

机载隐蔽式共形短波天线理论研究与设计

张凯¹ 凤妮² 姜一凡¹

1. 陕西烽火诺信科技有限公司 陕西 宝鸡 721006

2. 陕西烽火电子股份有限公司 陕西 宝鸡 721006

摘要: 文章聚焦于机载隐蔽式共形短波天线的理论研究与设计实践。通过对电小天线理论、传输线理论和共形天线设计原理的深入探讨,构建了天线设计的理论基础。在仿真与优化环节,利用先进的电磁仿真软件精确建模,对天线性能进行全面分析,并据此进行迭代优化设计。本文为机载短波通信领域的发展提供了有力的技术支撑和理论依据,展现出天线在机载环境下的优越性能和广泛应用前景。

关键词: 机载隐蔽式; 小天线; 短波天线; 天线设计

1 短波天线基础理论与机载应用特点

1.1 短波通信概述

短波通信是属于高频通信范畴,频率范围2-30MHz,波长对应150米至10米的一种无线电通信技术。短波信号主要通过电离层的反射实现远距离传播,甚至可以进行全球通信。由于电离层的高度和密度容易受昼夜、季节、气候等因素的影响,短波通信的稳定性较差,噪声较大。但短波通信具有不受网络枢纽和有源中继体制约的远程通信能力,且运行成本低,所以在山区、戈壁、海洋等地区,或者发生战争、灾害等情况下,短波通信仍具有重要地位。

1.2 短波天线基本原理与性能指标

短波天线的基本原理是:当电流在天线导体中流动时,会产生电磁场,电磁场以电磁波的形式向空间传播。接收时,天线感应到空间中的电磁波,在导体中产生感应电流。短波天线在机载通信领域中扮演着重要角色,其种类繁多,设计各异,以适应不同飞行条件下的通信需求。现有国内外机载短波天线的类型及其基本原理,包括外挂式、嵌入式两大类。

1.2.1 外挂式机载短波天线

(1) 钢索天线

钢索天线是一种常见的外挂式短波天线,通常安装在飞机的外部结构上,如机翼或机尾。它利用钢索作为辐射体,通过调整钢索的长度、形状和位置来优化天线的性能。钢索天线具有良好的方向性和增益,能够在较远的距离上实现有效的通信。

(2) 尾帽天线

尾帽天线通常安装在飞机的尾部,可将飞机尾翼作为一具天线辐射体,是一种垂直极化的天线,尾帽天线通过改变其高度和形状来调整天线的阻抗匹配和辐射方

向,以适应不同的通信需求。这种天线在低频段具有较好的通信效果。

(3) 回形天线

回形天线,也称为环形天线,其形状类似于一个闭合的环形。它利用环形结构产生的磁场来辐射电磁波,通常用于实现全向性的通信覆盖。回形天线具有结构紧凑、易于安装和维护的优点。

1.2.2 嵌入式机载短波天线

(1) 并馈天线

并馈天线是一种嵌入式的短波天线,通常安装在飞机的机身或机翼内部。它采用多个辐射单元并联馈电的方式,通过调整各辐射单元的相位和幅度来实现天线的方向性和增益。并馈天线具有低轮廓、减小对飞行性能的影响以及易于与飞机结构集成的优点。

(2) 缺口天线

缺口天线是一种在飞机结构上切割出特定形状缺口的天线。通过调整缺口的形状和尺寸,可以改变天线的辐射模式和阻抗匹配。缺口天线具有结构简单、成本较低且易于实现的特点,但在使用时需要考虑对飞机结构完整性的影响。这些机载短波天线类型各有优缺点,选择哪种类型的天线取决于具体的通信需求、飞机结构以及安装条件等因素^[1]。

1.3 机载天线的特殊要求与应用特点

机载天线需满足严苛要求:能承受飞行中的热冲击与振动,确保在极端条件下稳定可靠运行。机械结构必须实用,能够适应飞机的各种飞行姿态和机动动作,同时保持天线的性能稳定。方向图应满足足够的覆盖范围,确保飞机在飞行过程中能够持续稳定地进行通信。天线工作时应满足短波系统的高压和大功率使用要求,以防止天线在高频信号下损坏或失效。

机载天线的应用特点主要体现在以下几个方面；第一、小型化：为了满足飞机对天线的尺寸要求，机载天线通常采用增加小型化的方法来实现小型化。第二、多频使用：为了适应不同频率的通信需求，机载天线需要具备多频使用的能力。第三、高效率：机载天线需要在有限的空间内实现高效的电磁波辐射和接收。第四、稳定性：机载天线需要在各种飞行姿态和环境下保持稳定的性能，确保通信的连续性。

