

5G 毫米波通信技术关键问题与解决方法

陆焱

重庆市杰茂科技有限公司 重庆 九龙坡 400039

摘要: 随着 5G 技术的飞速发展,毫米波通信技术作为 5G 关键技术之一,凭借其丰富的频谱资源和高数据传输速率,成为满足未来高速率、大容量通信需求的重要手段。然而,5G 毫米波通信技术在应用过程中面临诸多关键问题,如路径损耗大、穿透能力弱、易受阻挡影响、硬件实现复杂以及成本较高等。本文深入剖析这些关键问题,详细探讨相应的解决方法,包括采用波束赋形技术增强信号覆盖、利用中继与反射技术克服阻挡、优化硬件设计与制造工艺降低成本、开展联合优化算法研究提升系统性能等。研究表明,通过综合运用这些解决方法,能够有效克服 5G 毫米波通信技术的障碍,推动其在 5G 及未来通信网络中的广泛应用,为构建高速、稳定、高效的通信网络提供有力支持。

关键词: 5G 毫米波; 通信技术关键问题; 解决方法

DOI: 10.63887/jad.2025.1.3.20

1 引言

1.1 研究背景

在当今数字化时代,人们对通信速率和质量的要求日益提高。5G 通信技术应运而生,旨在提供更高的数据传输速率、更低的时延和更大的连接密度。毫米波频段(30 - 300GHz)拥有丰富的频谱资源,能够满足 5G 通信对高速率、大容量的需求,因此成为 5G 通信的关键技术之一。然而,毫米波通信技术在传播特性、硬件实现等方面存在诸多独特问题,限制了其大规模应用。

1.2 研究意义

深入研究 5G 毫米波通信技术的關鍵问题及解决方法,对于推动 5G 技术的商用化进程、提升通信网络性能具有重要意义。解决毫米波通信技术面临的问题,能够充分发挥其频谱资源优势,为高清视频、虚拟现实、智能交通等新兴应用提供可靠的通信保障,促进数字经济的发展和社会的进步。

2 5G 毫米波通信技术概述

2.1 毫米波频段特点

毫米波频段具有频率高、波长短的特点。高频率带来了丰富的频谱资源,使得毫米波通信能够实现极高的数据传输速率,理论上可达数十 Gbps。但同时,高频率也导致毫米波信号在传播过程中面临更大的路径损耗和穿透损耗^[1]。

2.2 5G 毫米波通信技术应用场景

5G 毫米波通信技术适用于多种场景,如热点区域覆盖、高速移动通信、工业互联网等。在热点区域,如体育场馆、商场等,毫米波通信可以提供高速稳定的网络连接,满足大量用户同时进行高清视频观看、在线游戏等需求;在高速移动场景下,如高铁、高速公路等,毫米波通信结合先进的信号处理技术,能够实现高速数据传输;在工业互联网中,毫米波通信可用于设备间的高速数据交互,实现智能制造和自动化生产^[2]。

3 5G 毫米波通信技术关键问题

3.1 传播特性相关问题

3.1.1 路径损耗大

毫米波信号在自由空间传播时，路径损耗与频率的平方成正比。由于毫米波频率高，其路径损耗远大于低频段信号。例如，在相同传播距离下，毫米波信号的路径损耗可能比 2.4GHz Wi-Fi 信号高出数十分贝。这使得毫米波信号的覆盖范围受限，需要更多的基站来实现连续覆盖。

3.1.2 穿透能力弱

毫米波信号对建筑物、墙壁等障碍物的穿透能力极差。普通砖墙对毫米波信号的衰减可达 20 - 40dB，金属物体的衰减更大。这意味着在室内或存在障碍物的环境中，毫米波信号难以有效传输，导致信号盲区增多。

3.1.3 易受阻挡影响

毫米波信号的波长短，绕射能力差，容易被人体、树木等物体阻挡。当用户移动或周围环境发生变化时，毫米波链路容易中断，影响通信的稳定性和可靠性^[3]。

3.2 硬件实现相关问题

3.2.1 硬件复杂度高

毫米波通信系统需要高精度的射频前端、天线阵列等硬件设备。为了实现波束赋形、高频信号处理等功能，硬件电路的设计和制造难度较大。例如，毫米波天线阵列需要精确控制每个天线单元的相位和幅度，对制造工艺要求极高。

3.2.2 成本较高

由于毫米波硬件设备的技术难度大、生产工艺复杂，导致其成本居高不下。高昂的成本限制了毫米波通信设备的大规模部署和应用，尤其是在一些对成本敏感的领域。

3.2.3 功耗较大

毫米波通信设备在处理高频信号时，需要消耗更多的能量。射频前端、模数转换器等关

键部件的功耗较高，使得整个通信系统的能耗增加。这不仅影响设备的续航能力（对于移动终端），还增加了运营成本（对于基站）。

3.3 系统性能相关问题

3.3.1 多普勒频移影响大

在高速移动场景下，毫米波信号的多普勒频移现象更为严重。多普勒频移会导致信号频率发生变化，影响信号的解调性能，增加误码率。例如，当移动速度达到数百公里每小时时，毫米波信号的多普勒频移可能达到数百 MHz，对通信系统造成较大干扰^[4]。

