



社论:

高通量毫米波无线通信

洪伟^{†1}, 岳光荣², 葛晓虎³, 王海明¹

¹东南大学毫米波国家重点实验室, 中国南京市, 210096

²电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 中国成都市, 611731

³华中科技大学电子信息与通信学院, 中国武汉市, 430074

E-mail: weihong@seu.edu.cn; yuegr@uestc.edu.cn; xhge@mail.hust.edu.cn; hmwang@seu.edu.cn

本文编译自 Hong W, Yue GR, Ge XH, et al., 2021. High-throughput millimeter-wave wireless communications. *Front Inform Technol Electron Eng*, 22(4):437-440. <https://doi.org/10.1631/FITEE.2120000>

现代信息社会中, 移动通信是实现信息高效流动的基本手段。近期, 第五代移动通信系统(5G)已实现大规模商用。当前, 5G 长期演进和第六代移动通信系统(6G)成为学术界和产业界的研究热点。实现高通量无线通信的核心资源是频谱, 因此, 毫米波(Millimeter-Wave, mmWave)频段的开发利用是实现高通量无线通信的关键技术之一, 其可用频谱需深入研究和广泛利用。毫米波无线通信的发展呈现以下 3 个重要趋势:

1. 新的毫米波传播特性和信道模型正被应用于更多用户场景。

毫米波无线通信技术有望在越来越多的场景中得到应用。大规模天线阵列成为毫米波无线通信的关键技术, 首先需要深入研究多个频率、不同传输场景和新的传播特性, 以建立用于链路级和系统仿真的新信道模型。

2. 采用先进技术的高通量毫米波无线通信系统应运而生。

为满足未来高通量无线通信的需求, 应对更高频率、更宽带宽、更高数据速率和更高性能的挑战, 需要通过整合通信和传感功能, 制定新的技术规范, 推动协议结构和信号处理方法的不断演进与创新。

3. 采用新技术的新型宽带、低功耗、高性能毫米波器件正被研发。

随着工作频率提升, 毫米波电子元部件面临性能下降和功耗增加, 因此, 需要研究新的电路结构、材料和制造工艺以满足更高吞吐量和鲁棒性要求。

简而言之, 5G 演进和 6G 标准的发展使毫米波无线通信面临诸多挑战。毫米波无线通信系统整体性能的提升依赖于元部件、信号处理方法和系统方案的创新。信道模型、元部件和系统设计的演进与创新也可以为新的应用铺平道路。

在此背景下, 中国工程院院刊《信息与电子工程前沿(英文)》组织了一期关于高通量毫米波无线通信的专刊。专刊涵盖毫米波信道模型、系统设计和元部件, 旨在回顾毫米波无线通信研究领域最新进展, 指出未来研究方向。经严格评审, 共筛选出 13 篇文章, 其中 2 篇综述、10 篇研究论文、1 篇通讯。

在最近兴起的第五代固定网络(Fifth-Generation Fixed Networks, F5G)光纤到房间(Fiber-To-The-Room, FTTR)家庭网络体系结构框架下, 毫米波技术可以很好地级联到室内光终端以实现高通量无线通信。为改善未来宽带服务(如沉浸式音视频)的客户体验, 贺超博士等对新型 FTTR+mmWave 架构涉及的关键技术和实验系统作了深入研究和对比。

[†] 通讯作者

对于通信与定位一体化,利用毫米波的高定向传输特性是一种很有前途的方法。金石教授和他的合作者对毫米波通信和定位一体化技术进行了综述,这种技术能够共享同一套硬件结构和算法。他们总结了关键使能技术和定位的基本知识,并给出相互协助的通信与定位一体化系统的发展趋势。

无线传播特性和信道模型对于在新频段中设计和部署新的无线通信系统至关重要。王海明教授和他的合作者在密集的城市环境中对 28 GHz 和 39 GHz 毫米波无线通信系统进行了电波传播测量和基于簇的分析,证明基于簇的分析方法能够充分解析毫米波波束域的信道特性,对毫米波无线网络的设计和部署具有重要意义。

