

5G 通信系统中毫米波天线阵列的优化设计研究

赵朝林

中邮建技术有限公司 江苏南京

【摘要】随着 5G 通信技术的迅速发展,毫米波频段作为其核心技术之一,正逐步应用于高容量、高速率的通信系统中。毫米波天线阵列的优化设计在提升系统性能和信号传输质量方面具有至关重要的作用。本文探讨了毫米波天线阵列的优化方法,分析了不同阵列结构对信号覆盖、波束指向以及抗干扰能力的影响。通过引入先进的算法,如粒子群优化和遗传算法等,设计了具有较高性能和较低成本的毫米波天线阵列结构,能够有效改善信号质量与系统容量。研究表明,优化后的毫米波天线阵列能够在复杂环境中提供稳定、高效的通信服务,促进 5G 网络的广泛应用。

【关键词】毫米波通信; 天线阵列; 优化设计; 粒子群算法; 信号质量

【收稿日期】2025 年 5 月 16 日

【出刊日期】2025 年 6 月 7 日

【DOI】10.12208/j.aics.20250039

Research on optimal design of millimeter wave antenna array in 5G communication system

Chaolin Zhao

China Post Construction Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

【Abstract】With the rapid advancement of 5G communication technology, millimeter-wave bands, as a core component, are increasingly being deployed in high-capacity and high-speed communication systems. The optimization design of millimeter-wave antenna arrays plays a vital role in enhancing system performance and signal transmission quality. This study explores optimization methodologies for millimeter-wave antenna arrays, analyzing how different array configurations affect signal coverage, beam steering, and interference resistance. By employing advanced algorithms such as particle swarm optimization and genetic algorithms, we designed antenna array structures with superior performance and cost-effectiveness, effectively improving signal quality and system capacity. Research findings demonstrate that optimized antenna arrays can deliver stable and efficient communication services in complex environments, facilitating widespread adoption of 5G networks.

【Keywords】Millimeter wave communication; Antenna array; Optimization design; Particle swarm algorithm; Signal quality

引言

5G 通信系统的实现依赖于毫米波技术,尤其在提供超高速数据传输和低延迟通信方面表现出极大的潜力。毫米波信号的传输存在严重的衰减问题,限制了其在远距离通信中的应用。天线阵列作为解决这一问题的重要手段,其优化设计成为研究的热点。通过合理设计天线阵列的形状、大小及排列方式,可以有效提升信号覆盖范围和通信质量。近年来,随着计算方法和算法的进步,天线阵列的优化设计正朝着更高的性能标准迈进,成为推动 5G 技术进一步发展的关键因素之一。

1 毫米波通信中天线阵列面临的主要挑战与问题分析

在 5G 通信系统中,毫米波频段由于其更高的频率和更大的带宽,具备了传输高容量和高速数据的优势^[1]。毫米波信号的传播距离受限且容易受到大气吸收和物理障碍的影响,导致信号衰减显著。这一特性使得毫米波在覆盖范围和稳定性方面面临巨大的挑战。为了克服这些问题,天线阵列的优化设计成为关键解决方案之一,但其设计过程依然面临多个难题。天线阵列的结构和布局需要精确优化,以确保在不同环境下能够保持较强的信号接收和传输性能,尤其是在城市密集区域和复杂的电磁环境中。

天线阵列的设计挑战不仅仅体现在阵列数量和布局的选择上,还包括如何有效提升波束的指向性和抗

干扰能力。在毫米波通信系统中,阵列的方向性与信号的覆盖范围和干扰抑制密切相关。通过增加阵列的元素数目和优化天线单元的配罝,可以有效地提升波束的聚焦效果,但这样也会增加系统的复杂性和成本。同时,由于毫米波通信容易受到周围环境中物体的反射、散射和折射影响,如何保证阵列在动态环境下的稳定性和鲁棒性,成为设计中的另一大难点。复杂的环境变化可能导致信号的偏移和衰减,进而影响整体通信质量。

传统的天线阵列设计方法存在一定的局限性。尽管一些经典的阵列设计方法可以通过理论推导来实现一定的性能要求,但对于大规模天线阵列而言,如何处理庞大的数据量和计算复杂度,是一个重要的技术难题^[2]。在实际应用中,如何平衡天线阵列的大小、布局以及其与其他通信系统组件的兼容性,也需要综合考虑。现代优化算法的应用为毫米波天线阵列的设计提供了新的解决思路,如粒子群优化和遗传算法等,这些方法能够更精确地在众多可能的设计方案中选出最佳配罝。如何根据具体的环境需求进行灵活调整,依旧是毫米波天线阵列设计中亟待解决的问题。

