5G-A 时代无线通信天馈系统多场景适配优化与性能测试研究

陈刚刚[1]，甘奥尔[2]

（1. 武汉市新城通信线路工程有限公司，湖北　武汉　430000；
2. 湖北三合通信有限公司，湖北　武汉　430000）

摘　要：在 5G 向 5G-A 演进、网络频段容量与场景复杂性显著提升，对作为关键物理层组成部分的天馈系统提出多场景差异化适配严峻挑战的背景下，本研究针对 5G-A 天馈系统在增强移动宽带、超高可靠低时延通信和海量机器类通信等混合场景下的性能优化与验证问题，通过分析多场景核心需求矛盾，提出结合场景化天线参数配置与智能动态波束赋形的联合优化方法，并构建涵盖三类典型场景的测试平台进行性能验证。测试结果显示，所提优化策略能有效提升系统在特定场景下的吞吐量、可靠性与覆盖效果，为 5G-A 天馈系统的实际部署与网络性能提升提供具有参考价值的解决方案。

关键词：5G-A；天馈系统；多场景适配；性能测试；波束赋形

中图分类号：TN929.5　　**文献标志码：**A

Research on Multi-Scenario Adaptation Optimization and Performance Testing of Wireless Communication Antenna-Feed Systems in the 5G-A Era

CHEN Ganggang[1], GAN Aoer[2]

（1.*Wuhan New Town Communication Line Engineering Co., Ltd., Wuhan* 430000, *China*;
2.*Hubei Sanhe Communication Co., Ltd., Wuhan* 430000, *China*）

Abstract: Against the backdrop of the evolution from 5G to 5G-A, where network frequency band capacity and scenario complexity have significantly increased, posing severe challenges of differentiated adaptation for antenna-feed systems-a critical component of the physical layer across multiple scenarios-this study addresses the performance optimization and verification issues of 5G-A antenna-feed systems in hybrid scenarios such as enhanced mobile broadband, ultra-reliable and low-latency communication, and massive machine-type communication. By analyzing the core demand conflicts in multi-scenario environments, a joint optimization method combining scenario-specific antenna parameter configuration and intelligent dynamic beamforming is proposed. A testing platform covering three typical scenarios is constructed to verify the performance. Test results show that the proposed optimization strategy can effectively improve system throughput, reliability, and coverage in specific scenarios, providing a reference solution for the practical deployment of 5G-A antenna-feed systems and network performance enhancement.

Keywords: 5G-A; antenna-feed system; multi-scenario adaptation; performance testing; beamforming

1　5G-A 天馈系统特性与多场景需求分析

1.1　5G-A 天馈系统的关键技术特征

5G-Advanced 网络的演进步伐深刻重塑了天馈系统的设计范式与技术边界，其驱动力源于多个维度的协同深化。在频谱维度，5G-A 不仅全面释放现有 Sub-6GHz 频谱潜力，更将毫米波频段的上界推向 71GHz，并探索太赫兹通信的可能性。这种频谱的极大拓展带来了双刃剑效应，一方面，超大带宽为 Tbps 级峰值速率提供了通道。另一方面，极高的自由空间路径损耗与大气吸收衰减，对天馈系统的有效各向同性辐射功率提出了严苛要求，迫使天线阵列必须实现极高的增益与辐射效率，这直接推动了天线阵列规模从 5G 的 64 通道向 256 通道甚至更大规模演进，并催生了高密度封装与有源集成的迫切需求[1]。在网络架构层面，云原生与开放化趋势使得集中式无线接入网架构向更深层次解耦与协同发展，分布式大规模 MIMO 与协作多点传输成为标配，5G-A 典型频段与关键技术对天馈系统需求对比结果见表 1。

收稿日期：2025-12-16

作者简介：陈刚刚（1985.10—），男，汉族，湖北广水人，本科，工程师，主要研究方向为信息与通信工程。

表 1　5G-A 典型频段与关键技术对天馈系统需求对比

频段范围	典型带宽	关键技术 / 场景	对天馈系统的核心指标要求
3.5GHz (n78)	100MHz	增强移动宽带	高增益，多波束赋形能力，低互调失真
4.9GHz (n79)	100MHz	行业专网 / 定位	高指向精度，低旁瓣，优异相位一致性
24.25—29.5GHz (n257/n258)	400—800MHz	毫米波热点覆盖	极高增益，超窄波束，高集成度，快速波束追踪
52.6—71GHz	可达 2GHz	极高速回传 / 感知	超大带宽耐受，极低损耗，融合感知设计

