

Design of Absorptive/Transmissive Integrated Aircraft Antenna Radome

Zhou Juehui¹, Kangqiang Chen², Tian Zhou², Xin Tang¹, Guangxuan Liu², Xue Li^{1*}

¹Shenzhen Kuang-chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen Guangdong

²Shenzhen Kuang-chi Advanced Technology Co. Ltd., Shenzhen Guangdong

Email: juehui.zhou@kuang-chi.com, xue.li@kuang-chi.com

Received: Sep. 30th, 2019; accepted: Oct. 16th, 2019; published: Oct. 23rd, 2019

Abstract

The application of new electromagnetic materials in the design technology of aircraft radome is introduced. On the basis of frequency-selective effect, by means of three-dimensional metamaterial design and the combination of non-metal microstructure and traditional metal microstructure, the shielding and absorption of electromagnetic wave is realized at the same frequency band. The design of absorptive/transmissive integrated radome is expected to improve the stealth effect of it. The statistical results show that the absorbing/transmissive integrated radome with wall structure of 11 mm composite metamaterial can absorb 72.34% - 96.47% of the L-band and achieve absorption of 78.45% - 94.49% at the Ku-band.

Keywords

Radomes, Transmission and Absorption, 3D Metamaterial, Non-Metallic Microstructure

航空天线罩吸波透波一体化设计

周珏辉¹, 陈康强², 周添², 唐鑫¹, 刘光炬², 李雪^{1*}

¹深圳光启高等理工研究院, 广东 深圳

²深圳光启尖端技术有限责任公司, 广东 深圳

Email: juehui.zhou@kuang-chi.com, xue.li@kuang-chi.com

收稿日期: 2019年9月30日; 录用日期: 2019年10月16日; 发布日期: 2019年10月23日

摘要

本文介绍了新型电磁材料在航空天线罩的设计技术中的应用, 通过借助三维超材料设计, 并引入非金属

*通讯作者。

微结构与传统金属微结构组合, 在实现选频透波的基础之上, 同时实现了电磁波在同一频段内的屏蔽和吸收。新型吸波透波一体化设计有望提升航空天线罩隐身性能。统计结果表明, 层厚11 mm的复合超材料罩壁结构的吸波透波一体天线罩在入射角 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的范围之内, 可以实现L波段72.34%~96.47%透波, 同时实现Ku波段78.45%~94.49%的吸收。

关键词

天线罩, 吸波透波, 三维超材料, 非金属微结构

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航空天线罩是功能性复合材料结构件, 材料需要满足介电性能、力学性能、工艺性能、质量和成本要求等。其材料设计伴随其功能变化不断发展, 根据不同的使用环境, 天线罩一般要求有较好的透波性能、随温度变化的稳定介电性能, 以及防雨蚀、雷击、阳光照射、大气老化等性能[1]。材料从早期的不饱和聚酯树脂、E-玻璃纤维发展出S-玻璃纤维/改性双马来酰胺树脂、D-玻璃纤维/改性双马来酰胺树脂复合材料等。伴随航空天线罩电气性能和隐身性能的不不断提升, 越来越多的航空天线罩在材料设计时开始应用频率选择材料(FSS), 得以在该种材料上实现对不同电磁频谱波段实现截然相反的性能响应。频率选择材料在具有一定承载功能以外, 可以实现对工作频段电磁波的高透过率, 对非工作频段电磁波进行反射截止。然而, 为了实现电磁散射控制和电磁兼容等更高技术特点要求, 航空天线罩需要采用更加复杂的复合超材料设计, 从而实现选频透波的基础之上, 对非工作频段内的电磁波进行屏蔽和吸收, 不再仅是将其反射到其他方向。本文介绍了一种低频透波、高频吸收的航空天线罩设计方法。

2. 材料设计方法

航空天线罩常用的壁结构包括有单层、A夹层、C夹层和多夹层结构等(见图1)。A型夹层结构由三层介质组成, 外表是比较致密的蒙皮, 中间则是较厚的低密度夹芯。蒙皮一般采用低介电常数、低介电损耗、高强度、低成本的纤维树脂增强材料。蒙皮材料比较合适的介电常数为1~4, 损耗角正切则为 $10^{-2}\sim 10^{-3}$, 介电常数随温度变化每 100°C 小于1%, 以减少电介质中离子迁移损耗、离子振动和变形损耗、电子极化损耗。低介电常数和损耗角正切有助于达到“最大传输”和“最小反射”的目的, 还有助放宽罩壁厚度公差, 降低制造成本和难度[1]。夹层中的夹芯材料通常有芳纶纸蜂窝、PMI泡沫等等。采用夹层结构不仅具有更好强度保持性、更低面密度, 还具有比单层板更为优异的透波性能。为了实现频率选择、吸波透波一体的技术特点, 还需要充分继承传统的复材成型工艺, 创新性的结合复合超材料功能层, 具体的材料设计方法如下。

