

Performance Analysis of Beamforming Technology in Millimeter-Wave Communication Systems

Yuxi Liu Ruilin Wu

Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning, 116041, China

Abstract

Against the background of the rapid iteration of new-generation mobile communication technologies, millimeter-wave communication has become one of the core technologies of 5G-Advanced and 6G networks due to its advantages such as abundant spectrum resources and high transmission rate. However, millimeter-wave signals suffer from significant propagation loss and weak anti-blocking capability during spatial transmission. Beamforming technology must be adopted to enhance the directional transmission capability of signals and thus improve the quality of communication links. This paper focuses on beamforming schemes in millimeter-wave communication systems. It elaborates the basic working mechanism of the technology and its adaptation to the millimeter-wave channel environment, analyzes the implementation and operational characteristics of three types of beamforming architectures: analog, digital, and hybrid. A multi-dimensional performance evaluation framework is established to compare different schemes, and the influence of hardware non-ideal factors on the overall system performance is investigated. The results show that hybrid beamforming achieves the best trade-off among transmission performance, hardware cost, and power consumption, making it suitable for practical deployment in millimeter-wave networks. Beamforming methods based on intelligent learning strategies can effectively improve communication stability in time-varying channels and high-speed mobility scenarios. The achievements of this paper can provide theoretical support and practical references for the engineering design, scheme selection, and algorithm improvement of millimeter-wave communication systems.

Keywords

millimeter-wave communication; beamforming; hybrid beamforming; performance analysis

毫米波通信系统中的波束成形技术性能分析

刘宇熙 吴瑞琳

大连交通大学, 中国·辽宁 大连 116041

摘要

在新一代移动通信技术快速迭代的背景下,毫米波通信凭借频谱资源充裕、传输速率较高等优势,成为5G-A与6G网络的核心技术之一。然而毫米波信号在空间传输过程中损耗显著、抗遮挡能力较弱,必须借助波束成形技术增强信号的定向传输能力,以此改善通信链路质量。本文针对毫米波系统中的波束成形方案展开研究,阐述该技术的基本工作机制以及与毫米波信道环境的适配方式,分析模拟、数字、混合三类波束成形架构的实现方式与运行特性,搭建多维度性能评价框架并完成方案对比,同时探究硬件非理想因素对系统整体表现的作用规律。研究结果显示,混合波束成形可以在传输性能、硬件成本与功耗消耗之间取得最佳平衡,适合在实际毫米波网络中推广使用;基于智能学习策略的波束成形方法能够有效提升时变信道与高速移动场景下的通信稳定性。本文成果可为毫米波通信系统的工程设计、方案选型与算法改进提供理论支撑与实践参考。

关键词

毫米波通信;波束成形;混合波束成形;性能分析

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着沉浸式视频、云端交互、工业智能联网、车路协同等新型应用场景不断普及,移动通信系统对传输速度、承载容量与时延指标提出了更高要求。传统6GHz以下频段资

源已接近饱和,难以支撑未来通信网络持续扩容的目标,毫米波频段因此成为5G增强型技术与6G技术研究的重点方向。当前毫米波通信正从理论验证阶段逐步走向工程落地,在室外连续覆盖、室内热点补盲、工业专用网络等场景中得到越来越多的尝试。

但毫米波在实际应用中存在明显短板,其频率高、波长短的物理特性导致信号在传输过程中衰减剧烈,并且难以穿透建筑物、金属等障碍物,通信链路稳定性较差。为解决上述问题,大规模天线阵列与波束成形技术成为关键支撑手

【作者简介】刘宇熙(2005-),男,中国山西太原人,在读本科生,从事电子信息工程研究。

段,通过空域信号处理与定向发射机制提升信号增益,扩大覆盖范围,提升系统承载能力。在大规模天线配置下,不同的波束成形架构、算法实现方式与硬件设计方案,都会直接影响系统频谱效率、能耗水平与部署成本。因此,对毫米波波束成形技术开展系统性分析与性能对比,对于推动毫米波技术实用化、标准化具有重要的理论价值与工程意义。

1.2 研究内容与结构

本文以毫米波通信波束成形技术为核心研究对象,依次开展理论梳理、架构分析、性能评估与趋势展望。首先介绍毫米波信道传播特征与波束成形的基础原理,明确技术设计的约束条件;其次对三类主流波束成形架构的实现机制与性能特点进行解析;随后构建综合评价体系,完成不同方案的横向对比;最后总结研究结论并对未来发展方向进行展望。全文按照理论基础—架构分析—性能评价—总结展望的逻辑推进,保证结构清晰、论证严谨。

2 毫米波通信与波束成形基础理论

2.1 毫米波通信传播与信道特性

毫米波信道与传统低频通信信道在传播规律上存在显著差异,主要体现为路径损耗大、绕射能力弱、空间分辨能力强。在自由空间环境中,毫米波信号损耗随频率提升快速增加,同时会受到大气中氧气、水汽的吸收作用,在部分频段出现明显衰减。由于波长较短,毫米波信号难以穿透墙体、植被与人体等障碍物,通信链路高度依赖视距路径与少量反射路径,信道呈现明显的稀疏性,有效传播路径数量有限且能量分布集中。

