

# 毫米波无线通信：从短距离接入到广域覆盖

黄永明<sup>1</sup> 林敏<sup>2</sup> 王俊波<sup>1</sup> 王家恒<sup>1</sup> 何世文<sup>1</sup>

(1. 东南大学信息科学与工程学院, 南京, 210096; 2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210023)

**摘要:** 由于丰富的频谱资源, 毫米波通信已成为未来无线网络的重要研究方向。毫米波通信在短距离无线接入虽已取得明显进展, 但如何实现超高速广域覆盖还存在巨大的挑战。本文回顾分析了毫米波信道模型、毫米波多天线传输和毫米波通信网络构架等关键技术的国内外研究现状和发展趋势, 提出将毫米波无线通信与新兴的大规模多天线和大规模协作无线传输技术紧密结合, 并引入云计算和分布式存储处理等新方法, 形成密集分布毫米波大规模多天线无线通信新型网络构架, 解决毫米波移动通信的广域大容量无线覆盖和支持终端中高速移动等关键性技术的瓶颈。

**关键词:** 毫米波通信; 大规模多天线; 密集分布网络; 广域覆盖

中图分类号: TN911 文献标志码: A

## Millimeter Wave Wireless Communications: From Local Area Access to Wide Area Coverage

Huang Yongming<sup>1</sup>, Lin Min<sup>2</sup>, Wang Junbo<sup>1</sup>, Wang Jiaheng<sup>1</sup>, He Shiwen<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** Thanks to abundant spectral resource, millimeter wave (mmWave) communications have become an important research area. Though mmWave communications have achieved great progresses in WLAN, it faces huge challenges in realizing wide ultra-high throughput area coverage. The paper provides a comprehensive survey on mmWave channel measurement and modeling, multiple input and multiple output (MIMO) technology and network framework, and proposes a new densely distributed mmWave massive MIMO system by incorporating new technologies such as large-scale cooperative transmission, cloud computing and distributed storage, which is expected to realize ultra-high throughput wide coverage and support middle-high mobility in mmWave communications.

**Key words:** millimeter wave(mmWave) communications; massive MIMO; densely distributed network; wide area coverage

## 引言

通信信息网络已成为支撑经济繁荣和国家竞争力的基础, 并成为人类社会信息共享与协作的基础

平台。移动互联网正从人与人互联走向万物互联,是信息网络最富生命力的组成部分,也是带动信息通信产业发展的爆发性增长点。随着视频直播、高清电话会议、虚拟现实游戏和全息图像等高带宽新兴业务的快速发展,全球无线通信业务呈现爆发式增长。Cisco公司于2016年初发布白皮书指出<sup>[1]</sup>,2015年全球移动业务流量相比2014年增幅达到74%,相比2005年增长了近4000倍;同时预测到2019年全球具有移动连接功能的终端设备数量将达到115亿。在这种情况下,日益匮乏的频谱资源与持续增长的容量需求之间的矛盾凸显。未来移动通信网络除满足移动互联网业务的爆炸性无线流量增长需求之外,还将信息网络的应用范围从目前的人与人通信扩展至人机物协同通信、超密集链接物联网、车联网、工业互联网和无人机网络等更为广泛的领域,不同无线业务之间存在显著的差异性。因此,未来移动通信网络在传输速率、网络容量、流量密度、均匀覆盖、可靠性和实时性等指标方面必将面临更高的要求,在满足业务多样性方面也将面临严峻的挑战。另一方面,已有的4G移动通信系统在目前的网络构架和配置下各项性能已经基本发挥到极限,难以满足未来移动网络“巨容量、巨连接、广应用”为特征的发展需求,必须在移动通信技术的基本原理、系统构架和资源利用方式等方面孕育基础性和变革性突破。

