

毫米波通信技术及其在6G中的应用展望

安平省¹ 堵 颢² 张 晨²

1. 中国联合网络通信有限公司驻马店市分公司 河南 驻马店 463000

2. 河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450000

摘要:毫米波通信技术凭借其高频段、大带宽特性,已成为5G/6G通信网络的核心支撑技术。本文系统梳理毫米波通信技术的物理特性、发展历程及技术突破,重点分析其在6G时代的技术演进方向与应用场景拓展。通过对比5G与6G毫米波技术的核心差异,揭示毫米波从“增强型技术”向“核心使能技术”的转型路径。结合全球产业实践与前沿研究成果,探讨毫米波与人工智能、卫星通信、感知技术的融合创新,提出毫米波在6G空天地一体化网络、通感一体化系统、超高速率通信等领域的战略价值,为下一代通信技术发展提供理论支撑与实践参考。

关键词:毫米波通信; 6G网络; 太赫兹融合; 通感一体化; 空天地一体化

引言

随着5G商用化进程的加速,全球通信产业正面临频谱资源枯竭与用户需求指数级增长的双重挑战。国际电信联盟(ITU)预测,到2030年全球移动数据流量将增长至当前水平的100倍,这对通信系统的带宽、时延与连接密度提出革命性要求。在此背景下,毫米波通信技术(30-300GHz)凭借其273.5GHz的绝对带宽资源,成为突破传统频谱瓶颈的关键路径。

从技术演进视角看,毫米波通信经历了从军事雷达应用到民用5G/6G的跨越式发展。2019年,3GPP首次将毫米波纳入5G标准(FR2频段),标志着其从实验室走向规模化商用。截至2025年,全球已有45个国家/地区的180家运营商启动毫米波部署,中国于2020年完成技术测试,并在2025年实现5G-Advanced(5G-A)毫米波网络覆盖大型体育场馆、工业园区等高密度场景。随着6G研究进入实质性阶段,毫米波技术正从“辅助频段”向“核心频段”演进,其与太赫兹、人工智能、卫星通信的融合创新,将重新定义未来通信网络的形态与能力边界。

本文系统梳理毫米波通信技术的物理特性、技术突破与产业实践,重点分析其在6G时代的技术演进方向与应用场景拓展,旨在为下一代通信技术发展提供理论支撑与实践参考。

1 毫米波通信技术的物理特性与核心优势

1.1 毫米波的电磁特性与传播规律

毫米波位于微波与光波之间的频谱区间(30-300GHz),对应波长为1-10毫米。其传播特性呈现“双刃剑”效应:(1)高频段优势:毫米波频段拥有273.5GHz的绝对带宽,即使考虑大气吸收,其“大气窗口”(35GHz、45GHz、94GHz、140GHz、220GHz)总带宽

仍达135GHz,是Sub-6GHz频段的5倍。这种带宽资源可支持单用户峰值速率突破10Gbps,满足8K/16K超高清视频传输、全息通信等极端带宽需求^[1]。(2)传播损耗挑战:毫米波信号在自由空间传播时遵循Friis公式,其路径损耗与频率平方成正比。此外,氧气分子在60GHz频段、水蒸气在120GHz和180GHz频段存在强吸收峰,导致信号衰减达15dB/km以上。这些特性限制了毫米波的单跳传输距离(通常<1km),需通过密集化基站部署与智能波束管理技术补偿损耗。(3)穿透与绕射能力:毫米波对沙尘、烟雾的穿透能力优于激光与红外,但其对建筑物、植被的穿透损耗显著高于Sub-6GHz信号。实验表明,毫米波信号穿透混凝土墙的损耗可达30-40dB,这要求其在室内场景中需依赖分布式天线系统(DAS)或智能反射面(RIS)实现覆盖。

1.2 毫米波通信的核心技术突破

为克服高频段传播损耗,毫米波通信技术通过以下创新实现性能跃升:(1)大规模MIMO与波束赋形:通过部署64/128/256单元相控阵天线,结合混合波束赋形架构(Hybrid Beamforming),毫米波系统可实现窄波束(波束宽度<5°)的动态指向控制。例如,中兴通讯在2021年完成的5G毫米波外场测试中,采用DDDSU帧结构实现单用户7Gbps下行峰值速率,其关键在于波束赋形技术将信号能量集中于目标方向,提升信噪比(SNR)20dB以上。(2)超材料与集成天线技术:传统毫米波天线因尺寸限制难以集成于终端设备,而基于液晶聚合物(LCP)的柔性基板材料与微机电系统(MEMS)加工技术,可将天线尺寸缩小至毫米级。德氮微电子发布的全球首颗毫米波数字隔离芯片,通过片上天线(Antenna-on-Chip)与绝缘介质耦合,实现5Gbps无损传输与万伏级

