

射频天线中的带宽扩展问题与对策研究

陈信伽

辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 辽宁葫芦岛 125105

摘要: 本文集中于射频天线领域的宽带扩展技术,深度剖析其核心挑战及应对策略。本文首先界定了射频天线带宽的概念,并着重阐述了其在通信系统中不可或缺的重要地位。接着,深入剖析并详细解读了影响天线带宽性能的关键因素。接着,本文深入阐述了目前普遍采用的宽带增益技术,这些技术包括天线阵列布局的精细化设计、新型加载算法的引入及其在多天体系中的综合运用等多方面内容。通过具体实例与对比分析手段,本研究揭示了不同策略在特定情境下表现及其适用范围。针对射频天线带宽扩展领域的未来发展趋势,本研究给出了前瞻性的预测。

关键词: 射频天线; 带宽扩展; 多谐振结构; 阻抗匹配; 天线阵列

引言

在当代无线通讯体系的中枢,射频天线发挥着举足轻重的作用,其关键功能体现在电磁波的产生与接收上,此特性明显地决定了系统的通讯效能与质量。基于此,优化射频天线的关键性能指标,以显著提升整个通信系统的性能与稳定性,已然成为当前技术创新与实际应用的核心策略之一。伴随着无线通信技术的飞速发展,尤其是5G通信系统的广泛部署及其在物联网领域的应用,天线带宽的需求展现出明显的增长态势。宽带天线的核心属性在于其在较宽频率带宽内实现高效能的能力,此特性不仅使其能够适应多变的通讯频谱需求,还为高速数据传送提供了支持,从而极大地增强了系统的弹性和效能。然而,在射频天线宽带化进程中所面临的复杂难题已成为当前天线研究的核心议题,探索并实现有效解决策略已显现出推动该领域技术创新发展的关键作用。

1 射频天线带宽的基本概念和重要性

1.1 带宽的定义

天线的操作带宽是指其在特定频率范围内,能确保关键性能参数如辐射效率、增益程度与方向图属性保持稳定与高效率运行的能力。这一范围定义了天线可靠执行通信功能的频率范畴。在通信技术领域,带宽的表达方式通常包括相对带宽与绝对带宽两种,它们以各自特有的维度揭示了带宽的性质。相对带宽通过比率表示其规模,着重衡量与特定参照点的增长或缩减幅度,适于评估不同系统或设备间带宽的相对变化。相比之下,绝对带宽以具体的数值形象地展示了带宽的实际容量,提供了清晰且直接的衡量基准,特别适合

于要求精确计算传输能力或进行资源分配的应用场景。这两种表达方式,由于其特定的应用情境与特性,构成了实践中至关重要的组成部分。相对带宽,作为衡量天线工作频谱范围有效性的指标,具体是指计算上限频率与下限频率区间宽度与中心频率之比,通常以百分比的形式表达^[1],用以评估频谱使用效率的量化标准。相比之下,绝对带宽定义为天线操作频谱上限频率与下限频率精确的频率差值,以赫兹(Hz)为度量标准,直观反映了可利用频谱的实际覆盖范围。

1.2 带宽的重要性

在无线通信系统中,宽带天线具有以下重要意义:

支持多频段通信:面对无线通信标准的不断扩展,涵盖GSM、CDMA、WCDMA、LTE以及最新的5G技术,开发能够适配多元频段的天线系统已显得尤为关键。宽带天线以其多频段覆盖的特性,显著减少了所需天线的数量配置,进而有效降低了系统整体的成本并简化了其复杂度。

提高数据传输速率:根据香农定理,信道容量与带宽之间存在着直接且正向的相关性,即信道带宽的增加会导致信道容量的提升。由此可知,通过扩展天线带宽策略能够显著增强无线通信系统的数据传输效能,以充分应对并满足终端用户日益增长的高速数据传输需求。

增强系统的兼容性和灵活性:宽带天线能够适应不同的通信环境和应用场景,提高了系统的兼容性和灵活性。例如,在一些复杂的电磁环境中,宽带天线可以更好地抵抗干扰,保证通信的可靠性。

