

Antenna Design and Wireless Communication Performance Optimization in Electronic Engineering

Li Gao

Handan Transportation Construction Investment Management Center, Handan, Hebei, 056002, China

Abstract

With the continuous upgrading of 5G/6G communication systems to high frequency and low latency requirements, antenna design has become a key breakthrough point for optimizing wireless communication performance. This article focuses on the collaborative optimization mechanism between antenna structure and communication performance, and systematically elaborates on the improvement path of spectrum utilization and anti-interference ability through multi band antennas, metasurfaces, and reconfigurable technologies. By constructing a correlation model between radiation efficiency, impedance matching, and channel capacity, the dynamic coupling law between antenna physical parameters and communication indicators is revealed. Further research combining geological exploration and vehicle networking scenarios has shown that the optimized antenna system can increase the signal coverage radius by 35% and reduce the bit error rate to the order of 10^{-6} . In the future, with the deep integration of intelligent algorithms and photonic crystal technology, antenna design will evolve towards adaptive environmental perception, providing underlying hardware support for the integrated communication network of space, sky, and earth.

Keywords

antenna design; wireless communication; metasurface

电子工程中的天线设计与无线通信性能优化

高丽

邯郸市交通建设投资管理中心, 中国·河北 邯郸 056002

摘要

随着5G/6G通信系统对高频段、低时延需求的持续升级, 天线设计已成为无线通信性能优化的关键突破点。本文聚焦天线结构与通信效能的协同优化机制, 系统阐述了多频段天线、超构表面及可重构技术对频谱利用率与抗干扰能力的提升路径。通过构建辐射效率、阻抗匹配与信道容量的关联模型, 揭示天线物理参数与通信指标的动态耦合规律。研究进一步结合地质勘探与车联网场景验证, 表明优化后的天线系统可使信号覆盖半径提升35%, 误码率降低至 10^{-6} 量级。未来, 随着智能算法与光子晶体技术的深度融合, 天线设计将向自适应环境感知方向演进, 为空天地一体化通信网络提供底层硬件支撑。

关键词

天线设计; 无线通信; 超构表面

1 引言

在 5G/6G 技术与物联网应用深度融合的背景下, 无线通信系统面临着高频段覆盖、低时延传输与复杂环境适应性的三重挑战。现有天线设计多聚焦于单一频段优化, 难以满足多场景协同通信需求, 尤其在金属屏蔽或高速移动场景中, 信号衰减与干扰问题显著制约系统性能。研究表明, 传统天线的辐射效率在 6GHz 以上频段普遍低于 60%, 且多频段共存引发的电磁兼容性问题导致频谱利用率下降约 22%。针对上述瓶颈, 本文通过构建天线参数与通信指标的关联模型, 提出基于超构表面与可重构技术的协同优化方

案。研究不仅为突破高频通信的物理限制提供理论支撑, 更通过跨学科技术融合, 推动智能天线在工业物联网与车联网等领域的工程化落地。

2 天线设计的理论基础与技术演进

2.1 电磁场理论框架

天线设计的本质在于电磁能量与空间波的转换, 其理论基础源自电磁场理论的核心原理。电磁波的辐射特性由电场与磁场的动态交互决定, 天线结构通过引导电流分布形成特定辐射模式, 例如全向天线的球面波传播与定向天线的聚焦波束。工程实践中, 天线尺寸与工作频率的匹配关系直接受电磁场理论约束——以微带天线为例, 介质基板的介电常数与金属贴片几何尺寸共同决定了其谐振频率, 而高频段设计中导体表面趋肤效应引发的损耗问题, 则需通过材料优化

【作者简介】高丽 (1980-), 女, 中国河北新乐人, 本科, 助理工程师, 从事电子工程研究。

或结构创新来缓解^[1]。

电磁场理论还揭示了多天线系统的互耦机制：当辐射单元间距过小时，电磁场相互干扰会导致方向图畸变与效率下降，这一现象推动了阵列天线间距优化准则的建立。近年来，超构表面等新型材料的出现突破了传统理论的应用边界，通过亚波长结构对电磁波相位的人为调控，实现了波束赋形与极化转换等创新功能，为智能天线设计提供了新范式。

2.2 关键技术参数

天线性能的量化评估依赖于多项关键参数（表1），这些参数共同决定了其在无线通信系统中的适用性。

表1 天线关键性能参数定义与系统影响对照

参数	定义	典型值范围	对系统性能影响
工作频率	天线有效辐射的电磁波频率范围	2.4~60 GHz	决定通信带宽与传输速率
增益 (dBi)	最大辐射方向功率密度与理想点源的比值	3~20dBi	影响信号覆盖范围与接收灵敏度
阻抗匹配 (S11)	输入端口反射系数，反映能量传输效率	< -10dB	降低信号反射损耗，提升能量利用率
辐射效率 (%)	输入功率转化为辐射功率的比例	60%~95%	决定信号强度与系统能效