耐压,突破了传统光耦隔离器的带宽-耐压矛盾^[2]。(3)智能反射面(RIS)技术:RIS通过部署大量可编程无源元件,动态调控电磁波的反射相位与幅度,构建“智能超表面”以补偿路径损耗。2025年,中国信科集团在雄安新区完成的6G原型系统测试中,RIS技术使毫米波信号绕射损耗降低12dB,覆盖半径扩展至1.5km。

2 毫米波在5G/5G-A中的产业实践与技术验证

2.1 全球5G毫米波商用部署进展

截至2025年,全球5G毫米波商用网络呈现“区域领先、场景聚焦”特征:(1)北美市场:美国运营商Verizon与AT&T率先在体育场馆、交通枢纽等高密度场景部署毫米波基站,其5G毫米波网络已覆盖全美50个主要城市,支持单用户峰值速率达4Gbps。(2)亚太市场:日本NTTDoCoMo在2024年东京奥运会期间,利用毫米波网络实现8K视频直播与XR沉浸式观赛体验;中国于2020年启动毫米波技术测试,并在2025年实现5G-A毫米波网络覆盖北京、上海等10个超大城市的工业园区与智慧医疗专网。(3)欧洲市场:意大利、英国等国家将毫米波频段(26GHz、28GHz)用于工业互联网场景,例如西门子安贝格工厂通过毫米波网络实现生产设备毫秒级时延控制,将产品缺陷率降低至0.02%。

2.2 5G毫米波的关键应用场景

毫米波的高带宽与低时延特性,使其成为5G垂直行业数字化转型的核心使能技术:(1)工业互联网:毫米波网络支持工业机器人、AGV小车的实时控制与多传感器数据融合。例如,华为与宝武钢铁合作的5G智慧钢厂项目中,毫米波网络实现高温炉窑内部的高清视频监控与设备状态实时反馈,将停机检修时间缩短40%。(2)XR沉浸式体验:毫米波网络可满足XR设备对带宽(>1Gbps)与时延(<10ms)的严苛要求。2025年上海世界移动通信大会(MWC)期间,高通与中国联通联合展示的毫米波XR解决方案,通过云端渲染与边缘计算协同,实现8K分辨率、120fps帧率的无线XR体验。(3)智慧医疗:毫米波的穿透性与高精度定位能力,使其在远程手术、医疗机器人等领域具有独特优势。北京协和医院开展的5G毫米波远程手术试验中,医生通过毫米波网络实时操控机械臂完成微创手术,其操作延迟<5ms,定位精度达0.1mm。

3 6G时代毫米波通信的技术演进方向

3.1 频段拓展与太赫兹融合

6G将进一步扩展毫米波频段至FR2-2(52.6-114.25GHz),并探索太赫兹频段(0.1-10THz)的应用潜力。这种频段拓展带来三方面技术挑战:(1)器件

设计:太赫兹频段要求天线尺寸缩小至微米级,需采用纳米加工技术与超材料实现天线集成。2025年,东南大学团队研发的石墨烯基太赫兹天线,在300GHz频段实现30dBi增益,为6G高频器件设计提供新路径。(2)信道建模:高频段信道呈现“稀疏多径”特性,传统射线追踪模型难以准确描述。中国信科集团提出的“基于机器学习的混合信道建模方法”,通过实测数据训练神经网络,将太赫兹信道预测误差降低至5%以内^[3]。(3)覆盖增强:为补偿高频段路径损耗,6G将采用“空天地一体化”组网架构。例如,通过低轨卫星(LEO)搭载毫米波/太赫兹载荷,实现偏远地区与海洋的广域覆盖。SpaceX星链计划已开展Ka频段(26.5-40GHz)卫星通信测试,其单星容量达1Tbps,为6G空天地一体化网络提供前期验证。

3.2 智能波束管理与AI融合

6G毫米波系统将引入人工智能(AI)实现波束管理的自适应优化:(1)波束预测:通过深度学习模型分析用户移动轨迹与环境变化,提前预测最优波束方向。例如,诺基亚贝尔实验室开发的“基于LSTM的波束预测算法”,在动态场景中将波束切换时间从10ms缩短至2ms,提升系统吞吐量30%。(2)多站点协作:6G将支持非相关多点协助(Non-Coherent Multi-TRP)与相干多点协作(Coherent Multi-TRP),通过多基站联合传输提升边缘用户速率。华为提出的“智能超表面辅助的多站点协作方案”,在小区边缘实现1.2Gbps下行速率,较传统方案提升2倍。(3)通感一体化:毫米波与雷达感知技术融合,实现“通信-感知-计算”一体化。例如,中兴通讯研发的“毫米波通感一体基站”,可在支持10Gbps通信的同时,实现亚米级定位与微形变检测,应用于低空安防、车路协同等场景。