在上述需求驱动下,未来无线移动通信发展需在网络密集化、空间资源挖掘和频谱扩展这3个方向进行变革已逐渐达成了共识。特别地,学术界和工业界近年来提出在广域覆盖的宏小区范围内大量部署低功率接入点组成超密集异构网络架构。该新型网络构架显著减小了无线接入点和用户之间的距离,在相同发射功率下提高接收信噪比,进而带来更高的传输速率。与此同时,密集部署的低功率接入小区间可更最大限度地实现空分复用,由此显著提升网络容量。另一方面,引入软件定义、网络功能虚拟化、云化和网络资源切片等新的组网理论与方法,形成无定形覆盖网络或信息中心网络,能实现对动态化和差异性业务需求的资源智能适配,大幅提升网络资源的利用效率以及对新型无线业务的支撑能力,显著提高用户体验。与此同时,发展大规模天线和大规模协作无线传输新型理论和方法被认为是未来无线移动通信的重要研究方向,主要包括大规模多输入多输出(Multiple input multiple output, MIMO)、端到端和全双工等,通过挖掘大维MIMO信道的空间资源和多点协作增益,较现4G移动通信系统在频谱效率和能量效率上提升至少一个数量级。虽然通过网络构架、无线传输理论和关键技术的突破能大幅提升系统的容量,但随着虚拟/增强现实、三维视频、交互式游戏和全息图像等高带宽新兴业务的快速普及,网络传输容量的进一步快速提升仍任重道远。传统无线移动通信频谱资源(6 GHz以下)正日趋枯竭,开发利用6 GHz以上的毫米波、太赫兹和可见光等新的频谱资源迫在眉睫。特别是28 GHz~100 GHz的毫米波频段,相关的射频模拟前端和芯片近年来已取得快速发展。毫米波频段具有可用频谱丰富、保密性好和干扰小等先天优势,并具有波长短易配置大维天线阵列的优点,在满足高速率、低时延的新兴业务需求方面具有很大的潜力,但存在路径损耗大、易受阻挡、毫米波器件高功耗和严重非理想性等问题。

2001年,美国联邦通信委员会以非授权方式为无线通信分配了一段7 GHz(57~64 GHz)的连续频谱<sup>[2]</sup>,在欧洲,电子通信委员会以非授权方式规划了连续9 GHz(57~66 GHz)的连续频谱,其中,将62~63 GHz和65~66 GHz两个频段分配给移动宽带系统,将59~62 GHz频段分配给无线局域网使用<sup>[3]</sup>,同样,日本、澳大利亚在此频段也开展了相关规划。2012年11月,欧盟正式启动面向2020信息社会的移动无线通信关键技术项目<sup>[4]</sup>,开始进行5G研发,高频段通信也是特别关注重点之一。以三星公司为代表的韩国针对6 GHz以上频段,特别是在13.4~14 GHz,18.1~18.6 GHz,27.0~29.5 GHz和38.0~39.5 GHz几个频段上,进行了大量的研究与测试。在28 GHz高频段上,利用64根天线,采用自适应波束赋形技术,在200 m的距离内实现了超过1 Gbps的峰值下载速率<sup>[5]</sup>。此外,NTT DoCoMo、爱立信、诺基亚等公司开展高频段通信研究。国际上,在宽带无线接入系统方面,60 GHz频段是业内关注的重点,其主要用于短距离、高速率的无线传输,通常传输距离在10 m以内,采用时分双工(Time division duplexing, TDD)工作模式,具体工作频段为56~66 GHz。

大带宽毫米波无线通信的研究近年来已在短距离无线局域网和移动通信无线回程方向取得了明显的进展,目前有数项国际标准(包含 IEEE 802.11ad/ay 等)已颁布或正在制定,支持 10 Gbps 左右的吞吐率。但需要指出<sup>[6]</sup>,已有的无线局域网毫米波通信技术通常局限于室内环境几十米视距以内的短距离无线传输,而无线回程毫米波通信技术则使用高增益天线实现远距离点对点传输,主要用于收发机都固定且存在直达径的场景。由于毫米波信道路径损耗大且易被阻断,这些技术难以支持如车联网、中高速轨道交通以及无人机通信等广域覆盖移动场景的超高速、低时延无线传输需求。为实现信息通信理论的创新突破,近年来研究者目光从研究点对点通信转移到研究多点对多点网络,从追求传统的容量优化转移到通信与网络的融合,该思路为突破毫米波信道链路的传输距离限制,实现广域覆盖毫米波通信提供了可能。为此,迫切需要融合新型网络构架发展变革性的毫米波移动通信基础理论和关键技术,从根本上解决毫米波通信广域覆盖问题,实现超高吞吐量、高可靠性和低延时的多重目标,支撑热点高容量场景(虚拟/增强现实、三维视频、交互式游戏和全息图像等)和高移动高吞吐量场景(车联网、中高速轨道交通和无人机视频监控等)的业务需求。

## 1 毫米波信道模型

信道建模通过对无线环境的抽象性描述,可用一系列的参数来表征无线环境的物理特征,进而准确刻划出无线信号的传播机制,是评估无线技术性能的最有效手段之一。由于 MIMO 技术的应用,信道模型由时频两个维度扩展成空时频这 3 个维度。很多研究机构或组织对传统的微波和毫米波信道进行了大量的信道测量与建模工作,最为典型的有:

(1) WINNER I/II/+ 模型。作为欧盟顶级的移动通信项目,WINNER I/II/+ 提出了多种基于空间信道模型的建模方法,支持带宽 100 MHz,载频 2~6 GHz,同时支持的场景多达 18 种<sup>[7-9]</sup>,其中 WINNER<sup>+</sup>还支持三维电波传播。