2 机载隐蔽式短波天线设计理论

2.1 电小天线理论

电小天线是指其物理尺寸远小于工作波长的天线，通常电小天线的尺寸电长度仅仅是低频波长的几十分之一。在机载隐蔽式短波天线的设计中，由于飞机大小的限制和短波通信频段的要求，在机载隐蔽式短波天线设计中，尺寸需尽可能小以满足隐蔽性，但大尺寸能增加辐射电阻，提升辐射效率，满足通信系统需求。这两方面构成矛盾，需在设计中权衡。这使得电小天线的增益较低，且难以通过传统的宽带调节方法来实现阻抗匹配，电小天线也具有一些独特的优势，如结构紧凑、易于隐蔽等，这使其在机载天线设计中具有一定的应用价值。在机载隐蔽式短波天线的设计中，电小天线理论的应用主要体现在天线尺寸的确定和高效天线调谐器匹配网络优化、以及载体平台适应性设计上（窄带天线需要天线调谐器来设计匹配网络）上。通过合理的天线尺寸设计，可以确保天线在不影响飞机气动性能的前提下，实现良好的隐蔽性，通过优化天线调谐器高效匹配网络，可以提高天线的辐射效率，以改变短波系统的通信质量。为了实现这一目标，通常需要使用电磁仿真软件对天线进行建模和分析以及实际测试，以确定最佳的天线方案。

2.2 传输线理论

传输线是指用于传输电磁波的导线或导体系统，其特性阻抗和传输常数决定了电磁波在传输线上的传播特性。在机载隐蔽式短波天线的设计中，传输线理论的应用主要体现在天线的阻抗匹配和效率提升上。由于机载隐蔽式短波天线是一种电小天线，其阻抗匹配较为困难，为了与天线调谐器实现良好的阻抗匹配，需要借助传输线理论来分析天线的输入阻抗和反射系数，并采取相应的措施来调整天线的阻抗特性。例如，可以通过在天线上加载集总元件来改变其阻抗特性，从而实现与天线调谐器的高效匹配。传输线理论还可以用于优化天线的效率。在机载隐蔽式短波天线的设计中，天线的效率受到多种因素的影响，如天线的尺寸、形状、材料以及

馈线的特性等。通过传输线理论的分析，可以确定影响天线效率的关键因素，并采取相应的措施来优化天线的效率。

2.3 共形天线设计原理

共形天线是指天线的形状和尺寸与飞机或其他载体的外形相匹配，以实现良好的隐蔽性和气动性能。在机载隐蔽式短波天线的设计中，共形天线设计原理的应用主要体现在天线的形状和位置的确定上。为了实现良好的共形设计，需要了解飞机的外形和结构特点，并根据实际需求来确定天线的形状和位置。例如，可以将天线设计成与飞机垂尾或机翼的形状相匹配的形状，以实现良好的隐蔽性和气动性能。同时，还需要考虑天线的性能需求，如方向图、增益和效率等，以确保天线在满足隐蔽性和气动性能的前提下，实现良好的通信性能^[2]。在共形天线设计过程中，需要综合考虑多种因素，如天线的尺寸、形状、材料以及馈线的特性等。这些因素之间相互影响，需要通过多次迭代和优化来确定最佳的设计方案，还需要进行实际的测试和验证，以确保设计方案的可行性和可靠性。

3 机载隐蔽式共形短波天线结构设计

3.1 天线的基本结构

机载隐蔽式共形短波天线的基本结构是其实现功能的关键，这类天线通常设计为与飞机表面紧密贴合的共形结构，以确保在不影响飞机气动性能的同时，实现良好的隐蔽性和通信性能。天线的基本结构主要包括辐射体、支撑结构和馈电网络三部分。辐射体是天线中负责将电磁能量辐射到空间中的部分，通常由导电材料制成，形状和尺寸根据所需的通信频段和性能要求而定。在机载隐蔽式共形短波天线中，辐射体通常采用薄型或微带结构，以便更好地与飞机表面共形。支撑结构用于固定和支撑辐射体，确保其在飞机上的稳定性和可靠性。支撑结构通常由轻质、高强度的材料制成，如碳纤维复合材料、聚酰亚胺材料等，以满足飞机对重量和强度的要求。

3.2 天线尺寸与布局设计

由于飞机表面的空间有限，天线尺寸必须尽可能小，同时还需要考虑天线之间的干扰和耦合问题。在确定天线尺寸时，需要综合考虑通信频段、天线性能要求以及飞机表面的几何形状等因素。通常，天线的尺寸会根据所需的频段来确定，以确保天线在工作频段内具有良好的性能，还需要考虑天线与飞机表面的共形程度，以确保天线在不影响飞机气动性能的同时，实现良好的隐蔽性。在布局设计方面，需要考虑天线之间的相对位

置和距离,以避免相互干扰和耦合。通常,天线会分布在飞机的不同位置,如机翼两侧、垂尾前缘、机背、机头下部或者电流分布较大的位置等,以实现更好的通信覆盖和性能,还需要考虑天线与飞机上的其他设备和系统的兼容性,以确保飞机的整体性能和安全性。

