

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.013

影响战术导弹雷达天线罩透波性能因素

刘晓菲¹, 骆盛¹, 于秋兵², 付斌¹, 郭国强¹, 张亚坤¹, 徐顶国¹

(1. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 战术导弹雷达天线罩的透波性能是决定其末制导系统探测精度与打击效能的关键因素。基于时域有限差分法, 构建了典型的球形鼻锥雷达天线罩仿真模型, 系统分析了在 Ku 波段(14, 15, 16 GHz)及宽扫描角范围(-60°~60°)内, 罩壁厚度(5.8~6.4 mm)与材料介电性能(介电常数 2.8~3.4, 介电损耗 0.005)对透波率的影响。结果表明, 罩壁厚度对透波率影响显著, 且其最优值随工作频率和天线扫描角度的变化而改变。在 15 GHz 下, 天线罩头部区域(-20°方位角)的透波率随罩壁厚度增加从 58% 提升至 85%。材料介电常数是影响透波率的另一关键参数, 随着频率升高, 其影响机制趋于复杂和敏感, 尤其在高频条件下, 介电常数的微小变化会导致透波率趋势的显著改变。研究揭示了战术导弹雷达天线罩透波性能受罩壁厚度与材料介电常数复杂耦合作用, 且该耦合效应随频率与入射角动态演变。因此, 在工程设计中需对二者进行协同优化, 并综合考虑实际工作频段与天线扫描范围, 以实现宽角域、宽频带内的高效透波性能。

关键词: 雷达天线罩; 透波率; 罩壁厚度; 介电常数; 时域有限差分法

中图分类号: TQ320 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0092-06

Factors affecting wave transmission performance of tactical missile radar radome

LIU Xiaofei¹, LUO Sheng¹, YU Qiubing², FU Bin¹, GUO Guoqiang¹, ZHANG Yakun¹, XU Dingguo¹

(1. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China;

2. Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : The transmission performance of a tactical missile radome is a critical factor determining the detection accuracy and strike effectiveness of its terminal guidance system. Based on the finite difference time domain method, a simulation model of a typical spherical nose-cone radome was developed. The effects of the wall thickness (5.8 mm to 6.4 mm) and the material dielectric properties (dielectric constant of 2.8 to 3.4 and a dielectric loss tangent of 0.005) on the transmission rate were systematically analyzed across the Ku-band (14, 15, 16 GHz) and a wide scanning angle range (-60° to 60°). Results demonstrate that the thickness of the mask wall has a significant impact on the wave transmission rate, and its optimal value varies with the operating frequency and scanning angle. At 15 GHz, the transmission coefficient for the radome nose region (at -20° azimuth) increases from 58% to 85% as the wall thickness increases from 5.8 mm to 6.4 mm. Dielectric constant of materials is another crucial parameter determining the transmission performance. As the frequency increases, the influence of the dielectric constant becomes more complex and sensitive, particularly under high-frequency conditions, slight variations in the dielectric constant can lead to significant changes in the transmission coefficient trend. This study reveals that the transmission performance of the tactical missile radome is governed by a complex coupling effect between the wall thickness and the material dielectric constant, and this coupling effect evolves dynamically with frequency and incidence angle. Consequently, synergistic optimization of both wall thickness and dielectric constant must be performed in the engineering design, and taken into account the actual operating frequency band and antenna scanning range, to achieve high transmission performance across wide angular and frequency ranges.

Keywords : radome ; transmission coefficient ; wall thickness ; dielectric constant ; time domain finite difference method

通信作者: 刘晓菲, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达天线罩电性能设计、飞行器隐身设计

收稿日期: 2025-09-06

引用格式: 刘晓菲, 骆盛, 于秋兵, 等. 影响战术导弹雷达天线罩透波性能因素[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11):92-97.

LIU Xiaofei, LUO Sheng, YU Qiubing, et al. Factors affecting wave transmission performance of tactical missile radar radome[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11):92-97.

雷达天线罩作为保护雷达或天线系统免受环境影响的关键部件,在移动通信、雷达和飞行器等领域发挥着重要作用^[1-5]。战术导弹雷达天线罩不仅是末制导系统的必要组成部分,更是实现远程攻击与精确毁伤不可或缺的保障。雷达天线罩通常安装在战术导弹头部,在高马赫数飞行过程中承受严重的气动力和气动热载荷^[6],雷达天线罩需同时具备隔热、隔热、透波和承载等多重功能。

电性能是评估雷达天线罩效能的关键指标之一。由于采用介质材料制造,电磁波在传输过程中会受到吸收、反射和折射等影响,导致传输损耗、波束偏移以及插入相位差变化等问题,进而引起雷达导引头方向图失真、极化畸变,最终造成探测距离下降和瞄准误差增加。因此,雷达天线罩电性能的优劣直接关系到战术导弹制导精度和打击效能。

雷达天线罩的电性能受多种因素影响:不仅与电磁波频率、带宽及温湿度等外部环境条件耦合,也与材料介电特性及结构设计密切相关,尤其是罩壁厚度是影响透波性能的关键因素^[7-9]。根据罩壁厚度与波长的关系,单层结构可分为薄壁和半波壁两种类型。其中,薄壁厚度不超过工作波长的1/20,具有良好的宽带特性,但壁厚过薄导致力学强度不足,在实际应用中受到限制。单层罩壁由于其优异的耐高温特性和高强度,成为当前武器装备的主要选择。半波壁雷达天线罩的罩壁厚度为雷达波长一半的整数值,其计算见式(1)^[10]。

$$d = n\lambda_0 / (2\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}) \quad (1)$$

式中: d 为实心半波壁的厚度; λ_0 为自由空间中心工作频率对应波长; θ 为入射角; ε_r 为雷达天线罩介质材料的相对介电常数; n 为正整数。

但由于雷达天线罩不同位置处的 θ 值不同,因此为获得最佳透波率需按上式对雷达天线罩不同位置处的壁厚进行修正优化,设计过程计算量大,增加了雷达天线罩设计的难度和复杂程度。

天线罩壁厚选择需要综合结构强度、宽频特性,以及重量等因素,针对Ku波段雷达导引头,其天线罩一阶壁厚约为5.4 mm (16 GHz),已具备较好的结构强度特性,可胜任复杂应用场景,且一阶壁厚电性能优于二阶及以上壁厚条件,因此本文重点针对一阶壁厚天线罩开展相关仿真评估工作。笔者以战术导弹雷达天线罩为研究对象,采用

结构简单的等壁厚半波壁形式,结合时域有限差分法(FDTD)开展透波性能仿真。重点分析了影响雷达天线罩透波性能的关键因素,为雷达天线罩电性能设计提供参考。

1 雷达天线罩透波性能仿真方法

1.1 FDTD仿真

FDTD是一种用于求解时域麦克斯韦方程组的直接数值方法。该方法通过将麦克斯韦旋度方程离散化为有限差分格式,并采用与研究体电特性一致的空间网格进行建模,如图1所示的Yee网格单元,选取合适的初始场值和计算空间边界条件,利用蛙跳式算法对电场和磁场进行交替迭代求解。其显著优势在于建模过程简单直观,且天然适合并行计算,因此成为当前电磁仿真领域中应用最为广泛的数值方法之一。

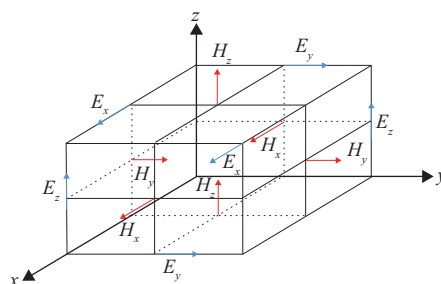


图1 Yee网格单元

Fig. 1 Yee grid cell

麦克斯韦旋度方程见式(2)、式(3)。

$$\nabla \cdot H(x, y, z, t) = \sigma E(x, y, z, t) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} E(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot E(x, y, z, t) = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; H 为磁场强度; E 为电场强度; μ 为磁导率; ε 为介电常数; σ 为电导率。

天线罩透波性能仅与复合材料的厚度、介电常数和介电损耗(其中非磁性材料体系,材料电导率与介电损耗呈线性关系^[11])相关。

将式(2)、式(3)在直角坐标系中展开,得到如下关于6个标量场分量的一阶耦合偏微分方程组,见式(4)。该方程组即为FDTD算法的基础,使用基于上述方程组为核心的商业软件EASTWAVE开展仿真校核与评估工作。

在雷达天线罩透波性能仿真过程中,天线罩模型网格采用体网格形式,网格尺寸为中心频率波长的1/18;边界条件选择完全匹配层(PML)吸收边界。

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right) \\ \frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 仿真方法精度校核

为验证FDTD算法的准确性,计算了典型雷达天线罩在典型Ku波段典型频点、方位角为 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 下的透波率,其天线阵面设置为等效泰勒分布矩形口径,仿真计算结果与测试结果对比如图2所示。

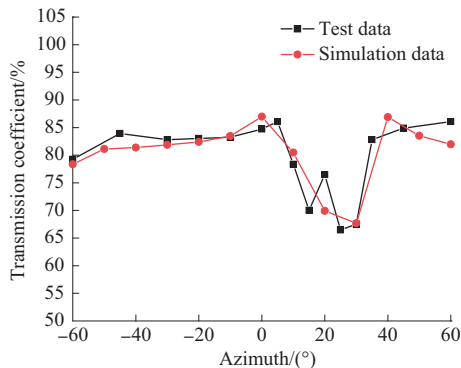


图2 雷达天线罩14 GHz透波率的仿真与实测结果对比

Fig. 2 Comparison of simulated and test data for radar radome transmission coefficient at 14 GHz

由图2可知,FDTD算法的透波率仿真计算与实测结果吻合度较好,最大误差为6.6%。其中,最大误差出现在扫描角 20° 处,对应电磁波入射雷达天线罩尖端处,由于此处雷达天线罩外形急剧变化,同时电磁波的散射效应大幅增加,导致数据出现大幅波动;除雷达天线罩尖端外,其余扫描角度下的误差均在4.5%以内,平均误差仅约为2%。实际工程研制中,由于工艺过程的影响,雷达天线罩并非完全的均匀介质体,同时雷达天线罩材料电性能参数的测试误差、雷达天线罩与天线的互耦效应等均会对雷达天线罩透波率的测试结果产生影响,导致雷达天线罩透波率仿真结果和实测结果存在一定偏差。

综上所述,基于FDTD算法的仿真结果与实际测试结果具有良好的一致性。该方法可有效用于雷达天线罩性能评估和设计优化工作,为后续研究提供了可靠的技术支撑。

2 雷达天线罩模型

战术导弹雷达天线罩因需求不同,具有半球形、尖锥形、球形鼻锥、正切卵形、幂次形等多种外形结构,选择最常见的球形鼻锥雷达天线罩作为研究对象。雷达天线罩模型顶部球体半径设置为20 mm,半锥角设置为 13° ,高度设置为750 mm;雷达天线罩选择常用的石英纤维增强氰酸酯复合材料,氰酸酯是透波领域常用的一种树脂基体,含有两个或两个以上的氰酸酯官能团($-OCN$),固化后具有高度对称的三嗪环结构。氰酸酯树脂在较宽的温度和频率范围内具有较好的透波率,其介电常数 ε 为2.6~3.2、介电损耗 $\tan\delta$ 为 $5.0 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$,常作为航空航天用透波天线罩的树脂基体^[12-13]。石英纤维增强氰酸酯复合材料中树脂基体的质量分数一般为38%。

为减小计算量,采用等效泰勒分布口径模拟天线阵面(口径参数设置为 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$),天线阵面倾斜角为 20° ,雷达天线罩仿真计算模型如图3所示。

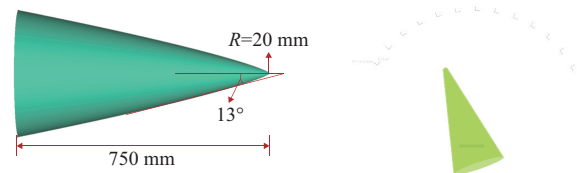


图3 雷达天线罩仿真计算模型

Fig. 3 Simulation model of radar radome

3 雷达天线罩透波性能结果分析

3.1 罩壁厚度对雷达天线罩透波率的影响

将雷达天线罩选为一阶壁厚,设置 λ_0 为20 mm(15 GHz)、 θ 为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 、 ε_r 为3.0、 n 为1,根据式(1)壁厚(T)范围设定为5.8~6.4 mm,石英纤维增强氰酸酯复合材料介电常数和介电损耗角分别设置为3.0和0.005(介电常数和损耗为复合材料的本征参数,其中介电常数符合混合法则,其数值受纤维和基体本征介电常数,以及相对体积分数影响^[14];介电损耗代表对电磁波的损耗能力,由极化损耗和电导损耗共同决定^[11]),计算了雷达天线罩在14 GHz($F_0-1 \text{ GHz}$, F_0 为中心频率),15 GHz(F_0)和16 GHz($F_0+1 \text{ GHz}$),方位角为 $-60^\circ \sim 60^\circ$ 条件下的透波率(扫描角度以垂直于天线阵面方向为 0°)。

图4为不同壁厚条件下的雷达天线罩透波率仿真结果。由图可知,当雷达工作频率为14 GHz时,在-60°~50°扫描角范围内,雷达天线罩头部(-20°方位角)的透波率随着罩壁厚度增加,由48%增加到66%。

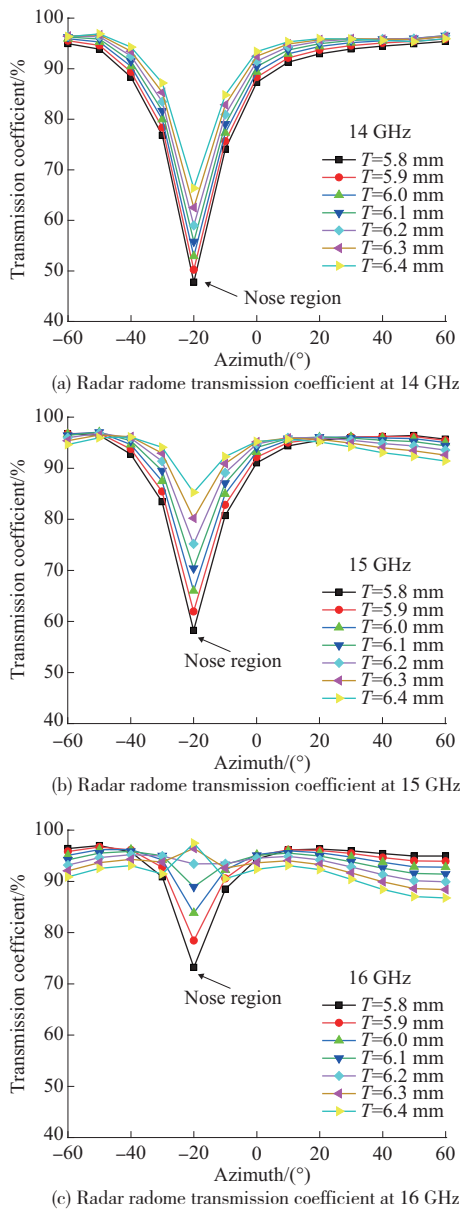


图4 不同罩壁厚度的雷达天线罩透波率仿真结果

Fig. 4 Simulation results of radar radome transmissivity with different radome wall thicknesses

当雷达工作频率为15 GHz (中心频点设为 F_0)时,随着罩壁厚度增加,雷达天线罩透波率在不同角域内呈现不同变化趋势:雷达天线罩头部的透波率随着罩壁厚度增加由58%增加到85%;在-60°和40°~60°扫描角范围内单调减小,透波率均值均大于90%;在-50°和20°~30°扫描角范围内先增大后减

小;在-40°~10°扫描角范围内逐渐单调增大。

当雷达工作频率为16GHz时,随着罩壁厚度增加,雷达天线罩透波率同样在不同角域内呈现不同变化趋势:雷达天线罩头部的透波率随着罩壁厚度增加由73%增加到97%;在-60°~-50°和10°~60°扫描角范围内单调减小;在-40°~30°和0°扫描角范围内先增大后减小;在-20°~-10°扫描角范围内则逐渐增大。随着电磁波频率的升高,雷达天线罩透波率随罩壁厚度变化的波动程度增大。

均匀介质雷达天线罩的透波率随雷达天线罩罩壁厚度呈现周期性变化,且随着电磁波频率的增加雷达天线罩透波率的周期性变化频率加快,因此存在一系列透波率峰值厚度,在该厚度下雷达天线罩的透波率达到最高,在邻近厚度区间内增加或减小罩壁厚度均使雷达天线罩透波率下降^[15]。由于电磁波在雷达天线罩罩壁上的入射角随着天线扫描角变化而逐渐变化,使得电磁波入射处的透波率峰值厚度(即半波壁厚度)逐渐变化,导致在5.8~6.4 mm厚度范围内不同雷达频率下雷达天线罩透波率随罩壁厚度的变化趋势产生不同。