3.3.2 干扰管理复杂

毫米波频段的使用可能会引入新的干扰源，如其他毫米波通信系统、雷达系统等。同时，由于毫米波信号的传播特性，其干扰范围和影响程度也与低频段不同。如何有效管理和抑制干扰，保证通信质量，是毫米波通信系统面临的一个重要问题。

4 5G 毫米波通信技术关键问题的解决方法

4.1 针对传播特性问题的解决方法

4.1.1 波束赋形技术

波束赋形技术通过调整天线阵列中各个天线单元的相位和幅度，将信号能量集中在一个特定的方向上，形成窄波束进行传输。这样可以有效增加信号的传输距离，克服路径损耗大的问题。同时，波束赋形技术还可以实现波束的动态跟踪，当用户移动或环境变化时，自动调整波束方向，保证信号的稳定连接。例如，在基站端采用大规模天线阵列进行波束赋形，可以显著提高毫米波信号的覆盖范围和传输质量。

4.1.2 中继与反射技术

中继技术：在毫米波信号覆盖不足的区域部署中继节点，中继节点接收基站发送的毫米波信号，经过放大、整形等处理后，再转发给用户终端。中继技术可以扩展毫米波信号的覆

盖范围,减少信号盲区。中继节点可以采用全向天线或定向天线,根据实际场景进行选择。

反射技术:利用环境中的反射面(如建筑物外墙、金属物体等)来反射毫米波信号,实现信号的绕射和覆盖。通过合理设计反射面的形状和材质,可以优化反射信号的方向和强度。例如,在室内环境中,可以安装特殊的反射板,将毫米波信号反射到信号较弱的区域。

4.1.3 智能天线与自适应调制编码技术

智能天线:智能天线能够根据信号的入射方向自动调整天线方向图,增强有用信号的接收,抑制干扰信号。在毫米波通信系统中,智能天线可以与波束赋形技术相结合,进一步提高信号的传输质量和覆盖范围。

自适应调制编码技术:根据信道质量的变化,动态调整调制方式和编码速率。当信道质量好时,采用高阶调制方式和高速率的编码,以提高数据传输速率;当信道质量差时,采用低阶调制方式和低速率的编码,以保证通信的可靠性。通过自适应调制编码技术,可以充分利用毫米波频段的频谱资源,提高系统性能。

4.2 针对硬件实现问题的解决方法

4.2.1 硬件集成与小型化设计

芯片集成:将毫米波通信系统的多个功能模块集成到一颗芯片上,如射频前端、基带处理等。芯片集成可以减小硬件设备的体积和功耗,降低成本。例如,采用先进的半导体制造工艺,将毫米波功率放大器、低噪声放大器等集成到芯片中。

天线小型化:研发新型的天线结构和材料,实现毫米波天线的小型化。例如,采用微带天线、贴片天线等技术,减小天线的尺寸,同时保证天线的性能。此外,还可以将天线与封装技术相结合,实现天线与芯片的一体化设计。

4.2.2 新材料与新工艺应用

新材料:探索和应用新型材料来制造毫米波硬件设备,如高性能的半导体材料、低损耗

的介质材料等。新型材料可以提高硬件设备的性能和可靠性,降低成本。例如,采用氮化镓(GaN)材料制造毫米波功率放大器,具有高功率密度、高效率等优点。

新工艺:采用先进的制造工艺,如3D打印、纳米加工等,提高硬件设备的制造精度和效率。3D打印技术可以实现复杂结构硬件的快速制造,纳米加工技术可以提高天线等部件的性能^[5]。

4.2.3 功耗优化技术

动态功耗管理:根据通信系统的工作状态,动态调整硬件设备的功耗。例如,当系统处于空闲状态时,降低射频前端、基带处理等模块的功耗;当有数据传输任务时,提高相应模块的功耗。

高效电源管理:采用高效的电源管理芯片和电路,提高电源的转换效率,减少能量损耗。同时,优化电池技术,提高电池的能量密度和充放电性能,延长移动终端的续航时间。

4.3 针对系统性能问题的解决方法

4.3.1 多普勒频移补偿技术

频偏估计与校正:在接收端采用先进的算法对多普勒频移进行估计,如基于导频信号的频偏估计算法、基于循环前缀的频偏估计算法等。根据估计出的频偏值,对接收信号进行校正,恢复信号的原始频率。

时域与频域联合补偿:结合时域和频域的处理方法,对多普勒频移进行联合补偿。例如,在时域上采用均衡技术,在频域上采用频偏校正技术,提高补偿效果。

4.3.2 干扰协调与管理技术

频谱感知与共享:通过频谱感知技术,实时监测毫米波频段的使用情况,发现空闲频谱资源。采用频谱共享技术,使多个通信系统能够共享频谱资源,提高频谱利用率。例如,采用认知无线电技术,让毫米波通信系统在不影响主用户(如雷达系统)正常工作的前提下,使用空闲频谱。