电磁波在均匀介质中的传播可以用均匀传输线, 将多层介质问题等效为级联网络, 多层介质的示意图如图2所示。结合官建国等学者的研究, 将超材料功能层假设作为等效均匀介质分析[2]。将 n 层介质板等效为 n 级四端口网络, 网络总级联矩阵可以通过下式描述[3]。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$$

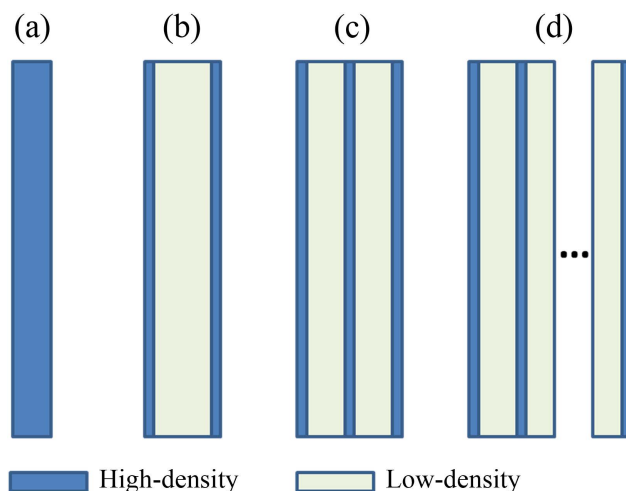


Figure 1. Wall construction of (a) monolithic, (b) A-sandwich, (c) C-sandwich and (d) multilayer radome
图 1. 天线罩壁(a) 单层、(b) A 夹层、(c) C 夹层和(d) 多层结构示意图

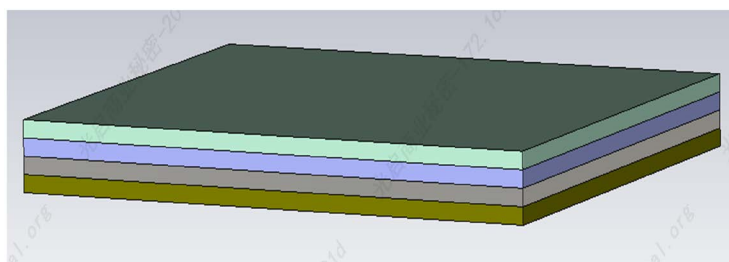


Figure 2. Multi-layer wall structure of radomes
图 2. 多层的罩壁结构

根据这种设计思想, 天线罩壁分别设计选频透波部分和吸波部分, 再将两者结合[4] [5]。透波部分实现低频高透波和 Ku 高截止特性[6]。对于低频吸波部分, 采用的方法是在让入射波产生谐振吸收以及入射反射叠加。下面将先讨论透波部分的设计。

2.1. 选频透波部分

天线罩透波部分采用 A 夹层, 两侧蒙皮为玻纤树脂复合材料, 采用纤维为 D-玻璃纤维(密度 2.1~2.2 g/cm³, 拉伸强度 2.3~2.5 GPa, 弹性模量 50~55 GPa), 树脂为环氧树脂, 复合材料介电性能可以通过 Lichtenecher 对数混合法则利用材料组分体积分数和各组分介电常数估算。玻纤树脂复合材料 10 GHz 介电常数设计值为 $\epsilon_1 = 3.3$, 损耗角正切为 0.01。夹芯材料为 Nomex 纸蜂窝, 根据厂家网上公开参数, 10 GHz 介电常数设计值为 $\epsilon_2 = 1.07$, 损耗角正切为 0.003。蒙皮与夹芯材料界面使用胶膜粘接。实现电磁色散设计和选频功能的金属微结构单元位于纤维树脂增强层和夹芯层界面。金属微结构为双层金属环单元, 经基因遗传算法优化设计, 其中 $L1 = 5.6$ mm, $L2 = 4.1$ mm, $D1 = 0.2$ mm, $H1 = 0.5$ mm, $H2 = 6$ mm, 整体厚度为 7 mm, 如图 3 所示。材料生产工艺采用预浸料袋压成型制作复合超材料层合板。

