

基于超材料的短波天线宽带化与效率研究

任利媛 周 瑾

陕西烽火通信集团有限公司 陕西 宝鸡 721000

摘 要：超材料凭借独特电磁特性，为短波天线性能优化开辟新路径。研究通过分析电磁带隙、分形及可调超材料特性，实现短波天线宽带化设计；利用超材料优化天线阻抗匹配、辐射特性、抑制损耗，并协同提升多天线系统效率。实验与仿真表明，基于超材料的设计有效拓宽了短波天线带宽，显著提升了辐射效率与整体性能，为短波通信技术发展提供了创新方案与理论支撑。

关键词：超材料；短波天线；宽带化；效率

引言

短波通信在应急通信、军事通信等领域占据关键地位，然而传统短波天线存在带宽窄、效率低等问题。随着超材料技术的发展，其超常电磁响应特性为短波天线性能提升带来机遇。本文针对短波天线宽带化与效率提升需求，深入研究电磁带隙、分形及可调超材料在天线设计中的应用，探索通过超材料优化天线阻抗匹配、辐射特性及抑制损耗的方法，旨在突破短波天线性能瓶颈，推动短波通信技术的创新发展。

1 超材料与短波天线概述

1.1 超材料

超材料，作为一类极具创新性的人造材料，具备自然界材料所不具备的超常物理性质。其独特性质并非源于材料自身化学成分，而是得益于精密设计的几何结构与微观尺寸。这些微结构的尺度小于其作用的波长，从而能够对波产生显著影响。例如，在电磁超材料中，通过精心设计亚波长尺度的金属或介质结构单元，并按照特定规律排列，可实现对电磁波的独特操控。像负折射率超材料，能使电磁波的传播方向与传统材料中相反，呈现出违背常规折射定律的现象。这种特殊性质使得超材料在众多领域展现出巨大潜力，如在光学领域，超材料可用于制造超透镜，突破传统光学透镜的衍射极限，实现超高分辨率成像，有望为微观观测、光刻技术等带来变革；在通信领域，超材料天线可提高天线的接收效率和方向性，改善信号传输质量。从本质上讲，超材料的设计思想是通过人工构建特殊结构，突破自然材料性能的限制，为材料科学与相关工程应用开辟了全新路径。

1.2 短波天线

短波天线，是工作于1至30MHz短波波段的发射或接收天线。短波传输路径主要有两种：一是依靠电离层反射的天波，由于太阳活动对电离层状态影响较大，致使

天波传输的波长会随太阳活动强弱而变化；二是沿地表传播的地波，该方式受地面对介电常数和电导率影响产生损耗，在海水等相对介电常数和电导率较大的环境中，地波损耗较小，因此在海事通信中得到较多应用。短波通信无需中继站的特性，使其成为现代远距离无线电通信的重要手段之一。短波天线形式多样，常见的包括对称天线、同相水平天线、倍波天线、角型天线、V型天线、菱形天线和鱼骨形天线等。与长波天线相比，短波天线有效高度更大，辐射电阻更高，具备效率高、方向性好、增益大以及通频带宽等优势。在实际应用中，不同场景会选用不同类型的短波天线，如超远距离通信常采用鞭状天线，而在短波盲区（20-100公里）通信时，多使用环状设计的无盲区天线。

2 基于超材料的短波天线宽带化设计

2.1 基于电磁带隙（EBG）结构的宽带化设计

电磁带隙（EBG）结构具有独特的电磁特性，能够对特定频率范围内的电磁波产生抑制或禁带效应。在短波天线宽带化设计中，EBG结构的引入可有效改善天线的性能。EBG结构通过周期性排列的单元结构，形成特定的电磁环境。这些单元结构通常由金属或介质材料构成，其尺寸、形状及排列方式决定了EBG结构的电磁特性。当电磁波入射到EBG结构时，在满足特定条件下，会发生布拉格散射等现象，导致某些频率的电磁波无法在结构中传播，从而形成带隙。对于短波天线而言，传统天线在工作频带内可能存在多种干扰，影响其宽带性能。EBG结构可通过合理设计，抑制天线表面波的传播。表面波在传统天线传播过程中，会造成能量损耗与干扰，限制天线的带宽与辐射效率。EBG结构的带隙特性能够阻止表面波在特定频率范围的传播，使天线辐射更加集中在所需频段，减少能量向其他方向的泄露。例如，将EBG结构设计在天线的接地平面或辐射贴片附