进一步计算了在0°扫描角下雷达天线罩壁厚为5.8~7.0 mm时的透波率,计算结果如图5所示。从中可以看出,在不同雷达工作频率下,随着雷达天线罩罩壁厚度增加雷达天线罩透波率先增加后减小;随着雷达工作频率增加,雷达天线罩透波率峰值的厚度逐渐减小,14, 15 GHz和16 GHz时,雷达天线罩透波率峰值的罩壁厚度分别是6.8, 6.4 mm和6.0 mm。

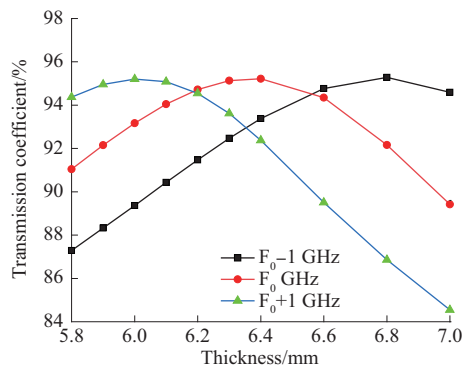


图5 0°扫描角下雷达天线罩透波率随罩壁厚度的变化

Fig. 5 Variation of radar radome transmission coefficient with thickness at a 0° scanning angle

罩壁厚度对透波率的影响显著且复杂,其变化趋势受工作频率和扫描角度的双重影响。随着频率升高,透波率随厚度的变化波动加剧,不同频率

下透波率峰值对应的最优厚度会有所调整。在实际设计中需结合雷达的工作频率、天线扫描角度及罩壁厚度参数进行优化选择。

3.2 雷达天线罩介电性能对雷达天线罩透波率的影响

雷达天线罩介电材料是影响其透波性能的核心参数之一,考虑到氰酸酯树脂存在组成元素和分子链等结构差异,导致氰酸酯树脂基体介电常数范围为2.6~3.2,进而导致石英纤维增强氰酸酯复合材料介电常数产生差异。因此,重点研究了不同介电常数对石英纤维增强氰酸酯复合材料天线罩透波性能的影响,其介电常数和介电损耗分别选取为2.8~3.4和0.005。

雷达天线罩不同介电常数下的透波率仿真结果如图6所示。由图可知,雷达工作频率为14 GHz时,在 -60° 和 $40^\circ\sim 60^\circ$ 扫描角范围内,随着材料介电常数增大雷达天线罩的透波率先增加后减小;在 $-50^\circ\sim 30^\circ$ 扫描角范围内,随着材料介电常数增大透波率逐渐增加;雷达天线罩头部的透波率随着材料介电常数增加由45%增加到65%。

当雷达工作频率为15 GHz(中心频点设为 F_0)时,随着材料介电常数增大,雷达天线罩透波率在不同角域内呈现不同变化趋势:在 $-60^\circ\sim -50^\circ$ 以及 $10^\circ\sim 40^\circ$ 扫描角范围内先增加后减小;在 $-40^\circ\sim 0^\circ$ 扫描角范围内单调增加;在 $50^\circ\sim 60^\circ$ 扫描角范围内逐渐减小;雷达天线罩头部的透波率随着材料介电常数增加由54%增加到85%。

当雷达工作频率为16 GHz时, $-60^\circ\sim -50^\circ$ 和 $20^\circ\sim 60^\circ$ 扫描角范围内,随着材料介电常数增大,雷达天线罩的透波率逐渐减小;在 $-40^\circ\sim 10^\circ$ 扫描角范围内,随着材料介电常数增大雷达天线罩的透波率逐渐先增加后减小;雷达天线罩头部的透波率随着材料介电常数增加由65%增加到95%。随着电磁波频率的升高,雷达天线罩透波率随材料介电常数变化的波动程度增大^[16-18]。

图7给出了 0° 扫描角下材料介电常数为2.8~3.4时雷达天线罩透波率。由图可知,当雷达工作频率为14 GHz和15 GHz时,随着材料介电常数的升高雷达天线罩透波率逐渐增加;当雷达工作频率为16 GHz时,随着材料介电常数升高雷达天线罩透波率先增加后减小,雷达天线罩透波率峰值的介电常数为3.1。