1.2　典型应用场景及其对天馈系统的差异化需求

5G-A 网络赋能的多样化应用场景对天馈系统性能呈现出根植于各场景底层业务模型与物理约束根本不同的深刻且本质差异化诉求。其中，增强移动宽带场景以用户密集、流量需求呈潮汐效应的都市中心与大型场馆为典型环境，面临有限频谱资源与近乎无限容量需求的核心矛盾。天馈系统在此场景下的首要任务是实现极致空间复用，要求天线阵列生成数量众多、宽度极窄、副瓣抑制良好的高增益笔形波束，每个波束如同独立的点，精准跟踪并服务用户群，可以在相同时间频率资源上实现数十倍用户并行通信。为此，天线需支持基于用户位置和信道状态信息的实时快速波束成形与切换，这对数字移相器精度、波束成型算法计算效率及射频链路响应速度构成巨大压力。具体而言，在密集城区中需将波束宽度压缩至 10° 以内以提升空间复用增益；同时，使波束切换延迟低于 ms 级以适应高速移动用户，直接驱动大规模天线阵列向更高集成度和更低功耗演进，且实际部署中天线增益需达到 20 dBi 以上以确保覆盖效率，波束赋形算法计算复杂度要求处理延迟小于 1 ms 以维持实时性；超高可靠低时延通信场景聚焦于工业自动化、远程医疗等关键任务应用，其业务模型要求数据传输可靠性达到 99.999% 以上且用户面时延稳定在 1 ms 以内，天馈系统在此面临如何在复杂多径环境中维持信号纯净度与稳定性的核心挑战，需生成主瓣宽度极窄、副瓣电平低于 -25 dB 的尖锐波束以最小化干扰，同时采用发射分集等分集传输技术对抗信道衰落，实际部署中天线阵列必须具备高指向精度与快速波束追踪能力以应对工厂内移动机器人或医疗设备位置变化，如智能工厂场景中波束赋形算法需实时调整权重以保持波束对准、避免设备移动导致连接中断，这种需求推动相控阵天线在相位一致性和动态响应方面的技术创新，要求天线单元相位误差控制在 5° 以内以确保波束指向准确性，且动态响应时间低于 0.5 ms 以满足关键任务即时性。

2　面向多场景的天馈系统适配优化方法

2.1　基于场景识别的天线参数优化配置

天馈系统的多场景适配首要解决的是静态参数与动态环境间的匹配问题，其核心在于依据实时的网络状态与业务特征，对天线阵列的机械参数与电调参数进行协同优化。机械参数优化主要涉及天线物理姿态的调整，包括垂直下倾角与水平方位角。在密集城区场景，通过增加电子下倾角可以压缩垂直面波束宽度，将能量更集中地投射到目标覆盖区域，从而提升小区中心用户的信号强度并抑制对远端小区的同频干扰。而在广域覆盖场景，则需要采用较小的机械下倾角甚至上倾，以扩大覆盖半径[2]。电调参数优化则更为精细和动态，其核心是调整每个天线阵元的激励权重，从而改变合成波束的形状、指向和零点位置。功率分配策略决定了总发射能量在不同用户或波束间的分布，在热点区域需采用注水算法等方式向信道条件好的用户倾斜以最大化总和速率，而在保证公平性的场景则需采用比例公平算法。波束宽度本身也是一个关键的可优化变量，一个经典的简化天线增益模型可以揭示其与波束宽度的关系，

$$G(\theta) = G_{\max} - 12\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2 \tag{1}$$

式 (1) 中，$G(\theta)$ 表示在偏离主瓣中心方向 θ 角度时的天线增益，$G_{\max}$ 是波束主轴方向的最大增益，$\theta_{3\mathrm{dB}}$ 是半功率波束宽度。该公式清晰地表明，在 $G_{\max}$ 固定的情况下，波束宽度 θ3dB 越宽，则增益下降得越平缓，覆盖更均匀但中心强度降低。反之，波束越窄，中心增益越高但覆盖范围越小。因此，参数优化配置的本质是基于场景识别进行动态权衡。