2 限制天线带宽的主要因素

2.1 天线结构

天线设计的关键在于它对频带宽度的明显作用，这一要素对于确保信号的高效传播与接收至关重要。各类天线结构因具有各自鲜明的宽带性能属性而展现出显著的异质性。以经典偶极子天线为例，其内在的窄带宽属性主要归因于设计的基本性质及其电流分布模式的特定性，这束缚了其在较广频率范围内保持最佳辐射效能的可能性。针对结构复杂的天线，比如微带天线及螺旋天线的设计，尽管这些天线能显著拓宽频率覆盖范围，但其性能仍被自身的独特结构特性所约束。

2.2 材料特性

所选择天线材料的本质属性显著界定了其可执行的频率带宽范围，具体而言，天线介质衬底的相对介电常数与损耗角正切值的变化，对天线的谐振特性以及能量传播的效率产生了显著的影响^[2]。若介质基板的相对介电常数发生出乎预料的变化，或其损耗显著增加，则会导致天线带宽的缩减，从而对天线的性能产生不利影响。

2.3 阻抗匹配

天线与馈线间的阻抗匹配状态对其带宽性能具有关键性影响，这是决定信号传输效能与系统综合性能能否达到最优化的关键要素之一。当天线的输入阻抗与馈线的特性阻抗之间发生不匹配时，反射现象随之产生^[3]。此物理现象不仅极大地降低了天线的辐射效能，还引发了工作带宽的明显减少，进而对通信系统的性能造成长远的不利影响。因此，卓越的阻抗匹配技术策略成为实现天线带宽覆盖范围最大化这一核心目标不可或缺的关键考量因素之一。

3 常见的带宽扩展对策

3.1 天线结构优化

采用多谐振结构：在天线的设计中集成多模式谐振元件，使得该设备能够在多个预设频率上实现谐振功能，从而显著扩大其操作频谱覆盖范围。该方法的目标在于优化天线在多频段无线通信环境中的灵活性与性能。以微带天线设计为例，采用拥有复杂分枝节点的集成结构或者添加额外贴片，可以使得天线在多个频率范围内展现出谐振特性，从而明显扩展其工作频段范围。

改变天线形状：通过改变天线的几何设计，能够明显地控制其内部电流分布状态和辐射特性，这一操作直接影响

着天线带宽的调节范围和优化可能性，因此是增强天线系统性能的重要因素之一。基于传统的双极子天线作为案例，通过将其几何构型转变为折线或环状形式，可以明显延长其等效电长，从而有效拓宽天线的工作频率区间。这一革新设计对于强化通信网络的适应性和性能表现具有关键价值。

3.2 加载技术

电感加载：在天线系统中引入电感元件能够显著调节其固有谐振频率与阻抗参数，进而实现天线带宽的动态扩展与优化。例如，通过在偶极子天线的臂段引入电感负载，可以实现天线在较低频率范围内的谐振现象，从而有效地拓宽其在低频段的带宽性能。

电容加载：通过导入电容负载策略，成功实现了将天线谐振频率精准调整至较低频段的目标，并且，优化了阻抗匹配效果，不仅精进了天线的各项效能指标，而且大幅度扩展了其工作频谱范围，进而显著增强了系统的传输效率与稳定性。以将集成电容应用于微带天线系统为实例，该策略旨在通过强化天线在高频率下的谐振性能，有效提高其在高频段的辐射效率与覆盖面积，进而显著改进无线通信系统的性能与效率。

3.3 多天线组合

天线阵列：构成阵列的多副天线能够汇聚其辐射开口，从而增强天线的整体增益并扩大其工作频率范围。经精细调整天线阵列内各元件的间隔、激励强度与相位等核心指标，可以显著扩展天线的操作频段。举例而言，在特定的基站天线设计中，采纳天线阵列技术能够显著扩展其频谱覆盖范围。