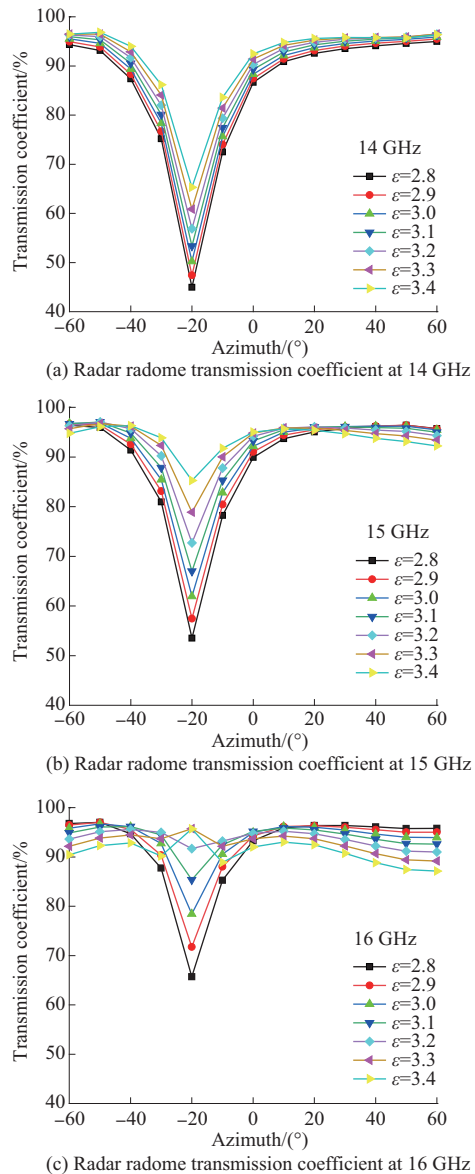


图6 不同介电常数的雷达天线罩透波率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of radar radome transmission coefficient for different dielectric constants

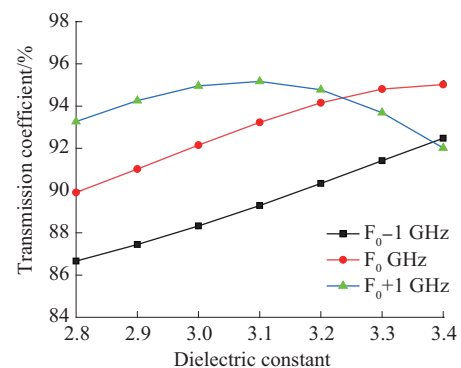


图7 0° 扫描角下雷达天线罩透波率随材料介电常数的变化

Fig. 7 Variation of radar radome transmission coefficient with material dielectric constant at a 0° scanning angle

综上所述,材料介电性能是决定透波率的关键因素,介电常数变化直接影响透波率的波动趋势^[19]。随着频率升高,介电常数对透波率的影响更加复杂且敏感,须根据不同工作频率和扫描角度合理选取介电常数以实现最佳透波性能。

4 结论

通过研究战术导弹雷达天线罩设计中的壁厚和介电性能等关键物理量,分析了雷达天线罩的设计难点,指导雷达天线罩电性能设计。研究结果表明,罩壁厚度的变化显著影响透波率特性,随着罩壁厚度从 5.8 mm 增加至 6.4 mm,雷达天线罩头部的透波率(15 GHz)由 58% 增加到 85%;且其最优值随工作频率和扫描角度的改变而变化;材料介电常数对透波率的波动趋势具有重要影响,雷达天线罩头部的透波率随着材料介电常数增加由 54% 增加到 85%;尤其是在高频条件下,透波率对材料参数和壁厚变化更为敏感。研究结果为后续天线罩设计提供了理论依据,并可支撑进一步的优化、测试以及性能验证工作,从而有助于实现天线罩在复杂电磁环境下的稳定性和高效性。