从空间维度来看,毫米波系统可以在有限体积内部署高密度天线阵列,便于形成高增益窄波束,为多用户空分复用提供条件。但大规模天线阵列也会带来空间非平稳问题,不同天线单元对应的信道响应存在差异,对波束成形算法的稳定性提出更高要求。在高速移动场景下,信道状态变化速度快,波束跟踪与匹配难度显著提升,传统处理机制难以实现实时动态适配。目前行业内普遍采用3GPP标准信道模型开展性能验证,能够较好还原室外宏覆盖、微覆盖与室内热点等典型场景的信道规律。

2.2 波束成形基本原理与分类

波束成形的核心思路是通过在天线阵列各单元信号进行幅度与相位加权调控,使目标方向信号实现同向叠加形成高增益主瓣,同时在干扰方向实现信号抵消,从而提升接收端信干噪比。在大规模MIMO系统中,波束成形可视为一种空域滤波手段,能够有效弥补毫米波传输损耗,提升链路可靠性与系统整体容量。

按照实现架构与信号处理位置划分,波束成形主要分为模拟波束成形、数字波束成形与混合波束成形三种类型。模拟波束成形在射频端通过移相网络完成相位调整,硬件结构简单、成本较低,但仅支持单流单方向传输;数字波束成

形在基带完成加权与预编码处理,支持多流、多用户并行传输,理论性能最优,但硬件开销巨大;混合波束成形结合射频模拟处理与基带数字处理,在性能与复杂度之间实现有效折中,是当前毫米波系统中最具工程价值的方案。

3 毫米波波束成形架构与性能机理

3.1 模拟与数字波束成形技术特点

模拟波束成形采用单射频链路配合相移器阵列实现波束方向控制,具备结构简洁、功耗较低、体积小等优势,适合手机、物联网终端等对成本与能耗敏感的设备。在模拟架构中,全部天线单元共享同一套射频通道,基带信号经过数模转换后进入功放网络,由移相器完成相位调控并辐射形成定向波束。由于无法对各天线幅度进行独立调节,模拟波束成形仅能实现单一方向指向,不支持多数据流与多用户复用,在多用户干扰场景下性能受限。此外,移相器存在的量化误差、插入损耗等非理想特性,也会进一步降低波束成形精度与传输可靠性。

数字波束成形为每一根天线配置独立的射频链路、模数转换器与数模转换器,可在基带完成高精度加权与预编码运算,支持迫零、最小均方误差等经典优化算法,在多用户复用、干扰抑制、空间分集等方面具备显著优势,理论性能达到最优水平。但随着天线阵列规模扩大,数字架构的硬件成本、功耗与设计难度急剧上升,对芯片工艺、电路布局与散热设计提出极高要求,难以在大规模阵列系统中实现商用部署,多用于小规模实验验证平台。

3.2 混合波束成形架构与优化算法

混合波束成形由射频模拟处理层与基带数字处理层协同完成,模拟层负责粗波束指向与空域滤波,数字层负责多用户复用与精细干扰抑制,在大幅减少射频链路数量的同时,能够逼近全数字波束成形的性能水平。常见结构包括全连接结构、子阵列结构与空间正交结构,其中全连接结构性能更优但布线复杂、损耗较高;子阵列结构采用分组连接方式,硬件实现难度更低,更适合工程落地。

在算法设计层面,混合波束成形的核心任务是将理想预编码矩阵分解为模拟矩阵与数字矩阵的乘积形式。常用方法包括基于矩阵分解、贪婪搜索、迭代优化的传统算法,以及基于深度学习的智能优化算法。传统算法对信道估计精度依赖度较高,在高速移动与非平稳信道中性能下降明显;智能波束成形采用数据驱动模式,直接学习信道状态与加权矩阵之间的映射关系,无需复杂迭代运算,具备更强的动态适应能力与实时性。在实际系统运行中,混合波束成形可根据信道状态动态调整处理权重,在保证性能的前提下降低运算开销,满足毫米波系统低时延、高可靠的传输需求。

4 波束成形技术性能评估与对比分析

4.1 性能评估指标体系构建

为实现不同波束成形方案的科学对比,本文从链路性

能、系统性能与工程特性三个维度构建统一评价体系。链路性能主要包含频谱效率、误码率、阵列增益与波束指向精度；系统性能重点关注多用户总吞吐量、能量效率、空间复用能力与干扰抑制效果；工程特性包括硬件复杂度、功耗水平、制造成本与实现难度，三类指标共同决定技术方案的实际部署价值。