3.3 天线馈电与阻抗匹配设计

天线馈电与阻抗匹配设计是机载隐蔽式共形短波天线设计的核心,馈电系统负责将电磁能量从发射机或接收机传输到天线,而阻抗匹配则用于调整天线的输入阻抗,以实现与发射机或接收机的良好匹配。在馈电系统设计中,需要考虑传输线的类型、长度和特性阻抗等因素。传输线的类型通常根据所需的频段和性能要求来确定,波导结构、探针等。传输线的长度和特性阻抗会影响天线的输入阻抗和辐射效率。因此在设计馈电系统时,需要综合考虑这些因素,以确保馈电系统的性能和稳定性。阻抗匹配设计是天线设计中的重要环节,由于机载隐蔽式共形短波天线的输入阻抗通常与发射机或接收机的输出阻抗不完全匹配,因此需要进行阻抗匹配设计。而阻抗匹配网络一般由天线调谐器完成,通过结合高效的算法,设计合理的阻抗匹配设计,以减小天线与发射机或接收机之间的反射系数,提高天线的辐射效率。

3.4 其他因素

在实际设计中,还需要考虑天线的极化方式、方向图等性能参数。极化方式通常根据通信需求来确定,如水平极化、垂直极化等。方向图则反映了天线在不同方向上的辐射强度分布,对于实现良好的通信覆盖和性能至关重要^[3]。

4 机载隐蔽式共形短波天线仿真与优化

4.1 仿真软件与模型建立

在机载隐蔽式共形短波天线的研发过程中,仿真软件的应用是不可或缺的一环。这些软件通过模拟天线在特定环境下的电磁性能,为设计团队提供了宝贵的预测和优化依据。常用的仿真软件除了CST MicrowaveStudio、HFSS (High Frequency Structure Simulator) 以及ANSYS Electronics Desktop等之外,还包括FEKO。以下是对FEKO软件的介绍:FEKO是EMSS公司旗下的一款强大的三维全波电磁仿真软件,广泛应用于天线设计、EMC分析、电磁散射、微波与射频电路设计等领域,能够处理大规模电磁问题,并提供定制化解决方案,提高产品设计可靠性和性能。FEKO软件具备多种求解技术,包括矩量法(MoM)、多层快速多极子法(MLFMM)、有限元法(FEM)等,以及这些方法的混合求解。这使得

FEKO能够高效、准确地模拟和分析各种电磁场问题,如天线的增益、方向图、输入阻抗等性能参数,电磁干扰(EMI)和电磁敏感度(EMS)问题,以及电磁散射特性等。在建立天线模型时,需要根据天线的实际尺寸、形状和材料特性,在仿真软件中构建出精确的三维模型。

4.2 优化设计

基于仿真结果的分析,需要对天线进行优化设计。优化设计可能涉及多个方面,包括天线尺寸、形状、材料以及馈电方式的调整。在优化天线尺寸和形状时,设计团队需要权衡多个因素。一方面,天线尺寸和形状的调整可以显著影响天线的性能表现,如提高增益、改善方向图等^[4]。另一方面,天线尺寸和形状的调整也可能受到飞机表面空间的限制,因此需要在满足性能要求的前提下,尽可能减小天线的尺寸和占用空间。优化材料选择也是提高天线性能的重要手段。不同的材料具有不同的电磁特性,如导电性、介电常数等,这些特性会直接影响天线的性能表现,根据天线的性能要求和环境条件,选择合适的材料来制作天线。在馈电方式方面,可以尝试不同的馈电结构和匹配网络,以改善天线与收发信机之间的匹配程度,降低驻波比,提高信号传输质量。还可以通过调整馈电点的位置和数量来优化天线的方向图和增益等性能参数。值得注意的是,优化设计是一个迭代的过程。在每次优化设计后,都需要重新进行仿真分析,以评估优化效果。

结束语

机载隐蔽式共形短波天线的设计是一个集理论、仿真与实践于一体的综合性课题。本文所提出的设计方案,在理论分析与仿真验证的基础上,展现了天线在机载环境下的优越性能和广泛应用前景。未来,随着通信技术的不断进步和飞机设计要求的日益提高,机载隐蔽式共形短波天线的设计将更加注重性能优化与实际应用需求的紧密结合,为机载通信领域的发展注入新的活力。

参考文献

- [1]严祥熙,孔祥鲲,卞博锐,等.覆盖L波段的宽带隐身雷达天线罩设计[J].微波学报,2019,35(02):48-53.
- [2]黄劲风.互质阵列无人机载雷达空时自适应处理技术现状[J].中国科技信息,2024,(07):47-49+52.
- [3]马昌.短波发射天线系统维护方法探讨[J].现代工业经济和和信息化,2021,6(22):26-27,30
- [4]代红,何丹.飞机隐身与雷达反隐身技术综述[J].电子信息对抗技术.2021,(6):18-19.