干扰抑制算法：研发高效的干扰抑制算法，如多天线干扰抑制算法、自适应滤波算法等。在接收端，通过干扰抑制算法对接收信号进行处理，降低干扰信号的影响，提高信号的信噪比。

5 解决方法的应用案例分析

5.1 案例一：某城市热点区域毫米波覆盖方案

5.1.1 问题描述

某城市中心商业区人流量大，数据流量需求高，但现有低频段通信网络难以满足需求。采用毫米波通信技术进行覆盖时，面临路径损耗大、易受阻挡等问题。

5.1.2 解决方法应用

基站部署：在商业区的高楼大厦顶部部署毫米波基站，采用大规模天线阵列进行波束赋形，增强信号的覆盖范围和传输质量。

中继节点设置：在建筑物内部和信号盲区设置中继节点，中继节点接收基站的毫米波信号并进行转发，扩展信号覆盖。

智能天线应用：基站和中继节点采用智能天线技术，根据用户的位置和移动情况自动调整波束方向，保证信号的稳定连接。

5.1.3 应用效果

通过以上措施，该商业区的毫米波信号覆盖范围显著扩大，数据传输速率达到数 Gbps，满足了大量用户的高速上网需求。同时，系统的稳定性和可靠性也得到了提高，用户体验良好。

5.2 案例二：某工业园区毫米波通信系统优化

5.2.1 问题描述

某工业园区内设备众多，需要进行高速稳定的数据通信。采用毫米波通信技术时，存在硬件成本高、功耗大以及干扰管理复杂等问题。

5.2.2 解决方法应用

硬件集成与优化：采用芯片集成技术，将毫米波通信系统的多个功能模块集成到一颗芯片上，减小设备体积和功耗。同时，选用新型材料和先进工艺制造硬件设备，降低成本。

功耗管理：实施动态功耗管理策略，根据设备的工作状态调整功耗。采用高效的电源管理芯片，提高电源转换效率^[6]。

干扰协调：部署频谱感知设备，实时监测毫米波频段的使用情况。采用干扰抑制算法，对干扰信号进行处理，降低干扰影响。

5.2.3 应用效果

经过优化后，工业园区的毫米波通信系统硬件成本降低了 30%，功耗降低了 20%。同时，干扰得到了有效管理，数据传输的可靠性和稳定性得到了提高，满足了工业生产对高速通信的需求。

6 结语

6.1 研究结论

本文对 5G 毫米波通信技术的关键问题进行了深入分析，并提出了相应的解决方法。针对传播特性问题，波束赋形、中继与反射等技术可以有效增加信号覆盖范围，克服路径损耗和阻挡影响；针对硬件实现问题，硬件集成、新材料新工艺应用等方法可以降低成本、减小功耗；针对系统性能问题，多普勒频移补偿、干扰协调与管理等技术可以提高系统的稳定性和可靠性。通过实际案例分析，验证了这些解决方法的有效性。

6.2 研究不足与展望

尽管本文提出了一些解决方法，但在实际应用中仍存在一些不足之处。例如，部分解决方法的技术成熟度还有待提高，成本降低的幅度还需要进一步扩大。未来的研究可以从以下几个方面展开：

深化技术研究：继续深入研究波束赋形、干扰协调等关键技术，提高技术的性能和稳定性。探索新的技术和方法，如智能超表面技术，

为毫米波通信带来新的突破。

加强产业合作：推动设备制造商、运营商、科研机构等之间的合作，共同开展毫米波通信技术的研发和应用推广。通过产业协同，加速技术的成熟和成本的降低。

关注 6G 及未来通信：随着通信技术的不断发展，6G 及未来通信对毫米波通信技术提出了更高的要求。未来研究应关注 6G 通信的

需求和发展趋势，提前布局相关技术研究，为下一代通信网络的发展做好准备。

总之，5G 毫米波通信技术具有巨大的发展潜力，通过不断解决其面临的关键问题，将推动毫米波通信技术在 5G 及未来通信网络中的广泛应用，为人们带来更加高速、稳定、便捷的通信体验。

参考文献

- [1] 贝斐峰, 华昉. 毫米波在 5G 时代的应用前景[J]. 通信企业管理, 2020, (06): 77-80.
- [2] 程琳琳, 刁兴玲. 产业链携手: 加速 5G 毫米波发展释放 5G 全部潜能[J]. 通信世界, 2020, (28): 36-38.
- [3] 杨光 Omdia. 毫米波 5G 能否迎来新的春天? 从平昌到哈尔滨[J]. 通信世界, 2025, (04): 10-11.
- [4] 蒋雅丽. 中国移动张佃 5G 毫米波尚需时间成熟, 但未来可期[J]. 通信世界, 2020, (26): 18-19.
- [5] 刘婷宜. 中国电信蒋崢 5G 毫米波不可或缺, 将推动智能化产业升级[J]. 通信世界, 2020, (26): 15.
- [6] 袁引. 毫米波无线技术在电力通信系统中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(12): 308-309.