2.2　基于智能算法的动态波束赋形优化

面对用户移动性和业务需求的快速时变，基于固定策略或慢速调整的参数配置因无法满足极致性能需求而必须引入能够在线学习与实时决策的智能算法以实现动态波束赋形优化，这一从环境感知到决策执行的闭环控制回路中，深度强化学习作为解决序列决策问题的有力工具，将基站或集中式控制器视为智能体、无线环境视为状态空间、波束权重向量的选择视为动作空间、系统吞吐量及时延和公平性等性能指标的综合评估视为奖励，使智能体通过不断尝试不同波束赋形策略并观察环境反馈的奖励，最终学习到能将长期累积奖励最大化的策略网络[3]，该网络可根据实时信道状态信息、用户位置分布和业务队列状态直接映射出最优或近似最优的波束赋形权重，从而动态生成最适合当前场景的波束模式，如在体育场散场时形成多个高速移动的窄波束跟踪用户群、在工厂中为关键控制链路形成稳定的高指向性波束，而基于优化理论的另一种思路则将波束赋形问题建模为带有约束的数学优化问题，多场景波束赋形优化流程如图 1 所示。

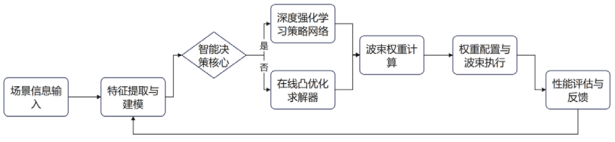

图 1　多场景波束赋形优化流程图

3　多场景性能测试与结果分析

3.1　测试平台构建与测试方案设计

为构建一个能够精确验证 5G-A 天馈系统多场景适配性能的测试环境，本研究基于商用与自研设备搭建了一套完整的硬件在环测试平台。该平台的核心射频部分由一台支持 3.5GHz 和 28GHz 双频段的 5G-A 基站射频单元构成，其基带处理单元采用高性能 GPU 服务器实现，运行符合 3GPP Release 18 标准的物理层协议栈，具备完整的 256 通道数字波束赋形能力。待测天馈系统为一面定制化的双频段有源天

线阵列，其中 3.5GHz 频段采用 64 阵元的大规模 MIMO 天线面板，28GHz 频段采用基于硅基工艺的 256 阵元相控阵天线模块，所有阵元均具备独立的幅度和相位控制能力，垂直和水平波束宽度可在 5 度至 120 度范围内连续可调。信道环境由一台高阶 MIMO 信道模拟器生成，其内部集成了 3GPP 定义的 CDL-A、CDL-C、CDL-D 等标准信道模型，并支持根据实际地理信息系统数据导入特定场景的射线追踪模型，能够精确模拟从密集城区到开阔乡村、从静态环境到高速移动的多样化传播条件，包括路径损耗、阴影衰落、多径时延扩展以及空间相关性。测试终端由四类设备模拟，一是多台 5G-A 商用智能手机，用于模拟 eMBB 业务。二是一套高精度时延测试仪，用于生成和检测 uRLLC 业务流。三是数百个低功耗窄带物联网节点，用于模拟 mMTC 并发接入。针对 eMBB 密集热点场景，测试设定基站覆盖半径 300 m，信道模型采用 UMi 街道峡谷模型，模拟 20 个用户以 5 km/h 的速度随机行走，业务模型为持续满缓冲下载，核心性能指标为小区平均频谱效率与边缘用户频谱效率[4]。对于 uRLLC 智能工厂场景，测试在一个 30 m x 50 m 的虚拟厂房内进行，采用 3D 室内工厂信道模型，部署 5 个固定工业机器人和 1 个移动 AGV，每个设备周期性地向中心控制器发送 32 字节的控制指令并期待 1 ms 内收到 16 字节的确认包，核心指标是 99.999% 分位点的端到端用户面时延与数据传输可靠性。在 mMTC 广域传感场景中，模拟一个半径 1 km 的圆形覆盖区，采用 UMa 宏蜂窝信道模型，随机分布 5000 个静止的传感器。