参考文献

- [1] DURUKAN S M, ÖZ Y, KARDAŞ A, et al. An example of multi-disciplinary work in aviation: radome design[J]. *Journal of Dynamics, Energy and Utility*, 2025, 1(1):39–67.
- [2] LI Y, SHI H L. Advanced driver assistance systems and autonomous vehicles[M]. Singapore: Springer, 2022.
- [3] BAJURI F, CHAI H T, ABDULLAH S S, et al. Recent advancement of radar and radionavigation in aerospace[J]. *Aerospace Materials*, 2025:473–495.
- [4] KHICHI S A, BHUTTO A W, MAITLO I, et al. Processing and characterization of aerospace composites for advanced radome applications[J]. *ACS Omega*, 2025, 10(32):36 421–36 431.
- [5] 李鹏,杜瑞奎,刘亚青,等.环氧树脂/石英纤维透波复合材料制备[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(2):29–33, 39.
LI Peng, DU Ruikui, LIU Yaqing, et al. Preparation of epoxy resin/quartz fiber wave-transparent composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(2):29–33, 39.
- [6] NAG A, RAO R R, PANDA P K. High temperature ceramic radomes (HTCR) – A review[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(15):20 793–20 806.
- [7] AINA A N, RIZAL M A M, RASED M F A, et al. Fiber-reinforced thermoplastic composites for future use in aircraft radomes: Biomimetic design approaches and its performances[J]. *Fibers and Polymers*, 2024, 25(12):4 503–4 527.
- [8] XU W Y, YANG Y D, CAO C W, et al. Robust variable thickness design of airborne radomes using 3-D-interpolation interval analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(3): 1 819–1 827.
- [9] 荆江,张昱煜,徐银芳,等.高超声速飞行器毫米波天线罩电气性能研究[J]. *微波学报*, 2015 (1):50–54.
JING Jiang, ZHANG Yuyu, XU Yinfang, et al. Research on electrical property of hypersonic aircraft millimeter-wave radome[J]. *Journal of Microwaves*, 2015 (1):50–54.
- [10] SHAVIT R. Radome electromagnetic theory and design[M]. America: John Wiley & Sons, 2018.
- [11] 王江涛,陈帅,沈承,等.吸波材料/结构及吸波-承载功能一体化结构研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(8):3 866–3 882.
WANG Jiangtao, CHEN Shuai, SHEN Cheng, et al. Progress of wave-absorbing materials/structures and wave absorbing-load bearing multifunctional structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8):3 866–3 882.
- [12] MOULISHWAR REDDY A, KANDASUBRAMANIAN B, RATH S K. Cyanate ester blends and composites to improve dielectric, mechanical, and thermal performance for functional applications[J]. *Polymer Bulletin*, 2024, 81(5):3 781–3 836.
- [13] 敖辽辉.石英纤维布/J-284PD 氰酸酯树脂复合材料的制备与性能[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(3):104–107.
AO Liaohui. Preparation and properties of quartz fiber cloth/J-284PD cyanate ester resin composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(3):104–107.
- [14] 南策文.非均质材料物理:显微结构-性能关联[M].北京:科学出版社,2005.
NAN Cewen. Physics of heterogeneous materials: correlation between microstructure and properties[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [15] 宾峰,孙文娟,刘洋.毫米波透波窗口设计技术[J]. *微波学报*, 2021, 37(4):21–24+29.
BIN Feng, SUN Wenjuan, LIU Yang. Design technique of millimeter wave transparent window[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(4):21–24+29.
- [16] 刘杰,朱荣全,尤嘉,等.宽频透波陶瓷天线罩梯度蜂窝微结构设计计算[J]. *兰州理工大学学报*, 2024, 50(5):1–6.
LIU Jie, ZHU Rongquan, YOU Jia, et al. Design and calculation of gradient honeycomb microstructure of broadband wave-transparent ceramic radome[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2024, 50(5):1–6.
- [17] HAIDER I, GUL I H, BAIG M M, et al. Dielectric and thermal properties of composite radome material under accelerated aging: An experimental study[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, 35(7). DOI:10.1007/s10854-024-12098-2.
- [18] YIN J J, WU Y L, SUN Y, et al. Wave transmittance performance prediction of curved radome prefabricated with continuous fibers plain weave fabric[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(7): 5 982–5 993.
- [19] 肖利平,尚小标,刘美红,等.高铝型硅酸铝纤维板介电特性和透波性能[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(12):2 621–2 628.
XIAO Liping, SHANG Xiaobiao, LIU Meihong, et al. Dielectric properties and electromagnetic wave transmission performance of high-Al aluminum silicate fiberboard[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(12):2 621–2 628.