近,可有效抑制表面波,优化天线的辐射方向图,提升天线在宽带范围内的辐射效率,进而实现天线的宽带化设计。EBG结构还能与天线的其他部分相互作用,调节天线的阻抗匹配。在不同频率下,通过调整EBG结构的参数,可使天线的输入阻抗更接近馈线的特性阻抗,降低反射系数,提高天线对不同频率信号的接收与发射能力,进一步拓宽天线的工作带宽^[1]。

2.2 基于分形超材料的宽带化设计

分形超材料以其独特的分形几何特性在短波天线宽带化设计中展现出巨大潜力。分形结构具有自相似性和空间填充性等特点,这些特性为超材料在天线领域的应用带来了新的思路。分形结构的自相似性意味着其在不同尺度下具有相似的几何形状。在分形超材料中,这种自相似结构能够在多个频率上产生谐振。由于不同尺度的结构对应不同的谐振频率,多个尺度的结构组合在一起,使得超材料能够在较宽的频率范围内产生谐振响应。例如,经典的分形结构如sierpinski分形、koch分形等,将其应用于超材料单元设计中,当电磁波作用于这些分形超材料单元时,不同尺度的分形结构会在各自对应的频率上产生谐振,从而实现宽带响应。分形结构的自相似性可有效提高超材料的空间利用效率。在短波天线设计中,有限的空间内需要实现宽带特性,分形超材料通过其独特的空间填充方式,在较小的体积内实现了复杂的电磁响应。相比传统的天线结构,分形超材料能够在相同的物理空间内引入更多的电磁谐振模式,增加了天线与电磁波相互作用的机会。通过将分形超材料应用于天线的辐射单元或加载结构中,可显著拓宽天线的工作带宽。分形超材料还能与天线的其他部分协同工作,优化天线的整体性能。如与天线的馈电结构相结合,可改善天线的阻抗匹配,使天线在宽频带内都能保持较好的输入阻抗特性,提高天线对不同频率信号的传输效率,实现短波天线的宽带化设计目标。

2.3 基于可调超材料的宽带化设计

可调超材料为短波天线宽带化设计提供了更为灵活的解决方案,其独特的可调节特性能够适应不同的工作需求。可调超材料通常通过外部激励或改变材料自身的物理性质来实现电磁参数的调节。外部激励方式多样,如通过施加电场、磁场或光场等。以电场激励为例,某些超材料中含有电调谐元件,当外部电场发生变化时,这些元件的电学性质改变,进而影响超材料整体的电磁参数,如介电常数或磁导率。通过合理设计超材料的结构与组成,使其在不同的电场强度下呈现出不同的电磁特性。在短波天线宽带化设计中,可调超材料的应用可

使天线具备自适应调整工作带宽的能力。在不同的工作环境或通信需求下,通过调节外部激励信号,改变超材料的电磁参数,使天线能够在不同的频率范围内实现良好的辐射与接收性能。当通信环境中存在干扰信号时,可通过调节可调超材料,改变天线的工作频段,避开干扰频率,确保通信的可靠性。在需要传输不同带宽信号时,也可通过调节超材料,使天线适应相应的带宽要求。可调超材料还可与天线的其他部分协同工作,实现更为精细的宽带化设计。与天线的匹配网络相结合,通过实时调节超材料的参数,优化天线的阻抗匹配,在更宽的频率范围内降低反射系数,提高天线的传输效率,从而实现短波天线的高效宽带化设计^[2]。

3 基于超材料的短波天线效率提升研究

3.1 基于超材料的天线阻抗匹配优化

(1) 超材料独特的电磁响应特性为天线阻抗匹配开辟了新路径。通过设计具有特定介电常数与磁导率的超材料结构单元,能够在特定频段内实现与天线输入阻抗的动态适配。当超材料的等效电磁参数与天线工作频率下的阻抗特性相匹配时,可显著降低反射系数,减少入射波在天线端口的反射损耗,进而提高功率传输效率。

(2) 基于人工电磁结构的超材料可构建宽带阻抗匹配网络。周期性排列的超材料结构能模拟集总或分布式元件特性,通过调控尺寸、形状及单元间距,形成具频率选择性的阻抗变换网络。该网络可在短波频段对天线阻抗宽带补偿,使其在宽频带内阻抗匹配,避免能量反射与效率下降。(3) 超材料的可调谐特性为自适应阻抗匹配提供可能。引入变容二极管、MEMS开关等有源器件,可实现超材料电磁参数的动态调节。在短波通信环境中,当信道特性或天线工作状态发生变化时,通过实时调整超材料的结构参数,能够快速优化天线阻抗匹配,确保天线始终工作在高效传输状态,提升系统的整体性能。