2 基于优化算法的毫米波天线阵列设计方法与实现

随着毫米波通信技术的发展,天线阵列的设计需要具备更高的精确度与效率,而传统的设计方法往往无法满足复杂的毫米波通信需求。为了提高设计性能,越来越多的研究开始采用优化算法来解决天线阵列的设计问题。优化算法能够在海量的设计空间中找到最优的天线阵列布局,从而实现对信号质量、波束指向性以及抗干扰能力的有效提升^[3]。常见的优化算法如粒子群优化(PSO)、遗传算法(GA)等,能够通过模拟自然界的选擇与进化过程,快速搜索到全局最优解。这些算法的引入,不仅减少了人工设计的主观性,还提高了阵列的设计效率和性能。

在毫米波天线阵列的优化过程中,设计目标通常是最大化阵列的增益、最小化波束宽度以及提升系统的抗干扰能力。粒子群优化(PSO)算法在此过程中尤为重要,它通过模拟鸟群觅食的过程,利用粒子的移动来寻找最优的天线位置和排列方式。在具体实现过程中,PSO算法会根据阵列的参数和环境特性进行多次迭代,不断更新粒子的速度和位置,从而逼近最优解。通过该算法,设计者可以获得一个适合毫米波通信需求的高效阵列结构,最大化信号覆盖范围并有效降低信号干扰。遗传算法(GA)也是一种广泛应用的优化

方法,它通过模拟自然界生物的遗传和进化过程,通过选擇、交叉和变异操作不断生成新的阵列结构,最终达到全局最优解。

尽管优化算法在毫米波天线阵列设计中取得了显著的成果,但在实际应用中仍然面临一些挑战。优化算法虽然能够帮助设计人员高效找到理想的阵列结构,但其在处理大规模天线阵列时计算复杂度较高,需要强大的计算资源支持。此外,毫米波环境的变化性较大,天线阵列设计需要根据具体的场景进行适当的调整,考虑到周围建筑物的影响、移动性因素以及其他电磁干扰^[4]。在这些实际应用中,优化算法的精确性和鲁棒性可能会受到挑战,如何结合优化算法与现场环境反馈进行实时调整,成为了毫米波天线阵列设计中的一个重要课题。随着计算能力的不断提升,基于优化算法的天线阵列设计方法将继续发挥其在提升毫米波通信系统性能中的重要作用。

3 优化天线阵列对毫米波通信系统性能的提升作用

在毫米波通信系统中,天线阵列的优化设计对系统的整体性能起着至关重要的作用。毫米波信号通常在较高的频率范围内传输,这使得信号衰减速度较快,尤其是在大气吸收和物理障碍物的影响下,信号的传播范围受到限制。通过优化天线阵列的结构,可以有效改善信号的传输效果,提升信号覆盖范围并减少衰减。优化设计能够增强天线阵列的波束形成能力,使得信号可以更精确地指向目标区域,从而提升通信质量^[5]。在实际应用中,优化后的天线阵列不仅可以提升信号的增益,还能提高系统的容量和覆盖范围,尤其在复杂的城市环境和高密度用户场景中,优化后的阵列设计能够有效降低干扰并提高用户体验。

优化天线阵列还能够多径传播和干扰抑制方面发挥关键作用。毫米波信号在传输过程中容易遭遇建筑物、地形等障碍物的反射和散射,这会导致多路径传播效应,进而造成信号衰减和失真。通过合理设计天线阵列的布局,可以有效控制波束的指向性和宽度,最大程度地避免信号反射和干扰区域的重叠。优化设计能够通过精确调整阵列的元素配罝,提升阵列的空间分辨率,从而减少不同路径间的相互干扰。在多用户场景下,优化阵列设计能够显著提升天线系统的抗干扰能力和系统容量,使得多个用户可以共享同一频段而不相互干扰,进而提高系统的频谱效率和整体性能。