(2) 3GPP 模型。TR 25.996 首次明确定义了空间信道模型,它适用于中心频率为 2 GHz,带宽为 5 MHz 的城市宏蜂窝、城市微蜂窝以及城市郊区 3 种典型场景,可同时配置任意的天线阵列<sup>[10]</sup>。TR 36.873 则给出了三维 MIMO 的信道建模,对于城市微蜂窝和城市郊区,该模型将信道传播特性进一步划分为视距(Line-of-sight, LoS)、非视距(Non line-of-sight, NLoS)和室外到室内传播 3 个类型。此外,模型的核心部分采用与 WINNER<sup>+</sup>模型相同的小规模衰落模型,可提供与 WINNER<sup>+</sup>模型相同的参数及功能<sup>[11]</sup>。

(3) COST 模型。COST 273 在 COST 259 的基础上改进了角度特征的建模,而且能适用于更多的场景和更高的传输频段<sup>[12]</sup>;COST 2100 主要提出了散射簇可见区域的概念来描述移动平台处于不同位置时经历的散射簇数量的变化,进一步精确地描述了信道特性<sup>[13]</sup>。

(4) QuaDRiGa 模型<sup>[14]</sup>。作为 3GPP 三维信道模型的开源实现,QuaDRiGa 信道模型在借鉴扩展空间信道模型和 COST 273 模型的基础上对信道空间一致性和多小区传输特征进行了扩展。

(5) IMT-Advanced 模型。该模型由主模块和扩展模块组成,其中主模块采用 WINNER II 信道模型,扩展模块则添加了对基站天线高度、街道宽度和城市结构变化的支持<sup>[15]</sup>。

(6) IEEE 802.11ad 模型。该模型用于室内短距离通信,例如办公室和家庭使用的 60 GHz 频段,并提供了对波束形成的支持<sup>[16]</sup>。作为 IEEE 802.11ad 模型的扩展,MiWEBA 模型适用于户外接入和终端到终端通信场景。由于采用准确性技术,提供了对波束形成和路径阻塞的支持<sup>[17]</sup>。

(7) METIS 模型。该模型包含基于地图的确定性模型,随机模型以及两者的组合模型<sup>[18]</sup>。其中随机模型对 WINNER<sup>+</sup>和第三代伙伴计划三维信道模型进行扩展,提供了对三维阴影、毫米波参数、功率频谱采样和与频率相关的路径损耗模型的支持。

(8) mmMAGIC 模型。该模型为统计信道模型,可适用于 6~100 GHz 多种场景下链路级和系统

级仿真<sup>[19]</sup>。该模型在使用 3GPP 三维信道模型理论方法的基础上,对路径和子路径分布的空间精度、子路径振幅的非均匀分布、子路径的球面波建模、6~100 GHz 频率的一致性、频变天线模型、空间一致性、时间连续变化特性、阻塞和散射体建模以及地面或地板反射体建模等方面进行了改进。文献[20]在纽约对 28 GHz 和 73 GHz 无线信道进行实际的测量,通过获得详细的信道空间统计特性来描述毫米波微蜂窝和微微蜂窝的信道模型,并在此基础上分析了经验概率。除此之外,文献[21-25]还基于各种信道假设,对毫米波通信的性能(如覆盖范围、容量和中断概率)进行了分析。

需要指出的是,以上信道测量和建模工作很少考虑终端处于中高速移动环境带来的影响。实际上,在高频段移动通信环境下,路径传播损耗等信道特性与传输频段选取密切相关,不同环境对电波传播的性能也呈现不同的影响。此外用户与基站天线单元之间的物理距离、高频段波束指向性增强等因素将影响高频段移动通信信道测量与建模问题。进一步考虑宏小区基站侧可配置大规模阵列天线,其空间分辨率得到显著增强,因此相应的高频段无线传输信道存在着新的特性,尽管相关研究课题已引起国际上的关注,但信道的理论建模和实测建模的工作较少,还没有受到广泛认可的模型出现,这在较大程度上制约着高频段移动通信理论方法的深入研究。需要在分析测量数据的基础上研究适用于高频段移动通信的信道模型,深入分析信号的到达角度分布、功率分布和时延扩展等统计特性,为后续研究提供支撑。

## 2 毫米波 MIMO 技术

基于多天线的 MIMO 无线传输技术已广泛应用于使用 6GHz 以下频谱资源的传统无线通信系统,它可以充分利用多天线信道潜在的空间复用和空间分集增益显著提高无线传输的频谱效率和可靠性<sup>[26-30]</sup>。最近,大规模 MIMO 技术被业界认为是 5G 的关键技术之一<sup>[31-34]</sup>,它具有同时提升系统容量和峰值速率、减少能量消耗和传输时延的潜力,但它要求基站侧配备天线单元个数一般远大于同一时频资源上的用户数,而基站侧的天线尺寸与天线数、载波波长密切相关,并且随着天线数增加而逐步增大,因此波长大于 10 cm 的 3 GHz 以下频段的大规模 MIMO 基站天线的尺寸、成本和安装是难题。对于高频段尤其是 30 GHz 以上毫米波频段,波长缩小了 10 倍以上,小于 10 mm。如果是线阵,30 GHz 以上天线阵长度将比 3 GHz 以下频段基站天线缩小 10 倍以上。而采用平面阵,天线面积更将缩小 100 倍以上。换个角度来说,同样的天线面积、天线阵结构,30 GHz 以上天线的阵元数是 3 GHz 以下天线阵元数的 100 倍以上。也就是说,同样面积下的天线,30 GHz 以上天线的阵列增益比 3 GHz 提高 20 dB 以上。当然,高频段通信的主要代价是电波难以穿透遮挡,路径传播损耗大。对于遮挡问题,可通过超密集组网和云接入(Cloud RAN, C-RAN)方式得到解决,而利用大规模天线的阵列增益是提高高频段无线通信的有用接收功率、对抗高频段无线信道大路径损耗的有效手段。文献[35]对低频段大规模 MIMO 以及高频段大规模 MIMO 的性能进行了较为详细的对比,结论是后者具有明显优势,因此高频段大规模 MIMO 被认为是应对未来移动互联网超大容量和超密集用户接入需求的关键技术之一,未来高频段移动通信中发射端和接收端都将配置较高维度的天线阵列<sup>[36]</sup>。目前典型的毫米波 MIMO 收发机构架主要有 3 种方案:(1)全数字波束形成<sup>[37]</sup>。它的特点是每个天线单元后面都接一个射频通道,包括功放/低噪放、模数/数模转换器和混频器等。这种结构的优点是充分利用了阵列天线的自由度,信道估计、预编码及系统优化设计实现起来非常灵活、性能好,但其缺点是毫米波天线阵需要配置成百上千个单元和射频通道,受现有器件水平的制约,其体积、重量、功耗和成本都难以承受<sup>[38,39]</sup>。(2)全模拟波束形成。每个天线单元后面接一个模拟的移相器,用来调节信号的相位形成同相叠加以获得阵列增益<sup>[40]</sup>。这种方案只需要一个射频通道,硬件复杂度低、功耗小,但它只能产生一个波束,无法通过空分复用来提升频谱效率。此外,模拟移相器的量化误差会带来性能损失<sup>[38]</sup>。(3)混合波束形成。它在系统性能和实现复杂度之间进行了很好的折中,因此受到了广泛的关注,并被认为是能够在实际系统中得

到应用的最佳方案<sup>[38,41-42]</sup>。文献[43]提出每个射频通道通过移相器跟所有天线单元相连的方案。文献[39,44]提出每个射频通道通过移相器跟天线阵中的一个子阵相连的方案,并且验证了该方案在性能损失不大的情况下可以明显减少移相器的数量。此外文献[45,46]提出利用透镜天线来产生强方向性、高增益的波束,从而实现大规模天线阵功能的方案。文献[47,48]还提出通过平面阵或者立体阵,在水平和俯仰面形成波束来减少干扰、提升容量的思路。

图 1 给出了典型的数模混合构架毫米波 MIMO 收发机结构图。在该构架下,毫米波无线传输的核心问题之一是优化设计基带和射频混合波束形成,同时提升系统的频谱效率和功率效率。该问题由于非凸性难以获得最优解而极具挑战,需要寻求高效的低复杂度优化理论和方法。与此同时,毫米波空时传输的潜能挖掘通常依赖于发射端所获得的信道状态信息,而毫米波混合多天线信道信息的获取面临波束对准前的极低信噪比以及波束跟踪等棘手问题,迫切需要研究不依赖于准确信道状态信息的非精准设计无线传输理论和方法。为解决上述问题,提出基于波束扫描的新型毫米波 MIMO 多用户无线传输技术<sup>[49,50]</sup>,波束扫描过程如图 2 所示,同时适用于时分双工和频分双工系统。其基本思想是:首先根据系统构架特征优化设计多个可用的模拟波束集合,形成模拟波束码书,以保证获得阵列增益,提高覆盖范围。然后,发射端实施模拟波束扫描训练,在频分双工系统中用户端获得基于扫描波束的等效信道信息并反馈回基站,而在时分双工系统中可利用上下行信道的互易性获得波束扫描等效信道信息。基站端在获得波束扫描等效信道信息后通过求解群稀疏优化问题可完成模拟波束的选择和数字波束的联合设计。需要指出相比传统的基于全部信道信息的数模混合毫米波 MIMO 技术,该技术基站只需获得各个用户的波束扫描等效信道信息,该信息由于毫米波信道的稀疏性,大幅降低了信道信息的获取开销,在频分双工系统中通过有限反馈即可达到所需的性能。同时该技术充分利用了天线阵的阵列增益,从新的角度实现了数字和模拟预编码的联合优化。

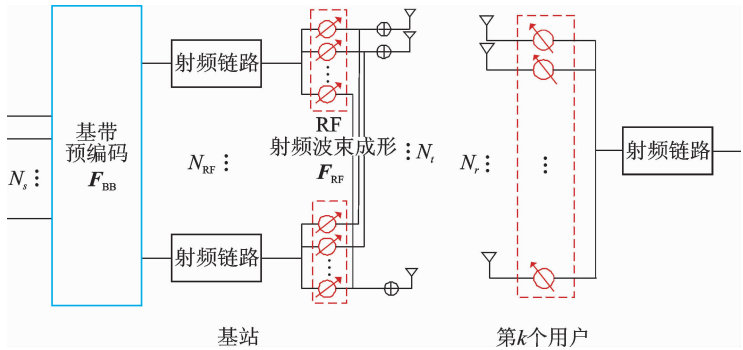


图 1 数字模拟混合构架下的毫米波 MIMO 系统

Fig. 1 Digital and analog hybrid MIMO architecture

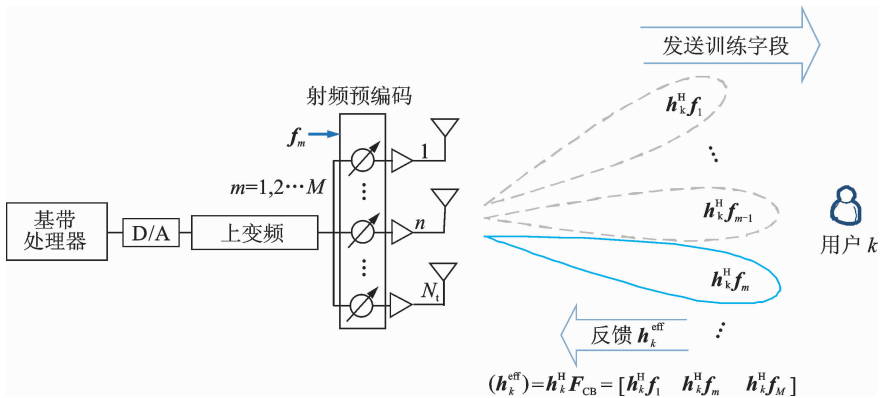


图 2 波束扫描过程示意图

Fig. 2 Illustration of beam sweeping

### 3 毫米波通信网络构架

网络密集化是形势所趋,广域覆盖的宏小区范围内大量部署低功率节点接入点组成超密集异构网络架构被认为是应对网络流量数百倍提升挑战的主要手段之一,已经得到了业界的广泛认可<sup>[50]</sup>。该新型网络通过密集布设微蜂窝/微微蜂窝/家庭基站,显著减小了用户与各类无线接入点之间的距离,可更大幅度地实现空分复用和频率复用,显著提升频谱利用率和网络容量。同时在相同发射功率下提高接收机的输出信噪比,从而获得更高的传输速率。与此同时,鉴于未来信息网络节点具有融合感知、计算及存储功能,引入软件定义、网络功能虚拟化、云化和网络资源切片等新的组网理论与方法,形成无边覆盖网络或信息中心网络,可以实现对动态化和差异性业务需求的资源智能适配,大幅提升网络资源的利用效率以及对新型无线业务的支撑能力,显著提高用户体验。毫米波通信如何与上述网络构架发展趋势密切融合,由此更大幅度地挖掘毫米波的大带宽资源优势,解决毫米波信道固有缺点带来的覆盖受限等问题,是一个需要深入研究的国际性技术难题。为了应对未来网络通信带来的巨大挑战,作为一种思维的转变,在对无线通信的理论、系统和实现过程进行重新思考的基础上,提出将毫米波无线通信与新兴的大规模 MIMO、大规模协作无线传输技术紧密结合,并引入云计算和分布式存储处理等新方法,形成密集分布毫米波大规模 MIMO 无线通信新型网络构架,解决毫米波移动通信的广域大容量无线覆盖和支持终端中高速移动等关键性技术瓶颈。如图 3 所示,该系统主要包括多个增强型远端毫米波无线射频单元(mmWave enhanced remote radio head, m-eRRH)、由高性能处理器和实时虚拟技术组成的集中式中央单元池(Central unit, CU)/基带处理单元(Baseband unit, BBU)以及用于连接 m-eRRH 与 CU/BBU 的光纤或无线前传(Fronthaul)网络。它的基本特征为:基于分布式配置的大规模 MIMO 阵列天线、基于云计算的协作信号处理、基于用户内容偏好的分布式数据存储与基于用户行为特征和电波传播特征的分布式智能资源调度等。其中 m-eRRH 配置大维天线阵列,且具有一定的数据处理和数据存储能力。通过与 CU/BBU 分层协作,并引入智能存储和转发,能显著降低射频单元与中央单元之间大量数据交换带来的传输时延和传输资源消耗,大幅提升系统的吞吐率和能量效率,明显降低传输时延,可支持如车联网、高速轨道交通和无人机通信等中高移动高吞吐量应用场景下的大带宽、超高速和低时延无线传输。