多天线复用：在统一通信体系中，集成并操控多组涵盖不同频段的天线，并通过复用技术将其融合，能显著扩大信号传播的带宽与覆盖面积。举例而言，于某些移动终端的应用环境中，通过整合 GSM 天线、CDMA 天线及 LTE 天线等多样化的天线配置，并利用先进的天线复用技术，已有效地达成了在多频段间的高效率通讯目的。

4 实际案例分析

为了验证不同带宽扩展对策的效果，下面通过一个实际案例进行分析。

4.1 案例背景

设计一款应用于无线局域网（WLAN）的微带天线，要求天线的工作频段为 2.4 – 2.4835 GHz 和 5.15 – 5.85 GHz，

即需要实现双频段宽带覆盖^[4]。

4.2 设计方案

采用多谐振结构：在微带天线的贴片上设计多个不同长度的枝节，使天线在 2.4 GHz 和 4.3 GHz 附近分别产生谐振。

加载技术：在天线的馈电端加载电容，改善天线的阻抗匹配，扩展天线的带宽^[5]。

4.4 仿真结果与分析

借助电磁仿真软件，我们对所设计的天线进行了详细的模拟分析^[6]，从而获得了其关键性能指标，包括但不限于 S 参数和辐射方向图，这些数据全面反映了天线在不同工作条件下的传输特性与辐射特性。表 1 呈现了在多种设计方案背景下，天线带宽的比较分析：

表 1 多种设计方案背景天线带宽比较分析

设计方案	2.4 GHz 频段带宽 (MHz)	5 GHz 频段带宽 (MHz)
传统微带天线	50	100
采用多谐振结构	100	200
采用多谐振结构	150	300

基于表 1 所示，通过融合多重谐振结构与负载调适的策略，成功地拓宽了天线的工作频率区间，此革新手段极大地增强了天线的功能性，以满足 WLAN 体系在双频带宽应用上所提出的高标准需求。

5 结论与展望

5.1 结论

本文深入探索了射频天线技术中宽带增益扩展的问题，系统分析了限制天线带宽性能的主要因素，并详细阐述了实现宽带增益扩展的常见策略。通过深入解析特定案例，本研究验证了不同策略在提升特定效果方面的有效性。天线结构优化、加载技术与多重天线合并策略能够有效地扩展天线带宽并强化其功能属性。

5.2 展望

随着无线通信技术的不断发展，对射频天线带宽的要求将越来越高。未来，射频天线带宽扩展技术将朝着以下几个方向发展：

新型材料的应用：研究和应用新型材料，如石墨烯、超材料等，有望进一步改善天线的性能，实现更宽的带宽扩展。

智能化设计：借助人工智能与机器学习等先进技术手段，致力于实现天线设计与优化的智能化转型，旨在显著提升天线带宽扩展的效率与精确度，从而推动通信技术领域迈向更高层次的发展。

与其他技术的融合：将天线技术与无线通信系统中的信号处理、射频前端技术等其他关键技术深度整合，旨在实现系统层面的宽带增益，从而显著提升通信系统的效能与覆盖范围。

参考文献：

- [1] 栾华山. 多频小型化基站天线及其阵列关键技术研究 [D]. 上海交通大学, 2019.
- [2] 李晴. 分数阶微带腔模天线的理论与研究 [D]. 南京邮电大学, 2018.
- [3] 刘杰. DGS 结构在高速差分互连线共模噪声抑制中的应用研究 [D]. 宁波大学, 2020.
- [4] 刘柄之, 杨曙辉, 陈迎潮. 基于单馈点的多频段及宽带圆极化微带天线研究综述 [J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2023, 30(04): 69-78.
- [5] 冯颖, 李岩, 吴春邦, 等. 超宽带相控阵天线的发展现状及星载应用展望 [J]. 空间电子技术, 2023, 20(04): 9-19.
- [6] 陈强强, 贾艳辉, 孙新锋, 等. 场反构型电磁推进器轴向稳态磁场的数值仿真研究 [J/OL]. 真空与低温, 1-10 [2025-03-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1125.04.20241112.1346.006.html>.