到达角 (Angle of Arrival, AoA) 是分析信道特性和估计链路性能的关键。张建华教授等在 28 GHz 的城市微蜂窝环境中对上下行方位 AoA 开展了实验研究。他们通过将测量结果与标准信道模型结果比较,成功验证多径簇 AoA 在上行链路和下行链路中遵循高斯分布。此外,建立了子径 AoA 和功率的二维高斯分布,以反映它们之间的相关性。

现有通信信道测试主要针对低速和短距车辆通信方案进行测试。杨霖教授和他的合作者在 41 GHz 频段的毫米波车辆到基础设施 (V2A) 的远程通信场景中作了大量信道测量。通过对接收信号强度 (Received Signal Strength, RSS) 的详细研究,建立了考虑路面不平整的修正双路径模型,较好模拟了 RSS 的波动特性。此外,证明了改进的双路径模型、近距离收发高度模型和两段指数时延功率谱模型的有效性。

作为一种典型高移动性场景,星地通信最近受到广泛关注。由于存在很高的多普勒频移,它们面临着巨大挑战。正交时频空间 (Orthogonal Time Frequency Space, OTFS) 调制被普遍认为可应用于高移动性场景。何瑞斯教授等的研究结果表明,与传统的 MMSE 均衡器相比,结合逐次检测的 MMSE 均衡器能够提高 OTFS 调制性能。作者分别评估了 6 GHz 以下和毫米波频段地球静止轨道和低地球轨道卫星对地视距和非视距信道的 OTFS 调制性能。

轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 为毫米波无线通信系统提供了新的自由度,被认为是未来移动通信网络的一种可能的使能技术。李强教授和他的同事们将理论上具有无限正交态的 OAM 波束与广义空间调制 (Generalized Spatial Modulation, GSM) 结合,提出一种采用 OAM-GSM 的毫米波无线通信系统。仿真结果表明,与传统的 GSM 系统相比,OAM-GSM 系统具有更为复杂的发射机和接收机,但信道容量和最大可实现能量效率分别提高 80% 和 54%。

性能评估是确保 5G 毫米波部署成功的必要步骤,因此,在实验室条件下测试 5G 毫米波的空中 (Over-The-Air, OTA) 辐射方法具有很高吸引力。范伟教授和他的合作者总结了衰落信道条件下 5G 毫米波 OTA 测量的必要性和挑战。他们的工作还包括在微波暗室中开展的 28 GHz 无线电缆和多探针消声室方法的初步实验验证。

在高通量毫米波无线通信系统中部署宽带超大规模相控阵天线,可以增加传输距离。岳光荣教授课题组研究了单载波频域均衡传输方案对高通量毫米波通信系统波束偏斜的影响。结果表明,提出的基于 Zadoff-Chu 的模拟波束成形方法可有效降低波束偏斜造成的性能损失。

对于多小区毫米波多输入多输出系统,强烈推荐采用模数混合转换器和混合波束形成架构。章嘉懿教授等通过求解互补几何规划问题,提出一种有效的功率分配方案,并研究了能量效率以及可达速率与功耗之间的最优折衷。

具有低噪声系数的放大器,即低噪声放大器 (Low-Noise Amplifier, LNA),通常是天线或双工器之后的第一个有源元件,决定了接收机性能。为实现毫米波宽带信号的低噪声放大,薛泉教授等提出一种 9.8–30.1 GHz 的 CMOS 低噪声放大器,使用 1.2 V 电源,噪声系数最小值为 3.2 dB,功耗为 15.6 mW。提出一种基于共栅与共源放大器级联的拓扑结构,用于同时进行宽带输入匹配和提供相对较高的增益。在电路层面,提出多种技术以提高低噪声放大器性能。