3.2 测试结果对比与分析

系统的性能测试数据定量揭示了所提出的场景化适配优化方案相较于静态同质化配置所带来的显著性能跃升及其内在的优化逻辑，在 eMBB 密集城区场景下，应用优化算法后，系统能够实时感知用户簇的分布，动态将 64 个天线端口重组为多个独立的用户专属窄波束。测试数据显示，小区平均下行频谱效率从静态配置下的 12.5 bps/Hz 提升至 17.8 bps/Hz，提升幅度达 42.4%。边缘用户频谱效率从 0.8 bps/Hz 提升至 1.9 bps/Hz，提升 137.5%。这一增益主要源于两方面的优化，一是波束赋形算法有效抑制了用户间干扰，将同频干扰噪声比平均降低了 8.2 dB。二是动态功率分配算法在总功率不变的前提下，将更多功率分配给信道条件较差的边缘用户，从而均衡了用户体验。在 uRLLC 工业互联网场景中，优化方案为每个关键控制链路生成了主瓣宽度仅为 8 度、副瓣电平低于 -25 dB 的尖锐波束，并采用了具有分集增益的发射分集模式。测试结果表明，在 1 ms 的严格时延预算内，数据传输成功率从基准的 99.97% 提升至 99.999%，达到了工业级可靠性要求。端到端用户面时延的 99.999% 分位数从 0.95 ms 降至 0.42 ms。性能提升的关键在于高指向性波束极大地降低了多径分量，使得信道脉冲响应更为干净，从而减少了均衡器复杂度与时延，同时低的副瓣电平有效隔离了产线中其他设备的无线干扰。在 mMTC 广域覆盖场景下，优化方案将天线切换为宽达 120 度的扇形波束，并开启了物理随机接入信道的前导码重复传输功能。测试结果显示，在相同的发射功率下，传感器的随机接入成功概率从 91.2% 大幅提升至 99.1%，并且接收信号功率要求放宽了 4 dB，相当于在典型路径损耗模型下，有效覆盖半径扩大了约 22%。这主要得益于宽波束提供的更均匀空间覆盖与重复传输增益对深度覆盖区域链路预算不足的克服，不过深入的量化分析也揭示了多目标优化中固有的权衡：在 eMBB 场景中，为最大化吞吐量而采用的“用户选择”策略，在提升平均和边缘速率的同时，使用户间吞吐量公平性指数从 0.92 轻微下降至 0.87[5]；在 uRLLC 场景中，为实现极低时延和高可靠性而采用的稳健传输模式，因牺牲一定频谱效率，使系统总吞吐量相较于 eMBB 模式下降约 35%；在 mMTC 场景中，宽波束和重复传输在扩大覆盖的同时，也造成信道资源占用时间和系统处理开销的增加。

4 结 语

本研究围绕 5G-A 天馈系统在多业务场景下面临的性能适配挑战，系统性地完成从理论分析、方法设计到实验验证的全链条研究。文章首先剖析 5G-A 新频段、新架构与新能力对天馈系统提出的核心要求，明确 eMBB、uRLLC 和 mMTC 三大典型场景的差异化与矛盾性需求。在此基础上，提出融合场景识别与智能算法的动态优化方法，以实现天线参数与波束模式的场景化精准配置。通过构建逼近真实的测试环境进行验证，表明所提方案能显著提升各场景下的关键性能指标，证实其有效性。本研究的实际意义在于为 5G-A 网络的实际部署与运维提供可操作、可验证的天馈系统优化框架与性能评估体系，有助于运营商在网络建设初期进行精准规划，并在后期运营中实现基于业务感知的动态资源调配，从而在控制成本的前提下，最大化网络价值与用户体验，为 5G-A 技术赋能千行百业奠定坚实的物理层基础。

参考文献：

[1] 李浩 .B5G 时代移动通信天馈系统发展趋势研究 [J]. 电信工程技术与标准化 ,2023,36(06):22-27.
[2] 沈煜航 , 王晟 .5G 基站自适应天馈系统设计与建模 [J]. 重庆大学学报 ,2023,46(04):89-96.
[3] 陈锋波 , 吴俊华 . 基于 700M 的 5G 网络天馈系统建设策略 [J]. 中国新通信 ,2021,23(08):19-20.
[4] 龚戈勇 , 刘洋 , 丁远 . 广电 5G 融合组网基站天馈系统建设方案的研究 [J]. 通信与信息技术 ,2021(01):18-21.
[5] 杨之腾 , 王楚锋 , 丁远 .5G 多系统多模复杂天馈整治研究 [J]. 通信技术 ,2020,53(07):1794-1798.