2.2. 吸波部分

吸波部分仍需满足低频高透波的要求, 因此在吸波材料选择上也需要有频率敏感性要求。可以采用的吸波方式是在所需吸收的电磁波频段范围内谐振损耗, 并将入射波与反射波叠加进行衰减。这种方法在单一频点或较窄带宽范围时有明显的吸收峰, 难以满足整个 Ku 波段吸波的需求, 并且考虑到实际工

程应用需求,大角度入射情况,我们采用一种三维立体吸波结构,整体厚度 4 mm。金属微结构呈对称半圆,并通过套印两块非金属碳系微结构连通形成回路,将入射电磁波能量转化为电阻发热损耗。微结构单元如图 4(a)所示,其单元尺寸为 $R1 = 2.6 \text{ mm}$, $H3 = 2 \text{ mm}$, $D2 = 0.6 \text{ mm}$,基板厚度为 0.2 mm。非金属微结构使用丝网印刷工艺套印于复合材料基板上对应位置,非金属微结构层方阻为 $100 \ \Omega/\square$ 。三维立体吸波结构单元如图 4(b)所示。

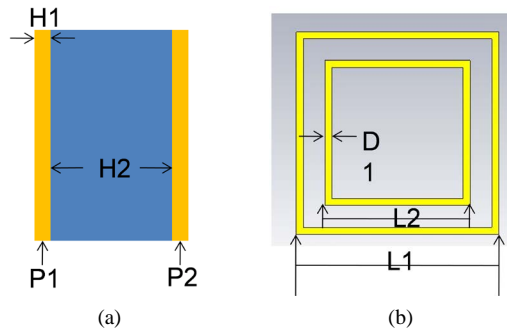


Figure 3. Selective transmission component of radomes: (a) Cross-section of A sandwich, (b) Topology of metallic unit structure
图 3. 天线罩选频透波部分: (a) A 夹层剖面图; (b) 金属微结构拓扑

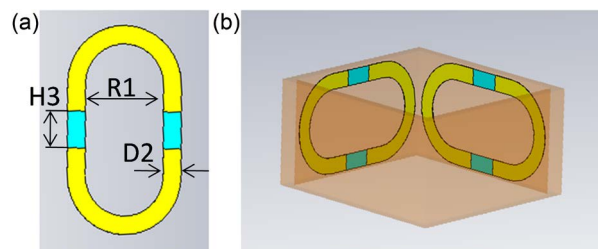


Figure 4. Selective absorption component of radomes: (a) Topology of metallic unit structure integrated with non-metallic microstructure, (b) Unit cell of metamaterial

图 4. 天线罩选频吸波部分: (a) 集成非金属微结构的金属微结构拓扑, (b) 微结构周期单元

2.3. 整体级联

天线罩吸透波一体化原理件由选频透波部分及吸波部分级联组成,总体厚度 11 mm,示意图如图 5 所示。各部分几何尺寸为 $T1 = 7 \text{ mm}$, $T2 = 4 \text{ mm}$, 周期 $P = 10 \text{ mm}$ 。不同于选频透波部分复合超材料的平铺方式,吸波部分的三维正交微结构垂直于选频透波的 A 夹层,两者可采用胶接工艺进行连接。

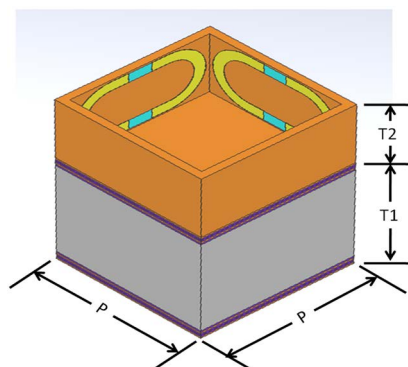


Figure 5. Illustration of a radome panel with selective transmission and absorption integrated functions

图 5. 天线罩频率选择吸透波一体化原理件示意图

3. 结果与分析

天线罩选频透波部分的电磁响应 S_{21} 仿真曲线如图 6 所示, 60 度的入射角度条件下, L 波段的透波率仍然可以达到 89.4% 以上, 垂直入射条件下透波率可以达到 96.3% 以上。在 TE 传输模式下, 对于 0~60 度入射角度条件下, Ku 频段的截止基本可以达到 -10 dB 以下, 如图 6(a) 所示; 在 TM 传输模式下, Ku 频段的截止基本可以达到 -5 dB 以下, 并且一直延续到 20 GHz 以上, 如图 6(b) 所示。