低成本和高增益天线一直是毫米波无线通信系统补偿毫米波传播损耗的首选。黄衡教授和合作者提出一种具有高增益和宽带特性的双极化

Fabry-Pérot 腔毫米波天线，其垂直极化和水平极化的峰值增益分别为 18.4 dBi 和 17.6 dBi，两种极化的阻抗带宽为 14%。

与金属波导相比，基于基片集成波导 (Substrate Integrated Waveguide, SIW) 的毫米波天线具有成本低、集成度高等优点，是目前的研究热点。李秀萍教授等研究发现，采用高阶模的腔 SIW 体可以实现精简的馈电网络，从而获得较高辐射效率。

本期专刊涵盖了高通量毫米波无线通信的热门研究方向，包含毫米波传播测量与信道建模、天线、放大器、基带信号处理、系统设计、OTA 测量等。我们希望这些不同类型但又相互关联的研究内容能够使对毫米波无线通信或相关领域感兴趣的人员有所获益。

最后，我们要特别感谢作者、审稿人等的大力支持和贡献，感谢编辑部工作人员以及潘云鹤院士和卢锡城院士两位主编。



洪伟，1982 年获信息工程大学学士学位，1985 和 1988 年分别获得东南大学硕士和博士学位，均为无线电工程专业。

1988 年起任职于东南大学毫米波国家重点实验室，2003 年起担任实验室主任。目前是东南大学信息科学与工程学院教授。1993 以及 1995–1998 年，分别在加州大学伯克利分校和圣克鲁兹分校担任短期访问学者。发表核心期刊论文 300 余篇，出版学术专著 2 部。2014–2016 年，当选 IEEE MTT-S AdCom 成员，目前是中国电子学会会士。获 2 项国家自然科学基金、4 项教育部和江苏省科技进步一等奖、2021 IEEE MTT-S 微波奖、IEEE 802.11aj 国际标准杰出贡献奖等。曾主持国家自然科学基金杰出青年项目和创新群体项目。目前担任中国电子学会微波分会、天线分会副主任委员以及 IEEE MTT-S/APS/EMCS 南京分会主席。2007–2010 年，任 *IEEE Trans Microw Theory Techn* 副主编；2017 年，任 *IEEE Trans Antenn Propag* 的 5G 专题客座编辑。目前研究兴趣包括电磁问题的数值方法、毫米波理论与技术、天线、电磁散射、移动通信射频技术。



岳光荣，电子科技大学教授、博士生导师。1996 年获解放军信息工程大学学士学位，2006 年获电子科技大学博士学位。

2007–2008 年在加州大学伯克利分校做博士后研究，2008 年起任职于电子科技大学。发表学术论文 50 多篇，出版学术专著 2 部。目前主要研究兴趣包括无线通信理论、毫米波无线通信系统设计、信道测量与建模。



葛晓虎，华中科技大学教授。2003 年获华中科技大学通信与信息系统专业博士学位。

2005 年起，任职于华中科技大学电子信息与通信学院。目前担任学院副院长，国家绿色通信与网络国际联合研究中心主任以及澳大利亚悉尼科技大学客座教授。2004 年 1 月至 2005 年 10 月，在韩国亚洲大学和意大利米兰理工大学担任研究员。发表 200 多篇学术论文，授权发明专利 25 件。担任 IEEE 杰出演讲人，同时担任 *IEEE Access*、*IEEE Wirel Commun* 以及 *IEEE Trans Veh Technol* 等期刊编委。目前主要研究兴趣在移动通信领域，包括无线网络的流量模型、绿色通信、无线通信干扰建模。



王海明，分别于 1999、2002 和 2009 年在东南大学获得电子信息工程学士、电磁场与微波技术硕士和通信与信息系统博士学位。

2002 年起任职于东南大学信息科学与工程学院以及毫米波国家重点实验室。目前为东南大学特聘教授，紫金山实验室兼职教授。在 *IEEE Trans Antenn Propag* 等期刊发表论文 50 多篇。申请国内和国际发明专利 70 多件，授权 52 件。获江苏省科技进步一等奖 2 项，IEEE 国际标准杰出贡献奖 2 项。现担任 *Front Inform Technol Electron Eng* 通讯专家。目前主要研究兴趣包括智慧的天线和射频技术、智慧的信道测量与建模技术、毫米波与太赫兹无线通信。