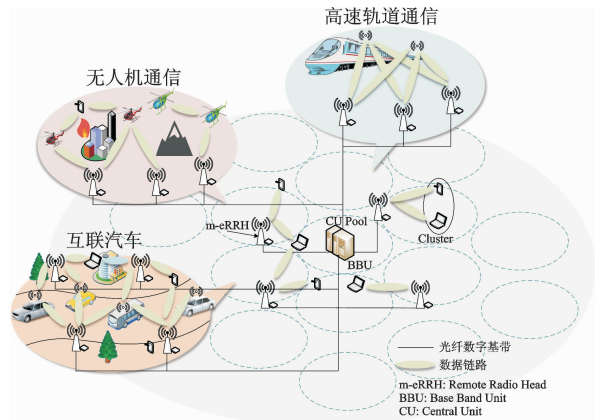


图 3 密集分布毫米波大规模 MIMO 通信场景示意图  
Fig.3 Densely distributed mmWave massive MIMO communications

如何挖掘该新型毫米波网络构架的潜力还有待系统而深入的研究。尤其需要解决毫米波 MIMO 无线通信的大范围动态超高速传输、低时延分布式智能资源调度和高移动性支持等极具挑战性的问题,并寻求中高移动高吞吐量应用场景的毫米波无线传输和资源调配基础理论和关键技术的突破。这些研究工作不仅为移动互联网业务爆炸式增长与多样性发展的应用需求所必须,而且对于构建未来高效宽带移动通信系统具有重要意义。

### 4 结束语

毫米波通信是未来无线通信的重要发展方向之一,目前已在毫米波信道测量与建模、短距离超高速

无线接入和毫米波 MIMO 技术等方面取得了明显的研究进展。但随着新一代无线移动通信对无线传输速率、覆盖性能、频谱效率及功率效率提出的更高要求,针对无线传输与组网理论方法研究面临的重大挑战,开展面向广域覆盖毫米波移动通信系统的基础理论和关键技术研究,已经成为新一代宽带移动通信最具潜力的研究方向,也是我国解决无线移动通信业务流量爆炸性增长的基本需求及其派生的一系列重大原理性问题,支撑我国移动通信技术和产业,是引领世界发展的跨越目标的重要环节,而相关研究工作尚处在起步阶段,具有挑战性的基础理论和关键技术问题有待系统深入的研究。