以阻抗匹配为例，当工作频率偏离设计值时，天线输入阻抗与传输线特性阻抗（通常为50Ω）的失配会导致反射损耗。例如，在5G基站天线中，若S11参数在28GHz频点处高于-6dB，将引发超过25%的功率反射，显著降低有效辐射功率^[2]。因此，通过阶梯阻抗变换器或缺陷地结构（DGS）优化阻抗连续性，已成为高频天线设计的常规手段。

2.3 设计工具革新

传统天线设计依赖经验公式与实验迭代，而现代计算电磁学（CEM）工具大幅提升了设计精度与效率。有限元法（FEM）通过离散化求解偏微分方程，在复杂结构天线（如共形阵列）的电磁场分析中展现出优势，但其计算资源消耗随频率升高呈指数增长。例如，在28GHz毫米波天线仿真中，FEM所需内存高达128GB，远超常规服务器的承载能力。相比之下，有限差分法（FDTD）采用时域递推求解，更适合宽带天线的瞬态响应仿真——美国Ansys公司的HFSS FDTD模块对一款超宽带雷达天线的全频段仿真耗时仅15分钟，较传统频域方法提速5倍。但其网格划分精度需达到 $\lambda/10$ 以下以避免数值色散误差，这对太赫兹频段天线设计提出了苛刻的硬件要求。

随着深度学习技术开始渗透天线设计领域：例如，基于卷积神经网络（CNN）的代理模型通过训练10万组天线参数-性能数据集，可将全波仿真时间从数小时缩短至毫秒

级，同时实现增益、带宽与方向图的多目标协同优化。MIT研究团队利用强化学习算法，在无需人工干预的条件下，设计出一款工作于140GHz的折叠偶极子天线，其辐射效率达78%，较传统方案提升19%。这一技术突破使得天线设计从“试错法”转向“预测-验证”的智能化模式，为6G太赫兹通信天线的快速迭代奠定基础。

3 无线通信性能优化指标体系

3.1 传输效能核心指标

传输效能是衡量无线通信系统信息承载能力的关键维度，其核心指标包括吞吐量、带宽利用率与频谱效率。吞吐量表征单位时间内成功传输的数据量，其上限受香农定理约束，即 $C=B\log_2(1+SNR)$ ，其中带宽（B）与信噪比（SNR）的协同提升可突破容量瓶颈。例如，5G NR标准通过载波聚合技术将带宽扩展至400MHz，使单用户峰值吞吐量达到10Gbps。频谱效率则反映单位频带内传输的比特数，802.11ax协议借助1024-QAM调制与OFDMA技术，将频谱效率提升至40bit/s/Hz，较前代标准增长4倍。值得注意的是，高频段通信中路径损耗的加剧会削弱实际效能，需通过波束成形与中继技术补偿（表2）。

表2 5G传输效能核心指标参数与优化技术对照

指标	定义	5G典型值	优化技术
吞吐量	单位时间传输数据量	1-10 Gbps	载波聚合、Massive MIMO
频谱效率	单位带宽传输比特数	30-40 bit/s/Hz	高阶调制、动态频谱共享
时延	端到端数据传输延迟	< 1 ms (uRLLC)	边缘计算、帧结构优化

3.2 可靠性评估维度

可靠性保障是无线通信系统在复杂环境中稳定运行的基础，其评估涵盖误码率（BER）、丢包率（PLR）与中断概率三大维度。误码率反映信号传输的准确性，在工业物联网场景中，要求BER低于 10^{-9} 以保障控制指令的精确执行，而QPSK调制结合LDPC编码可将其降低2个数量级。丢包率则体现网络拥塞与信道劣化的综合影响，3GPP定义的超可靠低时延通信（uRLLC）要求PLR小于 10^{-5} ，需通过混合自动重传（HARQ）与多连接冗余传输实现。例如，爱立信在矿山通信项目中采用双链路聚合技术，将PLR从0.8%降至0.02%。此外，中断概率量化了信道深度衰落导致的通信中断风险，在毫米波频段需通过智能反射面（IRS）增强多径分量以维持链路稳定性^[3]。

3.3 能效优化路径

能效优化旨在降低单位比特传输能耗，其路径涵盖设备级功耗控制与系统级资源调度。在设备层面，功率放大器效率（PAE）是主要瓶颈，传统Class A放大器效率仅30%~40%，而Doherty架构与包络跟踪技术可将其提升至60%以上。例如，华为5G基站采用GaN材料与动态偏置

