

关于无线电广播发射天线的多频段特性与辐射效率研究

王禹凡

内蒙古自治区广播电视传输发射中心额尔古纳712台 内蒙古 呼伦贝尔 022250

摘要：本文围绕无线电广播发射天线的多频段特性与辐射效率展开深入研究。阐述了天线辐射机理与基本参数，详细介绍多频段天线类型结构，包括宽带、多频带及可重构天线，分析影响多频段特性的天线结构、材料、环境因素，探讨辐射效率理论计算方法，提出天线性能优化措施，如结构、材料和电磁环境方面的优化，旨在为提升无线电广播发射天线性能提供理论和实践指导，促进其在复杂电磁环境下高效稳定工作，满足日益增长的通信需求。

关键词：无线电广播；发射天线；多频段特性；辐射效率

引言

当今，无线电通信技术飞速发展，频谱资源渐趋紧张，无线电广播发射天线性能提升迫在眉睫。多频段通信成为趋势，探究天线多频段特性与辐射效率至关重要。明确天线在不同频段的电磁波辐射及影响因素，可为优化设计、提升频谱利用率奠定基础；而辐射效率关联能量转换与信号传输，对广播信号覆盖和质量提升起关键作用。因此，本文综合剖析天线原理、类型、影响因素及优化手段，为相关研究与应用提供支撑，推动广播事业前行。

1 无线电广播发射天线的基本原理

1.1 天线的辐射机理

天线是一种将导行波转换为自由空间电磁波的装置。当高频电流通过天线时，会在天线周围产生交变的电磁场，这些电磁场相互作用并向空间辐射出去，形成电磁波。根据麦克斯韦方程组，变化的电场会产生磁场，变化的磁场又会产生电场，从而实现了能量的向外传播。

1.2 天线的基本参数

天线的方向性描述了天线在不同方向上辐射或接收电磁波的能力。常用的方向性参数包括方向图、波束宽度、方向性系数等。方向图直观地展示了天线在空间各个方向上的辐射强度分布情况，波束宽度则表示天线主瓣的宽度，方向性系数反映了天线在特定方向上的辐射功率与理想无方向性天线在相同输入功率下辐射功率的比值，它体现了天线的定向辐射能力。

天线增益是指在输入功率相等的条件下，实际天线与理想无方向性天线在空间同一点处所产生的信号功率密度之比。增益与方向性系数密切相关，它综合考虑了天线的方向性和辐射效率，是衡量天线性能的重要指标之一。高增益天线能够在特定方向上更有效地辐射信号，从而提高信号的传输距离和覆盖范围。

天线的输入阻抗是天线馈电端口处的电压与电流之比。它对于天线与发射机或接收机的匹配至关重要。当输入阻抗与馈线的特性阻抗匹配时，能够实现最大功率传输，减少反射损耗，提高天线的工作效率。否则，会导致信号反射，降低天线的辐射效率，并可能对发射机或接收机造成损害。

2 多频段天线的类型与结构

2.1 宽带天线

宽带天线是一种能够在较宽的频率范围内工作的天线类型。常见的宽带天线包括对数周期天线、螺旋天线等。

对数周期天线由多个对称振子组成，其结构具有周期性的变化规律。通过合理设计振子的长度和间距，使得天线在不同频段上能够呈现出相似的电性能，从而实现宽带工作特性。对数周期天线具有较宽的频带宽度、相对稳定的方向性和较高的增益，在中短波广播等领域得到了广泛应用。

螺旋天线是一种具有螺旋形状的天线结构。根据螺旋的绕向和周长等参数的不同，可以分为轴向模螺旋天线和法向模螺旋天线。轴向模螺旋天线在一定的频段范围内能够产生较强的轴向辐射，具有较宽的频带特性和较好的圆极化性能，适用于卫星通信、雷达等领域；法向模螺旋天线则主要用于短距离通信和低频段应用，其带宽相对较窄，但结构简单、成本低廉。

2.2 多频带天线

多频带天线是通过特殊的设计，使其能够在多个离散的频段上工作。常见的多频带天线设计方法包括加载技术、缝隙耦合技术等。

加载技术是在天线的特定位置上添加电感、电容等元件，改变天线的谐振特性，从而实现多频段工作^[1]。例如，在单极子天线的适当位置加载电感，可以使其谐振频率降低，从而扩展低频段的工作范围；同时，通过合

理配置加载元件的参数,还可以在高频段形成新的谐振点,实现多频带工作。加载技术可以在不改变天线基本结构的前提下,有效地拓展天线的频带,但会增加天线的设计复杂度和损耗。

缝隙耦合技术是利用天线表面的缝隙与馈线之间的电磁耦合作用,激发不同频段的谐振模式。通过在天线表面开不同尺寸和形状的缝隙,并合理设计馈电结构,可以使天线在多个频段上实现良好的辐射性能。这种技术能够有效地提高天线的集成度和多频段性能,但对加工工艺和设计精度要求较高。

2.3 可重构天线

可重构天线是一种能够根据实际需求动态改变其工作频段、方向性等参数的天线。它通常采用微机电系统(MEMS)技术、变容二极管等可控元件来实现天线性能的重构。例如,通过控制变容二极管的电容值,可以改变天线的谐振频率,从而实现频段的切换。可重构天线具有高度的灵活性和适应性,能够在复杂多变的电磁环境中优化天线的性能,但其成本较高,技术难度较大,目前主要应用于军事通信、智能无线通信等高端领域。

3 影响多频段特性的因素

3.1 天线结构参数

对于由振子组成的天线,如对数周期天线,振子的长度和间距直接影响着天线的谐振频率和频带特性。较短的振子长度对应较高的谐振频率,而合理调整振子间距可以优化天线在不同频段上的匹配性能,使天线在较宽的频率范围内保持相对稳定的辐射特性。

天线的整体尺寸和形状对其多频段性能也有重要影响。较大尺寸的天线通常能够在较低频段上实现更好的辐射效率和方向性,但会限制其高频段的性能;而复杂的天线形状可以通过引入多个谐振模式来拓展频带,但也会增加设计和加工的难度。例如,采用分形结构的天线可以在有限的尺寸内实现多频段工作,但其制造工艺相对复杂。

3.2 天线材料特性

天线材料的电导率和介电常数会影响天线的辐射电阻、损耗电阻以及电场分布等参数,从而对天线的多频段特性产生影响。高电导率的材料可以降低天线的损耗电阻,提高辐射效率,但可能会影响天线的谐振频率;介电常数较高的材料会使天线的尺寸减小,但也会增加介质损耗和改变天线的电场分布,进而影响天线的频带特性。因此,在选择天线材料时,需要综合考虑其电导率和介电常数等因素,以优化天线的多频段性能。

在实际应用中,天线可能会受到温度、湿度等环境

因素的影响。材料的稳定性和温度特性决定了天线在不同环境条件下的性能变化情况。例如,一些天线材料在高温下可能会出现电性能的劣化,导致天线的谐振频率漂移、增益下降等问题,从而影响其多频段工作的稳定性^[2]。因此,选择具有良好稳定性和温度特性的天线材料对于保证天线的可靠运行至关重要。

3.3 周围环境因素

周围环境中的其他电磁源会对发射天线产生电磁干扰,影响其多频段特性和辐射效率。例如,附近的高压线、通信基站等会产生较强的电磁场,可能会与发射天线的电磁场相互耦合,导致天线的输入阻抗发生变化,谐振频率偏移,从而影响天线在各个频段上的正常工作。为了减少电磁干扰的影响,可以采用屏蔽措施、合理选址以及优化天线的布局等方法。

天线所处的地形和周围的障碍物也会对其多频段特性产生显著影响。在山区等地形复杂的地区,信号容易受到山体的阻挡和反射,导致信号衰减和多径效应增强,影响天线的覆盖范围和信号质量。此外,建筑物、树木等障碍物也会对天线的辐射方向图产生遮挡和扭曲,使天线在某些方向上的辐射性能下降。因此,在进行天线选址和安装时,需要充分考虑地形和障碍物的因素,采取适当的措施来优化天线的辐射环境。

4 辐射效率的理论分析与计算方法

4.1 辐射效率的定义与表达式

天线的辐射效率(η)定义为天线辐射出去的功率(P_r)与输入到天线的总功率(P_{in})之比,即: $\eta = P_r / P_{in}$ 。其中,输入到天线的总功率包括辐射功率和天线内部的损耗功率(P_l),即 $P_{in} = P_r + P_l$ 。因此,辐射效率也可以表示为: $\eta = P_r / (P_r + P_l)$ 。辐射效率反映了天线将输入功率转化为辐射功率的能力,是衡量天线性能的重要指标之一。

4.2 辐射电阻与损耗电阻的计算

辐射电阻(R_r)是一个等效电阻,它表示天线辐射功率的能力,与天线的结构、尺寸、工作频率以及周围环境等因素有关。对于简单的天线结构,如偶极子天线,可以通过理论公式计算其辐射电阻。例如,半波偶极子天线在自由空间中的辐射电阻约为 73Ω 。对于复杂的天线结构,通常需要采用数值计算方法,如矩量法(MoM)、有限元法(FEM)等来计算辐射电阻。

损耗电阻(R_l)主要包括天线导体的欧姆损耗、介质损耗以及表面波损耗等。导体的欧姆损耗与天线材料的电导率、天线的长度和横截面积等因素有关,可以通过公式 $R_l = \rho l / S$ (其中 ρ 为材料的电阻率, l 为导体长度,

S为导体横截面积)进行估算。介质损耗则取决于天线所使用的介质材料的介电常数和损耗角正切,可通过相应的介质损耗公式计算。表面波损耗在高频段较为显著,它与天线的结构和周围介质的特性有关,计算较为复杂,通常也需要采用数值方法进行分析。

4.3 基于电磁场理论的辐射效率计算方法

根据电磁场理论,天线的辐射场可以通过求解麦克斯韦方程组得到。通过对辐射场的分析,可以计算出天线在各个方向上的辐射功率密度,进而得到天线的总辐射功率。同时,结合天线的输入功率和损耗功率的计算,可以准确地计算出天线的辐射效率。这种方法具有较高的准确性,但计算过程较为复杂,需要借助专业的电磁场仿真软件,如HFSS、CST等进行数值计算和分析。

5 多频段天线性能优化措施

5.1 天线结构优化

探索新型的天线结构,如基于超材料、电磁带隙(EBG)结构等的天线设计,能够有效地改善天线的多频段特性和辐射效率。超材料具有独特的电磁特性,可以通过人为设计其介电常数和磁导率,实现对电磁波的灵活调控。例如,利用超材料设计的天线可以在不增加天线尺寸的前提下,显著拓展频带宽度和提高增益。电磁带隙结构可以抑制表面波的传播,减少天线的损耗,提高辐射效率,并能够改善天线的方向性和频率选择性。通过优化天线的尺寸和形状参数,使其在满足多频段工作要求的同时,尽量减小天线的体积和重量。例如,采用曲线形、折叠形等结构来设计天线,在有限的空间内实现更好的电性能。利用计算机辅助设计(CAD)和优化算法,对天线的尺寸和形状进行反复迭代优化,寻找最优的设计方案,以提高天线的性能指标,如带宽、增益、辐射效率等。

5.2 材料选择与改进

积极研发新型的天线材料,如具有高电导率、低损耗、良好温度稳定性和机械性能的复合材料^[3]。例如,碳纳米管复合材料具有优异的电学性能和机械性能,将其应用于天线制造中,可以提高天线的辐射效率和可靠性,同时减轻天线的重量。此外,还可以研究具有特殊电磁特性的功能材料,如铁氧体材料、磁性复合材料等,用于改善天线的磁导率和频率特性,进一步拓展天

线的多频段性能。采用表面处理技术对天线材料进行改性,以降低天线的表面电阻和介质损耗。例如,对金属天线表面进行镀金、镀银等处理,可以提高其表面电导率,减少欧姆损耗;对于介质材料表面,可以采用等离子体处理、涂层等技术,改善其表面的介电性能,降低介质损耗,从而提高天线的辐射效率和多频段性能。

5.3 电磁环境优化

针对周围环境中的电磁干扰,采用电磁屏蔽和滤波技术来减少其对天线性能的影响。在天线周围设置金属屏蔽罩,可以有效地阻挡外部电磁干扰进入天线区域,同时对天线自身产生的电磁泄漏也具有一定的抑制作用。此外,在天线的馈线系统中加入合适的滤波器,可以滤除不需要的频率成分,保证天线在个工作频段上的信号纯净度,提高天线的抗干扰能力和多频段性能。利用智能自适应技术,使天线能够根据周围电磁环境的变化自动调整其工作参数,如频率、方向性、增益等。例如,采用基于传感器的反馈控制系统,实时监测周围电磁环境的参数变化,如干扰信号的强度和频率,通过算法控制天线的可重构元件或调整天线的工作模式,使其始终保持在最佳的工作状态,从而提高天线在复杂电磁环境下的性能稳定性和可靠性,进一步优化其多频段特性和辐射效率。

结束语

综上所述,无线电广播发射天线的多频段特性与辐射效率研究涵盖多个关键方面,从基础原理到具体的结构设计、材料选择以及电磁环境优化,每个环节都对天线性能有着重要影响。通过不断探索新型天线结构、研发先进材料以及优化电磁环境,我们能够显著提升天线的多频段工作能力和辐射效率,从而更好地适应现代通信技术的发展需求。

参考文献

- [1] 常青.无线电中波广播发射技术与维护[J].科技创新与应用,2023,13(7):165-168.
- [2] 侯莉.小功率短波发射台天馈线系统间干扰分析研究[J].长江信息通信,2022,35(10):232-234.
- [3] 谢继杨,蒋正,魏召唤,等.Ricker脉冲功率合成方法及辐射效率[J].强激光与粒子束,2024,36(5):117-123.