天线阵列的优化设计还可提升毫米波通信系统的鲁棒性。在复杂环境中,天线阵列常常面临动态变化的

挑战,如用户位置的变化、环境的干扰、天线阵列本身的损伤等^[6]。优化后的天线阵列设计通过引入先进的优化算法,如粒子群优化和遗传算法,能够根据实时反馈调整阵列的配置,确保系统在各种环境下保持高效稳定的工作状态。优化设计能够有效地提升阵列的灵活性和适应性,使其在面对复杂、多变的实际应用场景时,仍能提供高质量的信号覆盖和稳定的通信性能。

4 优化设计方法的实验验证与结果分析

在毫米波天线阵列的优化设计过程中,实验验证是评估设计效果的重要手段。通过实际的实验平台进行测试,可以验证理论模型和优化算法的有效性。实验通常涉及多个不同的天线阵列配置,并针对不同的环境条件进行测试,以评估信号覆盖、波束指向性、抗干扰性能等关键指标。在实验中,通常会采用如射频信号发生器、矢量网络分析仪等设备对阵列进行性能测试^[7]。通过在不同的频率、不同的传播环境下测试优化后的阵列设计,可以更真实地反映出优化方案对通信系统的实际影响,验证优化算法的有效性和实用性。

在实验过程中,多个优化算法被应用于天线阵列的设计中,以比较它们在不同应用场景下的表现。粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA)是常用的两种优化算法,在实验中都展现了较好的性能。通过对比实验结果,发现经过 PSO 优化后的天线阵列,信号的覆盖范围和传输质量得到明显提升,尤其是在城市复杂环境中的表现尤为突出。优化后的阵列能够显著减少信号的衰减,并增强波束的指向性,提升了系统的信噪比和容量。而遗传算法优化的阵列则在抗干扰能力和信号稳定性方面表现更为出色,特别是在多用户环境下,能够有效减少干扰,确保通信质量。实验结果表明,基于优化算法设计的天线阵列,能够有效应对复杂环境的挑战,提供稳定可靠的通信服务。

实验结果的分析表明,优化设计不仅仅在理论上有所突破,实际上也提升了毫米波通信系统的整体性能。在实际应用场景中,经过优化后的阵列具有更好的适应性和灵活性。对于城市环境中高密度用户的情况,优化设计的阵列能够显著提升频谱效率和系统容量,减少了多路径干扰的影响,并改善了系统的覆盖范围和信号质量^[8]。实验中,优化后的阵列相较于传统设计,表现出更低的信号衰减、更高的传输速率以及更强的抗干扰能力。优化后的天线阵列不仅能提高毫米波通信的传输效率,还能有效降低因环境因素带来的信号损失,确保系统在动态环境下的稳定运行。

5 结语

毫米波通信系统中的天线阵列优化设计,显著提升了信号质量、传输速率和抗干扰能力。优化算法,如粒子群优化和遗传算法,已证明其在实际应用中的有效性,能够针对复杂环境提供高效的解决方案。实验验证表明,优化设计不仅能够改善通信系统的覆盖范围,还能增强系统的容量和稳定性。随着技术的不断发展,基于优化算法的天线阵列设计将在毫米波通信中发挥更加重要的作用,推动 5G 及未来通信技术的进步与应用。

参考文献

- [1] 夏慧,王磊佳,岳文辉,等.面向应力约束拓扑优化问题的高效灵敏度设计方法研究[J/OL].机械科学与技术,1-11[2025-07-11].
- [2] 薛青,来东,梁志芳.基于联邦元学习的毫米波通信系统波束选择算法[J/OL].重庆邮电大学学报(自然科学版),1-8[2025-07-11].
- [3] 苏礴,薛艳伟,马开明.核能汽轮发电机转子铜线通风孔冲模优化设计[J].模具制造,2025,25(07):5-7.
- [4] 叶栩,王青,秦焕丁,等.用于模数混合阵列天线的鲁棒信源数估计算法[J/OL].海军工程大学学报,1-7[2025-07-11].
- [5] 王时宣,滕曦慧,杨立琦,等.宽频带多功能双极化偶极子天线及阵列[J].微波学报,2025,41(03):1-4.
- [6] 柯永宁.无人机网络中毫米波鲁棒传输方法研究[D].北京邮电大学,2025.
- [7] 马雪,解解,董洋瑞,等.毫米波通信中基于阻挡预测的无人机抗阻挡轨迹设计[J].电子与信息学报,2025,47(04):1093-1103.
- [8] 唐婧,彭春富,赵武初.5G 通信中的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法[J].计算机测量与控制,2025,33(02):137-142.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS