频移，在不同信道频段变化很大。由于非连续 CA 支持大频率范围内多个分离载波上的数据传输，因此需要在聚合算法的设计中充分考虑信道的频率选择性。为了支持非连续 CA 方法下的宽带数据传输，未来无线局域网载波聚合设计时，还应开发和实施多维资源分配和管理方案，以自适应地调整不同分量载波的传输功率、调制和编码方案。同时，需要考虑毫米波对载波聚合的影响^[73]。

6.3 通信感知一体化

随着通信技术、物联网和计算机等相关领域的快速发展，生活方式的智能化演进是当今时代的重要变革之一。智慧家居、智能制造等众多新兴应用要求下一代无线局域网具有高质量的无线通信的同时，具备对周围环境高精度、鲁棒性强的感知能力。

Wi-Fi 部署广泛、使用成本低，使得基于 Wi-Fi 的感知成为目前室内场景下通信和感知进行融合的主要途径^[39]，在智慧家居、智慧医院、智慧超市等场景中存在巨大的应用价值，结合全息、VR 等技术能够推动娱乐、汽车、健康医疗、教育等方面的应用^[36]。

目前，基于 Wi-Fi 的通信感知一体化研究主要集中在基于 Wi-Fi 的感知应用^[37]，诸多基于商用 Wi-Fi 平台的家庭类感知应用被开发，如生命体征

检测、跌倒检测、入侵检测。通信和感知的深度融合进程需要考虑通信和感知性能的折衷、通信感知一体化的波形设计、感知与通信的优势互补等^[36]。

现有基于无线局域网的通信感知一体化研究集中在 Sub-6 GHz 频段和平台，基于毫米波的下一代无线局域网将提供更大的带宽、更细粒度的信道状态信息等，将为基于通信系统的感知带来更广阔的发展空间^[39]。基于多 AP 协作的分布式 MIMO 架构中，通信感知一体化技术能够助力分布式 MIMO 波束成形以及室内多 AP 的干扰管理等通信问题的解决。

6.4 AI 使能技术

为应对“万物智联”等应用需求，包括无线局域网在内的未来无线网络需要具备内生智能特性。未来无线局域网从获取数据的感知阶段到处理数据、传输数据的通信阶段，再到依据感知、通信数据进行处理的行为阶段都需要具备高度的智能化、智慧化，人工智能技术将深度融合到无线局域网的架构、算法中，从而产生智慧内生的无线局域网^[25]。

以深度学习、人工神经网络为代表的机器学习方法，在通信领域的诸多问题中都具有较大的应用前景。人工智能和机器学习能够解析海量数据，构建无线网络流量运行地图，以此对流量需求进行预测。将机器学习引入无线局域网的资源管理中，可用于解决小区关联和无线接入技术选择、频率分配、频谱管理、功率控制和智能波束成形等问题。在信号检测、信道编/解码、信道建模等无线通信领域，机器学习方法都发挥了重要作用。机器学习辅助优化射频电路和射频天线设计的方法，也在各自的领域产生了诸如大幅度降低设计时间开销的增益。

AI 技术对无线局域网的感知同样重要。基于数据的感知从测量数据出发，利用机器学习方法学习隐藏在数据中的特征，以达到预测、识别或分类的目的^[37]。基于数据的方法不依赖于空间上下文，不需要大量的信号处理，更适合处理识别和检测场景中的一些问题^[37]。

基于深度学习等人工智能技术，下一代无线局域网在网络架构、通信和感知性能上，都将具备高度智能化，从而顺应物联网等新兴应用对智能化的需求。

6.5 能量节约技术

毫米波无线局域网需要借助大量的 AP 部署增强无线覆盖能力，同时未来巨大的流量需求和连接

设备大规模增长，将使得未来通信设施和终端设备的能耗急剧提升^[61]，大规模阵列天线和射频链路数量的增益也使得未来毫米波链路的能耗急剧上升。为顺应绿色、清洁的发展理念，同时降低成本，需要提升毫米波无线通信系统的能量效率。基站终端是无线通信系统的主要能耗部分，其中信号处理、电源供电和功率放大器的能耗占据总能耗的 80% 以上^[74]。

6.5.1 唤醒无线电

唤醒无线电 (WuR, wake-up radio) 技术能够使系统低功耗运行，提升电池使用寿命，从而降低无线局域网中节点的能耗，是提升无线通信系统电源能量效率的关键。WuR 利用主从两级无线电接收模块，使能耗较大的主要接收模块在空闲时处于休眠状态，从而降低能耗。

WuR 技术目前常用于无线电传感器中，如工业传感器、控制领域和安保应用领域。基于 WuR 的 Wi-Fi 传输在 IEEE 802.11ba 中被首次提出^[75]。目前毫米波频段 WuR 接收机主要集中在 IEEE 802.11ad 的 60 GHz 工作频段，45 GHz 中国毫米波频段的研究还有待展开，如何开发用于下一代短距无线通信的 WuR 架构是降低未来无线局域网功耗，提升能量效率的重要途径。

6.5.2 PA 功率效率提升技术

在典型无线网络中，PA 的能耗占基站总功耗的 50%~80%^[74]，由于要保证功放线性区工作，目前 PA 功率效率较低，提升 PA 功率效率是提升无线通信系统能量效率的关键。

提升 PA 功率效率的途径主要有 3 种。一是降低输入信号峰值平均功率比 (PAPR, peak-to-average power ratio)，以使 PA 在线性工作提升输入信号平均功率，从而提升功率效率。OFDM 信号由于较高的 PAPR 难以满足未来无线局域网能量效率的需求，因此如何降低调制信号的 PAPR 是通信领域重要的课题之一^[76]；二是功放线性化技术，利用数字预失真等技术使 PA 工作在线性区，同时改善输出信号的线性度，以此兼顾功放的功率效率和输出信号的线性度，该方法是目前 PA 研制的主要措施，但该方法需要额外的硬件开销，能够提升的功率效率有限，且毫米波频段 PA 线性化技术实现难度较大^[77]；三是接收端非线性处理技术，发射端 PA 工作在功率效率较高的非线性区，且输出非线性失真的信号，在接收端利用功放非线性抵消 (PANC,

power amplifier nonlinearity cancellation) 或畸变信号重构 (RODS, reconstruction of distorted signal) 等方法对非线性失真信号进行重构, 接收端非线性处理技术可以在信号产生非线性分量后进行处理, 能够进一步地利用非线性区域, 获得比功放线性化技术更高的功率效率。

此外, 极化调制是一种新兴的提升 PA 效率的方法, 利用电磁极化特征的独立和正交性, 用极化状态承载信息。由于信息调制在载波信号经过 PA 之后, 在基于可调功率分配单元和可控相移单元的多极化调制方式中, 功率放大器的输入信号具有恒包络特性, 且极化状态与功率放大器输出信号是否畸变无关^[78], 因此能够使 PA 非线性工作, 从而极大提升功率效率。极化调制将信息调制过程转移至发射机功率放大之后, 从而能够避免功放非线性造成的信息丢失, 这类调制方法还有空间调制 (SM, spatial modulation) 和索引调制 (IM, index modulation) 等。

但为控制水平和垂直极化波的幅度比和相位差, 极化调制需要直接对功率放大后的射频信号实现可控功率分配和可控相位偏移, 毫米波频段的高阶高精度数字功率分配单元和相位偏移单元难以实现。实现高功率效率的数字域极化调制, 并将多种 PA 能效提升方法的优势结合是未来毫米波短距无线通信系统实现高能效的重要途径。

通过上述毫米波电路与天线设计、基带信号处理与能量节约技术等关键技术, 未来无线局域网有望充分利用毫米波带来的大带宽优势, 解决毫米波覆盖等问题, 同时借助 AI 和通信感知一体化, 实现内生感知、内生智能的无线网络。

7 结束语

下一代毫米波无线局域网将在现有商用 Wi-Fi 标准的基础上继续演进, 以满足智能化大数据时代的新兴业务需求。本文简要概述了商用 Wi-Fi 标准的发展历程并介绍了一些新兴且各具特色的 IEEE 802.11 标准, 介绍了一些可能在毫米波无线局域网中发挥重要作用的新型网络结构, 提出了基于毫米波和分布式架构的下一代毫米波短距无线通信 FTTRadio 分布式网络架构, 对未来典型业务需求及其对下一代毫米波无线局域网性能指标的要求进行了总结与分析, 分析了毫米波频段无线局域网室内场景新的信道特性, 以及新信道特性对毫米

波无线局域网系统设计的新要求和新的挑战。最后, 对现有为应对这些新要求和新的挑战所开发的一些潜在关键技术进行了介绍和总结。

拥有巨大带宽的毫米波能够缓解当前无线局域网频谱资源不足的问题, 同时通信感知一体化和人工智能技术的发展, 使得未来无线局域网能够满足物联网等新兴场景和应用对通信、感知和智能方面性能要求的提升。但毫米波伴随的高损耗特性导致毫米波无线局域网与传统低频段无线局域网有本质差异, 射频电路和天线的设计难度上升, 高损耗、大带宽、信道稀疏特性, 高增益、窄波束需求和由此带来的 AP 密集部署, 使得波束成形、波束训练等基带信号处理, 干扰管理、功率分配等资源管理方法与传统无线通信系统有较大区别。大流量、密集 AP 部署的形式使未来无线局域网电子设备密集度急剧上升, 可能导致无线局域网的能耗和成本急剧提升, 亟须对毫米波频段能量节约技术的研究。多 AP 密集部署和兼容低频段的需求, 使得毫米波无线局域网需要借助多 AP 协作式的分布式网络和异构网络的优势。因此, 下一代毫米波无线局域的研究需要基于多 AP 协作的异构分布式网络架构, 深度挖掘融合感知和人工智能技术的优势, 进一步提升毫米波基带信号处理、射频电路及天线设计、干扰管理、能量效率等方面的性能。

此外, 近年来众多新兴通信技术的发展如火如荼, 毫米波无线局域网还应该深入挖掘新兴技术在提升容量、效率等方面的潜力。例如, 边缘智能计算技术将计算密集型任务从中心化的云端向分布式的基站发展, 可能为解决未来超密集连接的无线局域网大规模通信和感知计算问题提供新范式; 可重构反射表面具有调控无线电磁环境的潜力, 为克服毫米波固有衰减、增强毫米波无线覆盖、提升无线局域网感知性能提供了新方向; 利用传统幅度、相位、时间、频率之外的维度进行信息承载的新型调制方法 (如利用电磁波轨道角动量实现信息承载) 有潜力提升无线局域网传统容量和频谱效率, 同时可能降低系统调控波束的复杂度。未来毫米波无线局域网继承和演进现有网络体系主体模式, 结合毫米波固有特点及技术, 同时借助多种新兴通信技术, 推动无线局域网重大变革, 形成全新的无线体系架构, 实现广域高速覆盖, 全网深度融合, 进一步助力智慧物联网社会的构建。

参考文献:

- [1] FAROOQ M U, WASEEM M, MAZHAR S, et al. A review on internet of things (IoT)[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2015, 113(1): 1-7.
- [2] DENIZ ULUSAR U, AL-TURJMAN F, CELIK G. An overview of internet of things and wireless communications[C]//*Proceedings of 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 506-509.
- [3] PAHLAVAN K, KRISHNAMURTHY P. Evolution and impact of Wi-Fi technology and applications: a historical perspective[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2021, 28(1): 3-19.
- [4] BELLALTA B. IEEE 802.11ax: high-efficiency WLANs[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(1): 38-46.
- [5] DENGLER S, AWAD A, DRESSLER F. Sensor/actuator networks in smart homes for supporting elderly and handicapped people[C]//*Proceedings of 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 863-868.
- [6] HONG W, HE S W, WANG H M, et al. An overview of China millimeter-wave multiple Gigabit wireless local area network system[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2018, E101.B(2): 262-276.
- [7] HONG W, JIANG Z H, YU C, et al. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications[J]. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, 1(1): 101-122.
- [8] SHASTRI A, VALECHA N, BASHIROV E, et al. A review of millimeter wave device-based localization and device-free sensing technologies and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(3): 1708-1749.
- [9] PARK M, CORDEIRO C, PERAHIA E, et al. Millimeter-wave multi-Gigabit WLAN: challenges and feasibility[C]//*Proceedings of 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [10] NIU Y, LI Y, JIN D P, et al. A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges[J]. *Wireless Networks*, 2015, 21(8): 2657-2676.
- [11] 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*, 2016, 10(3): 436-453.
- [12] KIM J, LEE I. 802.11 WLAN: history and new enabling MIMO techniques for next generation standards[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 134-140.
- [13] CROW B P, WIDJAJA I, KIM J G, et al. IEEE 802.11 wireless local area networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(9): 116-126.
- [14] IEEE 802.11 Working Group and Others. IEEE Std 802.11 b-1999[S]. *IEEE Standards*, 1999.
- [15] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee and Others. IEEE Std 802.11 a-1999 (R2003)[S]. *Supplement to IEEE Std*, 1999(802).
- [16] VASSIS D, KORMENTZAS G, ROUSKAS A, et al. The IEEE 802.11g standard for high data rate WLANs[J]. *IEEE Network*, 2005, 19(3): 21-26.
- [17] XIAO Y. IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(6): 82-91.
- [18] ONG E H, KNECKT J, ALANEN O, et al. IEEE 802.11ac: enhancements for very high throughput WLANs[C]//*Proceedings of 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 849-853.
- [19] DENG C L, FANG X M, HAN X, et al. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: new challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(4): 2136-2166.
- [20] NITSCHKE T, CORDEIRO C, FLORES A B, et al. IEEE 802.11ad: directional 60 GHz communication for multi-Gigabit-per-second Wi-Fi[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(12): 132-141.
- [21] GHASEMPOUR Y, DA SILVA C R C M, CORDEIRO C, et al. IEEE 802.11ay: next-generation 60 GHz communication for 100 Gb/s Wi-Fi[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(12): 186-192.
- [22] WANG H M, HONG W, CHEN J X, et al. IEEE 802.11aj (45 GHz): a new very high throughput millimeter-wave WLAN system[J]. *China Communications*, 2014, 11(6): 51-62.
- [23] RESTUCCIA F. IEEE 802.11bf: toward ubiquitous Wi-Fi sensing[EB]. 2021.
- [24] AU E, WILHELMSSON L, BAYKAS T, et al. Guest editorial: recent and future evolution of Wi-Fi[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2022, 6(2): 8-11.
- [25] LANANTE L, NAGAO Y, MASAYUKI K, et al. High precision localization protocol with diversity for 802.11 az[J]. *IEICE Technical Report; IEICE Tech. Rep.*, 2017, 117(349): 69-74.
- [26] HE C, REN Z X, WANG X, et al. Millimeter-wave wireless communications for home network in fiber-to-the-room scenario[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(4): 441-456.
- [27] 宽带发展联盟. FTTR 光纤到房间白皮书(2022年)[EB]. 2022. Broadband Development Alliance. FTTR fiber to room white paper (2022)[EB]. 2022.
- [28] KIM H, FEAMSTER N. Improving network management with software defined networking[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, 51(2): 114-119.
- [29] MEHRPOUYAN H, MATTHAIYOU M, WANG R, et al. Hybrid millimeter-wave systems: a novel paradigm for hetnets[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 216-221.
- [30] PENG M G, LI Y, JIANG J M, et al. Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 126-135.
- [31] HUANG Y K, ZHU Y W, QIAO X Q, et al. Toward holographic video communications: a promising AI-driven solution[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(11): 82-88.
- [32] QUALCOMM TECHNOLOGIES, INC. VR and AR pushing connectivity limits[EB]. 2018.
- [33] SUGITO Y, IWASAKI S, CHIDA K, et al. Video bit-rate requirements for 8K 120-Hz HEVC/H.265 temporal scalable coding: experimental study based on 8K subjective evaluations[J]. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 2020, 9(1).

- [34] WANG T M, TAO Y, LIU H. Current researches and future development trend of intelligent robot: a review[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2018, 15(5): 525-546.
- [35] WAN S H, GU Z, NI Q, et al. Cognitive computing and wireless communications on the edge for healthcare service robots[J]. *Computer Communications*, 2020(149): 99-106.
- [36] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [37] SHAO S Y, FAN M, YU C, et al. Machine learning-assisted sensing techniques for integrated communications and sensing in WLANs: current status and future directions[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2022(175): 45-79.
- [38] KAYA A Ö, CALIN D, VISWANATHAN H. On the performance of stadium high density carrier Wi-Fi enabled LTE small cell deployments[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 855-860.
- [39] HE Y, CHEN Y, HU Y, et al. Wi-Fi vision: sensing, recognition, and detection with commodity MIMO-OFDM Wi-Fi[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(9): 8296-8317.
- [40] KUTTY S, SEN D. Beamforming for millimeter wave communications: an inclusive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 949-973.
- [41] WANG H M, ZHANG P Z, 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.
- [42] ZHU J, WANG H M, HONG W. Large-scale fading characteristics of indoor channel at 45-GHz band[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015(14): 735-738.
- [43] WU X Y, WANG C X, SUN J, et al. 60-GHz millimeter-wave channel measurements and modeling for indoor office environments[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(4): 1912-1924.
- [44] KYRO M, HANEDA K, SIMOLA J, et al. Measurement based path loss and delay spread modeling in hospital environments at 60 GHz[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(8): 2423-2427.
- [45] SHEN Z M, WANG H M, YU C, et al. Measurement-based vehicle exterior channel characteristics in 45-GHz band[C]//*Proceedings of 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [46] MORAITIS N, CONSTANTINOU P. Indoor channel measurements and characterization at 60 GHz for wireless local area network applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(12): 3180-3189.
- [47] MALTSEV A, MASLENNIKOV R, SEVASTYANOV A, et al. Experimental investigations of 60 GHz WLAN systems in office environment[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1488-1499.
- [48] COLLONGE S, ZAHARIA G, ZEIN G E. Influence of the human activity on wide-band characteristics of the 60 GHz indoor radio channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(6): 2396-2406.
- [49] YI C, ZHANG P Z, WANG H M, et al. Multipath similarity index measure across multiple frequency bands[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(8): 1677-1681.
- [50] ZHANG P Z, YI C, YANG B S, et al. Predictive modeling of millimeter-wave vegetation-scattering effect using hybrid physics-based and data-driven approach[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(6): 4056-4068.
- [51] SALOUS S, FEENEY S M, RAIMUNDO X, et al. Wideband MIMO channel sounder for radio measurements in the 60 GHz band[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(4): 2825-2832.
- [52] WANG C X, BIAN J, SUN J, et al. A survey of 5G channel measurements and models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3142-3168.
- [53] YANG Y, LI Y, ZHANG W X, et al. Generative-adversarial-network-based wireless channel modeling: challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(3): 22-27.
- [54] ZHOU P, FANG X M, FANG Y G, et al. Enhanced random access and beam training for millimeter wave wireless local networks with high user density[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(12): 7760-7773.
- [55] YU X H, ZHANG J, HAENGGI M, et al. Coverage analysis for millimeter wave networks: the impact of directional antenna arrays[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(7): 1498-1512.
- [56] SINGH S, MUDUMBAI R, MADHOW U. Interference analysis for highly directional 60-GHz mesh networks: the case for rethinking medium access control[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(5): 1513-1527.
- [57] SUN X Y, QI C H, LI G Y. Beam training and allocation for multiuser millimeter wave massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(2): 1041-1053.
- [58] RAPPAPORT T S, MURDOCK J N, GUTIERREZ F. State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(8): 1390-1436.
- [59] SAKAGUCHI K, MOHAMED E M, KUSANO H, et al. Millimeter-wave wireless LAN and its extension toward 5G heterogeneous networks[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2015, E98.B(10): 1932-1948.
- [60] WEI L L, HU R Q, QIAN Y, et al. Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, 21(6): 136-143.
- [61] CHIH-LIN I, HAN S F, BIAN S. Energy-efficient 5G for a greener future[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(4): 182-184.
- [62] ZHANG Z Y, HE R S, AI B, et al. A general channel model for integrated sensing and communication scenarios[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(5): 68-74.
- [63] ARAFIN S, COLDREN L A. Advanced InP photonic integrated circuits for communication and sensing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(1): 1-12.
- [64] NIKNEJAD A M, HASHEMI H. *mm-wave silicon technology: 60 GHz and beyond*[M]. New York: Springer, 2008
- [65] HUANG Y X, YAN Y X, YU W, et al. Integration design of millimeter-wave bidirectional endfire filtenna array fed by SIW filtering pow-

- er divider[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(7): 1457-1461.
- [66] MOLISCH A F, RATNAM V V, HAN S Q, et al. Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 134-141.
- [67] DAI F, WU J. Efficient broadcasting in ad hoc wireless networks using directional antennas[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(4): 335-347.
- [68] SHEN L H, CHEN Y C, FENG K T. Design and analysis of multi-user association and beam training schemes for millimeter wave based WLANs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(7): 7458-7472.
- [69] BUZZI S, D'ANDREA C, FRESIA M, et al. Multi-UE multi-AP beam alignment in user-centric cell-free massive MIMO systems operating at mmWave[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(11): 8919-8934.
- [70] YOU X H, WANG D M, WANG J Z. Distributed MIMO and cell-free mobile communication[M]. Berlin: Springer, 2021.
- [71] LI G L, WANG S, YE K J, et al. Multi-point integrated sensing and communication: fusion model and functionality selection[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(12): 2660-2664.
- [72] YUAN G X, ZHANG X, WANG W B, et al. Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2): 88-93.
- [73] KIM T K. Effective beamforming technique for carrier aggregation of millimeter wave[J]. Asia-Pacific Journal of Convergent Research Interchange, 2019, 5(1): 21-30.
- [74] HASAN Z, BOOSTANIMEHR H, BHARGAVA V K. Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(4): 524-540.
- [75] DENG D J, GAN M, GUO Y C, et al. IEEE 802.11ba: low-power wake-up radio for green IoT[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(7): 106-112.
- [76] DAVASLIOGLU K, AYANOGLU E. Quantifying potential energy efficiency gain in green cellular wireless networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2065-2091.
- [77] YU C, LU Q Y, YIN H, et al. Linear-decomposition digital predistortion of power amplifiers for 5G ultrabroadband applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(7): 2833-2844.
- [78] GUO C L, LIU F F, CHEN S, et al. Advances on exploiting polarization in wireless communications: channels, technologies, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 125-166.

[作者简介]



范敏（1999-），男，东南大学信息科学与工程学院博士生，主要研究方向为无线通信高效传输技术。



邵思源（1998-），男，东南大学信息科学与工程学院硕士生，主要研究方向为通信感知一体化技术。



贺超（1989-），男，博士，华为技术有限公司毫米波 Wi-Fi 接入研究员，主要研究方向为毫米波通信系统设计与算法。



王祥（1982-），男，博士，华为技术有限公司家庭网络首席研究员，ITU-T SG9 WP2 副主席、SG9 Q9 报告人、SG15 Q4 编辑，主要研究方向为铜线接入和家庭短距无线通信技术研究与标准。



王海明（1975-），男，博士，东南大学信息科学与工程学院教授，主要研究方向为智能微波工程、电波测量与信道建模、通信感知定位一体化。