3.3 终端集成与能效优化

6G毫米波终端将向“高度集成化”与“超低功耗”方向发展:(1)芯片级集成:采用硅基毫米波集成技术(SiGe BiCMOS),将射频前端、基带处理与天线阵列集成于单芯片。2025年,高通发布的骁龙X80调制解调器,通过12nm制程实现28GHz频段毫米波功能,芯片面积较前代缩小40%^[4]。(2)能效提升:通过动态电压频率调整(DVFS)与近似计算技术,降低毫米波终端功耗。例如,爱立信提出的“基于强化学习的能效优化算法”,在保持10Gbps传输速率的同时,将终端功耗降低至5W以下。

4 6G毫米波通信的典型应用场景

4.1 全息通信与沉浸式体验

6G毫米波网络将支持全息影像的实时传输与交互,实现“面对面”远程协作。例如,全息会议场景中,毫米波网络需传输10路8K视频流(总带宽>50Gbps),其时延需控制在5ms以内以避免运动模糊。2025年,韩国LG电子展示的6G全息通信原型系统,通过毫米波网络与边缘计算协同,实现单人全息影像的实时渲染与传输,其分辨率达16K(15360×8640),刷新率120fps。

4.2 智能交通与车联网

6G毫米波将推动车联网向“车路云一体化”演进:(1)自动驾驶:毫米波雷达与通信融合(RadCom),实现车辆对周围环境的高精度感知(定位精度<10cm)与实时通信(时延<1ms)。例如,奥迪与华为合作的C-V2X项目,通过毫米波网络实现车辆与交通信号灯、路侧单元的协同控制,将路口通行效率提升30%。(2)低空经济:毫米波通感一体技术可应用于无人机物流、低空安防等场景。例如,深圳大疆创新的“毫米波低空监测系统”,通过部署毫米波基站实现无人机轨迹跟踪与障碍物避让,其监测范围达10km,定位精度0.5m。

4.3 工业元宇宙与数字孪生

6G毫米波将支撑工业元宇宙的构建,实现物理世界与虚拟世界的实时映射与交互:(1)远程运维:通过毫米波网络传输工业设备的高清视频与传感器数据,工程师可在虚拟空间中远程诊断设备故障。例如,西门子安贝格工厂的“数字孪生系统”,通过毫米波网络实现生产线的实时同步,将设备停机时间缩短60%。(2)协同设计:毫米波网络支持多用户同时编辑3D模型,其时延需控制在20ms以内以避免操作冲突。2025年,达索系统与诺基亚合作的“6G工业设计平台”,通过毫米波网络

实现10人协同设计,其模型传输速率达2Gbps,交互延迟<15ms。

5 结语

毫米波通信技术作为5G/6G的核心使能技术,其高频段、大带宽特性为未来通信网络提供了革命性能力支撑。从5G时代的“热点覆盖增强”到6G时代的“核心频段拓展”,毫米波技术正通过频段升级、智能波束管理、终端集成等创新,推动通信系统向超高速率、泛在连接与智能化方向演进。未来,毫米波通信技术的发展需重点关注以下方向:突破太赫兹频段器件设计瓶颈,研发低成本、高性能的毫米波芯片与天线材料。构建“卫星-高空平台-地面基站”协同的6G网络架构,实现全球无缝覆盖。推动毫米波通信与雷达感知技术的标准融合,为智能交通、低空经济等场景提供技术规范。通过AI技术降低毫米波系统功耗,同时研发抗量子计算的加密算法,保障6G网络的安全性。随着6G研究的深入与产业生态的完善,毫米波通信技术将开启“万物智联”的新时代,为数字社会转型与人类可持续发展提供核心动力。

参考文献

- [1]林叶江.毫米波通信高阶QAM调制解调技术研究[D].杭州电子科技大学,2025.
- [2]惠俊翔.毫米波通信中的波束管理技术研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [3]周炳朋,马珊珊.面向6G毫米波通信感知一体化的机动目标联合定位与测速[J].通信学报,2023,44(03):81-92.
- [4]洪伟,徐俊,陈继新,等.面向6G的最优和次优毫米波大规模波束成形阵列架构[J].电子与信息学报,2025,47(08):2405-2415.