### 参考文献:

- [1] Cisco. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2016-2021 Cisco white paper[EB/OL]. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>, 2017-3-28/2017-5-22.
- [2] Federal Communications Commission. Code of federal regulation, title 47 telecommunication chapter 1, part 15. 255[EB/OL]. [https://apps.fcc.gov/edocs\\_public/attachmatch/FCC-01-290A1.pdf](https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-01-290A1.pdf), 2001-10-15/2017-5-22.
- [3] European Telecommunications Standards Institute. DTR/ERM-RM-049, Electromagnetic compatibility and radio spectrum matters (ERM); system reference document; technical characteristics of multiple gigabit wireless systems in the 60 GHz range[EB/OL]. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102400\\_102499/102491/01\\_02\\_01\\_60/tr\\_102491v010201p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102400_102499/102491/01_02_01_60/tr_102491v010201p.pdf), 2006-5-1/2017-5-22.
- [4] Osseiran A, Braun V, Hidekazu T, et al. The foundation of the mobile and wireless communications system for 2020 and beyond: Challenges, enablers and technology solutions [C] // 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE, 2013:1-5.
- [5] Roh W, Seol J Y, Park J, et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2):106-113.
- [6] Xiao M, Mumtaz S, Huang Y, et al. Millimeter wave communications for future mobile networks[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1705.06072>, 2017-5-17.
- [7] Winner W P. Deliverable D5. Final report on link level and system level channel models[EB/OL]. <http://projects.celtic-initiative.org/winner+/DeliverableDocuments/D5.4.pdf>, 2005-11-18/2017-5-22.
- [8] Winner II. Deliverable 1.1.2, IST-4-027756. WINNER II channel models [EB/OL]. <http://www.cept.org/files/1050/documents/winner2%20-%20final%20report.pdf>, 2007-9-30 /2017-5-22.
- [9] Wireless World Initiative New Radio. WINNER+ final channel models [EB/OL]. [http://Documents\tr\\_125996v120000p.pdf](http://Documents\tr_125996v120000p.pdf), 2010-6-30/2017-5-22.
- [10] European Telecommunications Standards Institute. 3rd generation partnership project (3GPP). UMTS; Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations [EB/OL]. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/125900\\_125999/125996/12.00.00\\_60/tr\\_125996v120000p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125996/12.00.00_60/tr_125996v120000p.pdf), 2014-9-22/2017-5-22.
- [11] European Telecommunications Standards Institute. 3rd generation partnership project TR36.873. study on 3D channel model for LTE [EB/OL]. [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.873/36873-c20.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.873/36873-c20.zip), 2015-3-26/2017-5-22.
- [12] Correia L. Mobile broadband multimedia networks [M]. [S. l.]: Elsevier, 2006:364-383.
- [13] Liu L, Oestges C, Poutanen J, et al. The COST 2100 MIMO channel model [J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(6): 92-99.
- [14] Jaeckel S, Raschkowski L, Borner K, et al. Quadriga: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual field trials [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(6): 3242-3256.
- [15] International Telecommunication Union. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT Advanced [EB/OL]. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf), 2009-12-1/2017-5-22.
- [16] Alexander M. Channel models for 60GHz WLAN systems [EB/OL]. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/09/11-09-0334-08-00ad-channel-models-for-60-ghz-wlan-systems.doc>, 2010-5-20/2017-5-22.
- [17] Millimetre Wave Evolution for Backhaul and Access. Channel modeling and characterization[EB/OL]. [http://www.miweba.eu/wp-content/uploads/2014/07/MiWEBA\\_D5.1\\_v1.011.pdf](http://www.miweba.eu/wp-content/uploads/2014/07/MiWEBA_D5.1_v1.011.pdf), 2014-7-1/2017-5-22.
- [18] Mobile and wireless communications enablers for the twenty-twenty information society. METIS channel models [EB/OL]. [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/METIS\\_D1.4\\_v3.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/METIS_D1.4_v3.pdf), 2015-7-14/2017-5-22.
- [19] mmMAGIC Deliverable D2.1. Measurement campaigns and initial channel models for preferred suitable frequency ranges [EB/OL]. <https://5g-mmmagic.eu/results/#deliverables>, 2016-03-9.