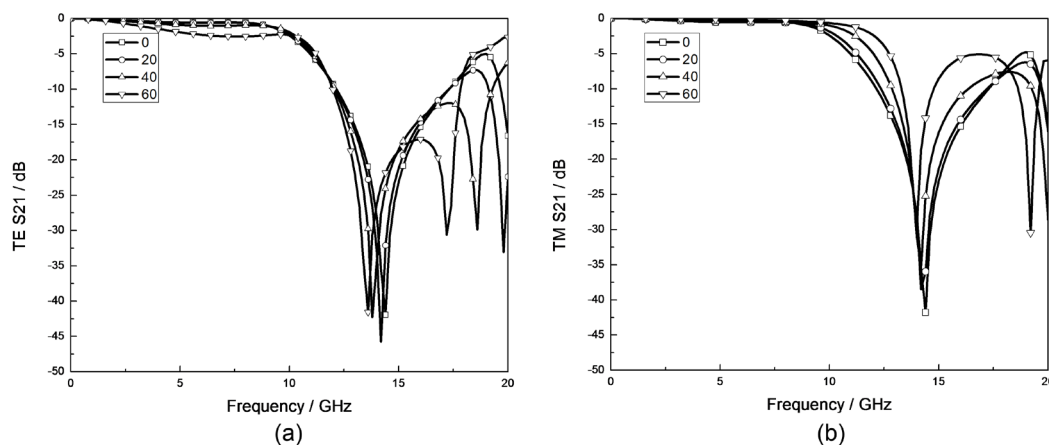


Figure 6. S_{21} curves of the selective transmission component: (a) TE mode, (b) TM mode

图 6. 天线罩选频透波部分电磁响应 S_{21} 曲线: (a) TE 模式; (b) TM 模式

天线罩吸波部分的电磁响应 S_{21} 仿真曲线如图 7 所示, 60 度的入射时, 在保证 L 波段透波的条件, Ku 波段的截止在 TE 模式传输时达到 -6 dB 以下, TM 模式时在 -4 dB 左右。由于三维立体结构的设计, 使得天线罩在吸波频段伴随入射角度的增加, 具有更好的吸波性能。当然, 这种三维结构在实际生产过程中具有一定的局限性。

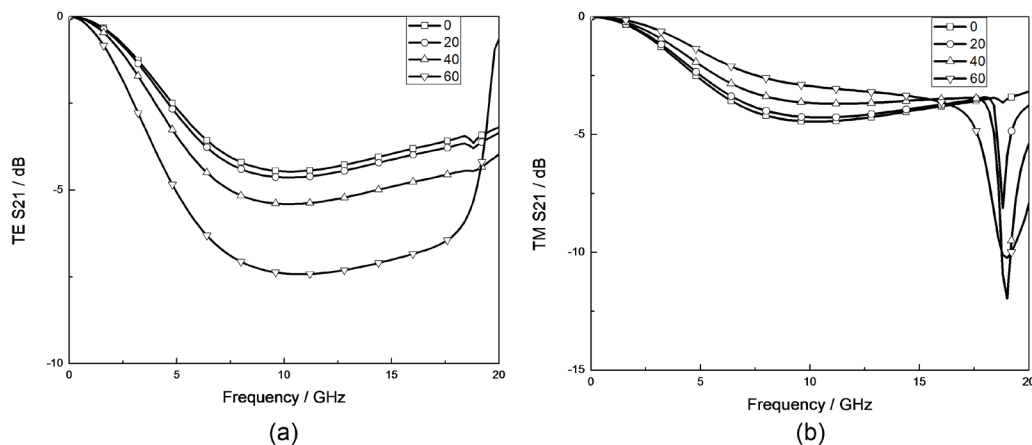


Figure 7. S_{21} curves of the wave absorption component of radome: (a) TE mode, (b) TM mode

图 7. 天线罩吸波部分电磁响应 S_{21} 曲线: (a) TE 模式; (b) TM 模式

由于级联后两组成部分之间的相互影响, 吸透波一体化设计并不是简单的物理叠加, 需要考虑到互耦影响、阻抗变化、入射角度变化等等。在原有分级设计基础之上, 通过整体优化设计, 从仿真结果来看基本达到了 L 波段高透波, Ku 波段高截止吸波的特性。垂直入射条件下, L 波段透波率为 88.5%, Ku 频段的吸收率为 94.4%; 在 60 度入射条件下, L 波段透波率为 72.3%, TE 传输模式下 Ku 频段的吸收率