3.2 基于超材料的天线辐射特性优化

(1) 超材料的负折射特性可有效调控天线辐射方向。利用超材料的反常电磁传播特性,将其加载于天线辐射结构周围,能够改变电磁波的传播路径,使辐射波束实现聚焦或定向辐射。通过精确设计超材料的结构布局 and 参数,可将天线辐射能量集中于特定方向,提高辐射增益,增强天线在目标方向的辐射强度。(2) 基于超材料的电磁带隙(EBG)结构能够抑制表面波传播,改善天线辐射性能。EBG结构通过周期性排列的金属贴片与介质层组合,在特定频段内形成带隙,阻止表面波在天线表面的传播,减少因表面波引起的辐射损耗和后向辐射。EBG结构可降低天线与周围环境的电磁耦合,提

高天线的辐射效率和前后比,优化辐射方向图。(3)超材料的各向异性特性为天线极化特性调控提供了手段。通过设计具有不同取向的超材料结构单元,可实现对电磁波极化方式的灵活控制。在短波天线中,利用超材料可实现线极化、圆极化或椭圆极化的转换,满足不同通信场景对极化特性的需求,同时减少极化失配带来的信号损耗,提升天线的辐射性能和通信质量^[3]。

3.3 基于超材料的天线损耗抑制

(1)超材料的低损耗设计可直接降低自身电磁损耗。通过选用高电导率金属材料 and 低介电损耗介质,结合优化的结构设计,能够减少超材料在电磁波作用下的欧姆损耗和介质损耗。采用多层复合结构和渐变阻抗设计,可进一步降低结构中的电磁能量耗散,使超材料在增强天线性能的同时,自身损耗维持在较低水平。(2)利用超材料抑制天线表面波损耗。超材料的光子晶体结构或人工磁导体(AMC)结构能够与天线表面波相互作用,通过干涉相消原理抑制表面波的传播。当表面波在天线表面传播时,遇到超材料结构会发生反射和散射,部分表面波能量被抵消,从而减少表面波携带的能量损耗,提高天线的辐射效率。(3)超材料对天线辐射体的屏蔽作用可降低辐射损耗。在天线辐射体周围布置具有特定电磁特性的超材料屏蔽层,能够有效吸收或反射非辐射方向的电磁波,减少辐射体向非目标方向的能量泄漏。这种屏蔽作用不仅可以提高天线的辐射方向性,还能降低因杂散辐射引起的能量损耗,提升天线在有效辐射方向上的能量利用率。

3.4 基于超材料的多天线系统效率协同提升

(1)超材料可用于构建低互耦多天线阵列。通过设计具有高隔离度特性的超材料结构,插入在多天线单元之间,能够有效抑制天线单元间的电磁耦合。超材料的电磁带隙特性或谐振特性可阻断单元间的表面波传播和空间电磁波耦合,使各天线单元在工作时保持相对独立,减少互耦引起的信号干扰和效率下降,提高多天线

系统的整体性能。(2)利用超材料实现多天线系统的波束协同控制。超材料的电磁调控特性可对各天线单元的辐射相位和幅度进行精确调节,通过合理设计超材料结构和控制算法,能够使多天线系统形成具有特定指向性和增益的合成波束。在短波通信中,多天线系统可根据通信需求实时调整波束方向和形状,实现波束的协同扫描和跟踪,提高系统的通信容量和可靠性。(3)超材料赋能多天线系统的频率资源优化利用。通过设计具有频率选择特性的超材料结构,可使多天线系统在不同频段实现高效工作。超材料的频率选择表面(FSS)能够选择性地反射或透射特定频段的电磁波,使各天线单元在互不干扰的频段内工作,避免频率资源的浪费和相互干扰,提升多天线系统在复杂电磁环境下的频谱利用率和整体效率^[4]。

结语

综上所述,超材料在短波天线宽带化与效率提升方面展现出显著优势。基于电磁带隙、分形及可调超材料的设计,有效拓展了短波天线带宽;通过对天线阻抗匹配、辐射特性的优化及损耗抑制,大幅提升了天线效率。超材料的工程化应用仍面临成本、加工精度等挑战。未来需进一步探索超材料与短波天线的融合技术,优化设计方法,推动超材料在短波天线领域的广泛应用与技术革新。

参考文献

- [1]王淦,王娇.基于超材料的宽带红外吸波器[J].桂林电子科技大学学报,2024,44(2):216-220.
- [2]高珊.基于超材料的宽带双极化天线研究[J].无线互联科技,2020,17(18):114-115.
- [3]郑学梅,吴翰,赵紫微.基于超材料混合解耦结构的超宽带MIMO天线[J].陕西科技大学学报,2025,43(2):178-187.
- [4]杨阔,宾梓余,覃觅觅.基于超材料的双陷波小型化超宽带天线设计[J].实验室研究与探索,2020,39(2):64-67.