频谱效率代表单位带宽内的数据承载能力，是高速传输系统的核心评价指标；能量效率反映单位能耗所能支撑的传输速率，直接关系设备续航与散热设计；硬件复杂度以射频链路数量、移相器位数与运算量为量化依据，决定方案能否工程实现。采用多指标综合评估方式可避免单一指标带来的片面性，更加贴近实际工程需求。在毫米波系统设计过程中，通常需要在频谱效率与能量效率之间进行合理折中，在性能与成本之间寻找最佳平衡点，以满足商用部署的综合要求。

4.2 典型方案性能综合对比

在单用户视距传输场景下，全数字波束成形频谱效率最高，混合波束成形次之，模拟波束成形相对较低。在多用户非视距场景下，数字与混合方案支持多流并行传输，容量优势突出，而模拟方案仅能实现单链路传输，系统整体容量受限。从能量效率角度来看，模拟方案功耗最低，混合方案居中，全数字方案因射频链路数量过多导致能效水平偏低。在高速移动与信道快速变化场景下，混合波束成形配合智能跟踪算法可保持稳定传输，模拟方案易出现波束失配导致链路中断，数字方案则受硬件响应速度限制难以完成快速调整。

在工程实现层面，模拟波束成形结构最简单，适合终端与低成本设备使用；全数字方案复杂度极高，仅适用于小规模实验场景；混合波束成形在性能接近数字方案的前提下，硬件开销大幅降低，是毫米波基站与终端的最优选择。在移相器分辨率、量化误差等非理想硬件条件下，4比特移相与10比特数模转换即可满足工程要求，过度提升精度并不会带来明显性能增益，反而会增加设计难度与成本。综合对比结果表明，混合波束成形在覆盖能力、系统容量、功耗与成本之间实现最佳平衡，能够满足5G-A与6G毫米波通信商用部署需求，是当前最具实用价值的技术路线。

5 结论与展望

本文对毫米波通信波束成形技术的理论原理、架构设计与性能规律开展系统性分析，得出以下结论：第一，毫米波信道高损耗、稀疏性与空间分辨特性决定波束成形是提升系统性能的必要手段，大规模阵列与窄波束传输是实现高速率覆盖的核心条件，波束成形技术直接决定毫米波系统的商

用可行性。第二，模拟波束成形复杂度低但性能有限，仅适用于单用户、低速率场景；数字波束成形性能最优但成本过高，难以在大规模阵列中推广；混合波束成形能够实现性能与工程代偿的最优折中，是毫米波商用系统的主流架构。第三，移相器分辨率、射频链路数量与信道动态变化是影响系统性能的关键因素，合理的硬件配置与智能算法可有效降低非理想特性带来的性能损失，提升系统鲁棒性。第四，在多用户、非视距与高速移动等复杂场景中，基于混合架构的智能波束成形具备更强的实用性与扩展性，可满足下一代移动通信高速率、低时延、高可靠的传输需求。

面向6G与下一代无线通信，毫米波波束成形技术将朝着超大规模阵列、智能化、通感一体化与星地融合方向持续演进。未来可重点开展以下研究：一是超大规模阵列近场波束成形理论与低复杂度算法，解决空间非平稳与球面波传播带来的性能退化问题，提升高速移动场景下的传输可靠性；二是通信感知一体化波束共享机制，实现通信与感知功能协同优化，在同一硬件平台完成数据传输与环境感知，提升系统综合效率；三是智能反射面辅助波束成形技术，通过可控反射拓展毫米波覆盖范围，改善遮挡场景下的链路质量；四是轻量化、低功耗波束成形芯片与架构设计，推动毫米波在终端、物联网与车载场景中的规模化普及，降低商用部署成本。随着毫米波通信产业化进程不断加快，波束成形技术将在算法优化、硬件实现与场景适配等方面持续突破，为6G全域覆盖、万物互联、智能交互的发展目标提供核心技术支撑。

参考文献

- [1] 王海舟, 李建清. 毫米波大规模MIMO系统混合波束成形技术综述[J]. 通信学报, 2024,45(02):156-174.
- [2] 张平, 陶小峰, 王莹. 6G毫米波与太赫兹通信理论与关键技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2023.
- [3] 王承祥, 张建华, 张雷. 毫米波通信信道建模与测量研究进展[J]. 电子与信息学报,2024,46(01):1-18.
- [4] 杨应平, 刘旭, 周为. 毫米波模拟与数字波束成形性能对比研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(08):90-99.
- [5] 高镇, 彭启琮, 阎啸. 面向5G-Advanced的毫米波波束成形码本设计与优化[J]. 移动通信,2023,47(05):34-40.
- [6] 赵力, 陈庆华. 大规模MIMO系统混合波束成形算法性能分析[J]. 计算机工程与应用,2024,60(03):201-208.
- [7] 吴伟陵, 牛凯. 移动通信原理与系统[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2022.
- [8] 刘光毅, 王强, 黄宇红. 6G无线网络架构与关键技术发展趋势[J]. 电信科学,2023,39(01):1-12.