- [20] Akdeniz M R, Liu Y, Samimi M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6):1164-1179.
- [21] Bai T, Alkhateeb A, Heath R W. Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(9):70-77.
- [22] Samimi M K, Sun S, Rappaport T S. MIMO channel modeling and capacity analysis for 5G millimeter-wave wireless systems [C] // 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). [S. l.]:IEEE, 2016: 1-5.
- [23] Bai T, Heath R W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2):1100-1114.
- [24] Mota K M, Silva W A, On the capacity analysis of K-U and U-K fading channels for millimeter waves [C] // 2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. [S. l.]:IEEE, 2015:1-5.
- [25] Biswas S, Vuppala S, Ratnarajah T. On the performance of mmwave networks aided by wirelessly powered relays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2016, 10(8):1522-1537.
- [26] Huang Y, Zheng G, Bengtsson M, et al. Distributed multicell beamforming with limited intercell coordination [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(2):728-738.
- [27] Huang Y, Yang L, Bengtsson M, et al. Exploiting long-term channel correlation in limited feedback SDMA through channel phase codebook [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(3):1217-1228.
- [28] He S, Huang Y, Jin S, et al. Coordinated beamforming for energy efficient transmission in multicell multiuser systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(12):4961-4971.
- [29] Huang Y, Zheng G, Bengtsson M, et al. Distributed multicell beamforming design approaching pareto boundary with max-min fairness [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(8):2921-2933.
- [30] He S, Huang Y, Yang L, et al. Coordinated multicell multiuser precoding for maximizing weighted sum energy efficiency [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3):741-751.
- [31] Zhang C, Huang Y, Jing Y, et al. Sum-rate analysis for massive MIMO downlink with joint statistical beamforming and user scheduling [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(4):2181-2194.
- [32] Zhang J, Huang Y, Wang J, et al. Per-antenna constant envelope precoding and antenna subset selection: A geometric approach [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(23):6089-6104.
- [33] Wang Y, Li C, Huang Y, et al. Energy-efficient optimization for downlink massive MIMO FDD systems with transmit-side channel correlation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9):7228-7243.
- [34] He S, Huang Y, Yang L, et al. Energy efficient coordinated beamforming for multicell system: Duality-based algorithm design and massive MIMO transition [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(12):4920-4935.
- [35] Heath R W. Comparing massive MIMO and mmWave MIMO[C] // *IEEE Communication Theory Workshop*. [S. l.]:IEEE, 2014:1-6.
- [36] Swindlehurst A L, Ayanoglu E, Heydari P, et al. Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution? [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(9):56-62.
- [37] Rusek F, Persson D, Lau B K, et al. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013, 30(1):40-60.
- [38] Heath R W, Gonzalez-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.
- [39] Han S I C L, Xu Z. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 186-194.
- [40] 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.
- [41] 3rd Generation Partnership Project, Final report of 3GPP TSG RAN WG1 # 85 [EB/OL]. [http://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/WG1\\_RL1/TSGR1\\_85/Report/Final\\_Minutes\\_report\\_RAN1%2385\\_v100.zip](http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_85/Report/Final_Minutes_report_RAN1%2385_v100.zip), 2016-8-17/2017-5-22.
- [42] He S, Qi C, Wu Y, et al. Energy-efficient transceiver design for hybrid sub-array architecture MIMO systems [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 9895-9905.
- [43] El A O, Rajagopal S, Abu-Surra S, et al. Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(3):1499-1513.
- [44] Gao X, Dai L, Han S, et al. Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4):998-1009.
- [45] Brady J, Behdad N, Sayeed A M. Beamspace MIMO for millimeter-wave communications; System architecture, modeling,



analysis, and measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(7): 3814-3827.

- [46] Zeng Y, Zhang R, Chen Z. Electromagnetic lens-focusing antenna enabled massive MIMO: Performance improvement and cost reduction [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1194-1206.
- [47] Razavizadeh S M, Ahn M, Lee I. Three-dimensional beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 94-101.
- [48] Li X, Jin S, Suraweera H A, et al. Statistical 3-D beamforming for large-scale MIMO downlink systems over rician fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(4): 1529-1543.
- [49] Ye R, He S, Huang Y, et al. Power minimization hybrid precoding for millimeter wave communication systems [C] // 2016 IEEE International Conference on Communication Systems. [S. l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [50] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.

#### 作者简介:



**黄永明** (1977-), 男, 教授、博士生导师, 研究方向: 多天线宽带无线通信理论与技术, E-mail: huangym@seu.edu.cn.



**林敏** (1972-), 男, 教授、博士生导师, 研究方向: 无线通信系统和通信信号处理。



**王俊波** (1979-), 男, 副教授、博士生导师, 欧盟玛丽居里学者, 研究方向: 毫米波通信、CRAN 和无线可见光通信。



**王家恒** (1978-), 男, 副教授、博士生导师, 研究方向: 无线通信系统。



**何世文** (1978-), 男, 研究员, 研究方向: 毫米波通信、智能优化理论和多天线技术协作通信技术。

## 2017 全国复杂环境下雷达设计、干扰及防护学术交流大会

现代战争是在复杂环境下的信息战。雷达作为信息战的“眼睛”,其效能的发挥直接决定战争的胜负。在复杂电磁环境中,既要求我们的“眼睛”可以看得远、看得清、看得准且看得快,还要保护好“眼睛”不被欺骗和伤害成为雷达领域亘古不变的话题。随着雷达新体制、新技术的不断出现,干扰手段也得到了促进和提升,新的干扰技术和干扰战术也已成为当前装备技术中最活跃的领域之一。随着雷达干扰和防护技术的相互交融,专业研发人员对于干扰、防护相互了解和新技术的需求越来越迫切。基于这种形势,中国电子学会拟于 2017 年 6 月 24~25 日在北京举办“2017 全国复杂环境下雷达设计、干扰及防护学术交流大会”。会议将印制论文集,录用的论文全部刊登在本届大会论文集中,优秀论文将被推荐至《电子学报》《数据采集与处理》《现代雷达》《雷达学报》《信号处理》《雷达科学与技术》《太赫兹科学与电子信息学报》《电波科学学报》等多家期刊发表。

#### 会务组联系方式:

联系人:张杰

联系电话:010-68246068

手机:13811330009(微信号)

E-mail: cie\_ew2016@163.com

QQ:3367931813