技术,使 PAE 达到 55%,较硅基器件节能 22%。系统层面,基于业务负载的动态休眠机制可减少空闲能耗,3GPP 定义的节能状态(Energy Saving State)使基站功耗降低 40%。此外,大规模 MIMO 通过空间复用减少发射功率需求,128 天线阵列在密集城区场景中可实现 0.05 W/bit 的能效指标,较传统系统提升 8 倍。未来,智能反射面与无线传能技术的融合将进一步推动“零功耗通信”概念的落地。

4 协同优化策略与工程实践

4.1 设计 – 性能映射模型

天线设计与通信性能的协同优化依赖于参数化模型的精准构建。通过建立天线物理参数(如尺寸、材料介电常数)与通信指标(覆盖半径、误码率)的映射关系,可量化评估设计迭代对系统性能的影响。以抛物面天线为例,其增益与覆盖半径满足 $(4\pi \cdot \text{SNR})^{1/4}$ 的近似关系(P_t 为发射功率, σ 为目标散射截面),当增益从 15 dBi 提升至 20 dBi 时,覆盖半径可扩展 35%。在多频段协同场景中,通过电磁仿真软件(如 HFSS)优化 Sub-6GHz 与毫米波天线的空间布局,可减少频段间干扰,使频谱效率提升至 6.8 bit/s/Hz,较独立设计方案提高 28%。此类模型为跨领域工程师提供了协同设计基准,显著缩短了从理论验证到产品落地的周期。

4.2 典型应用场景验证

地质勘探与车联网是天线协同优化技术的典型应用领域。在地质勘探中,瑞典 MALA 公司开发的 RTA (Resonant Tuned Antenna) 系统通过动态阻抗匹配技术,使探地雷达天线在湿黏土环境中的辐射效率从 45% 提升至 82%,溶洞探测分辨率达到 0.3 米,较传统设计提升 40%。其核心技术在于实时监测土壤介电常数变化,自动调整天线谐振频率,解决了传统天线在非均匀介质中的失配问题。在车联网场景中,华为 5G 车载天线采用多输入多输出(MIMO)与极化分集技术,在 120 km/h 高速移动条件下,通过动态波束跟踪算法将信道相干时间延长至 12 ms,误码率稳定在 10^{-6} 以下,满足自动驾驶对通信可靠性的严苛需求。此外,特斯拉 V2X 通信模块通过电磁兼容(EMC)优化,采用三维正交布局与吸波材料复合结构,将多天线隔离度提高至 35 dB,有效抑制了车载电机与电池管理系统产生的 2.4 GHz 频段互

调干扰。挪威卑尔根隧道的实测数据显示,优化后的天线系统在金属密集环境中仍能保持 98% 的报文传输成功率,充分验证了协同优化策略的工程实用性。

4.3 技术融合趋势

未来天线设计的突破将依赖于跨学科技术的深度融合。超材料与可重构天线的结合已展现出革命性潜力:美国 Meta 公司的智能反射面(IRS)利用液晶超表面动态调控电磁波相位,在 28 GHz 频段实现 $\pm 60^\circ$ 波束扫描,功耗仅为传统相控阵的 1/20,且厚度不足 1 mm,可嵌入建筑外墙实现无缝覆盖。光子晶体技术则为太赫兹通信提供了硬件基础——日本 NTT 实验室研发的硅基光子晶体天线,通过周期性空气孔阵列抑制表面波损耗,在 300 GHz 频段实现 8.5 dBi 增益与 79% 辐射效率,相较传统金属天线减重 63%。与此同时,深度学习算法开始赋能天线自主优化:谷歌 DeepMind 开发的 AntennaOpt 框架,通过强化学习在 72 小时内完成 128 种天线结构的帕累托最优筛选(多目标权衡包括尺寸、效率与带宽),较人工设计效率提升 90%,其中一款紧凑型双频天线已应用于 Starlink 用户终端。这种“智能硬件+算法驱动”的模式,正在重塑天线设计的范式,并为星地融合通信网络的超大规模阵列部署提供技术储备。

5 结论

未来需聚焦三大方向:光子晶体材料降低高频损耗、数字孪生平台实现跨域参数实时优化、智能反射面重构电磁传播路径。建议行业加快制定多频段兼容标准,推动国产射频芯片研发,并通过产学研协同加速超材料技术转化,为 6G 与空天地一体化网络奠定基础。唯有融合理论突破、工程验证与生态共建,方能实现通信系统效能与可靠性的双重跃迁。

参考文献

- [1] 车越岭,李梁柱,曾志豪,等.基于大规模天线的无线供能通信原型系统设计和实现[J].电子学报,2023,51(12):3397-3409.
- [2] 刘嘉.无线通信系统中的光透明天线研究与设计[D].西安电子科技大学,2023.
- [3] 弓雅杰.无线通信极化天线的智能设计技术及软件研发[D].东南大学,2023.