为 83.5%，TM 模式下为 78.4%。仿真取得的 TE、TM 透射曲线、反射曲线和吸收曲线如图 8 所示，统计计算结果汇总于表 1。在实际试验验证中，可以采用自由空间测试方法、拱形场测试方法等，参考 GJB 2038A-2011《雷达吸波材料发射率测试方法》等等。

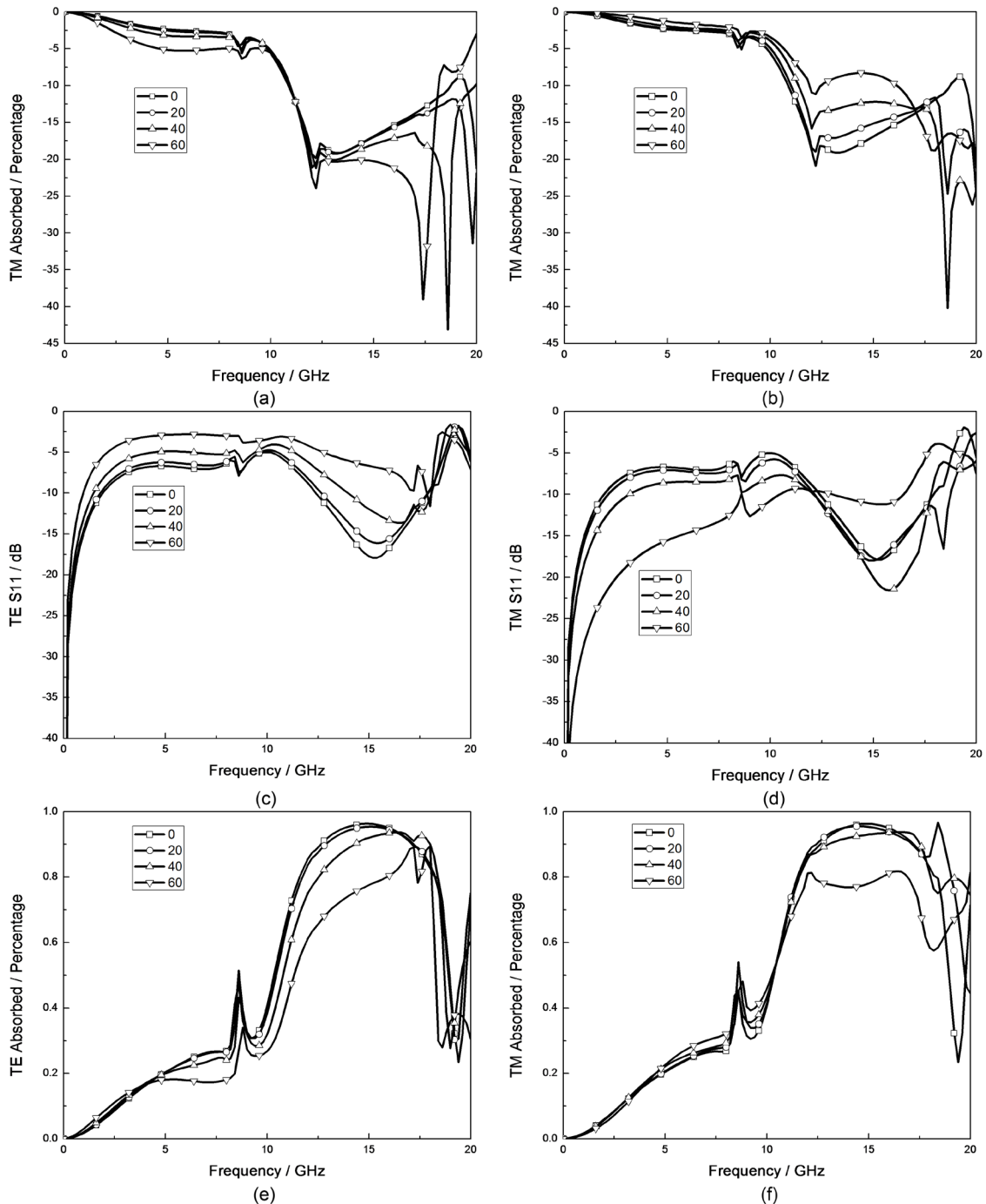


Figure 8. S21 curves of a radome panel with selective transmission and absorption integrated functions: (a) Transmission in TE mode, (b) Transmission in TM mode, (c) Reflection in TE mode, (d) Reflection in TM mode, (e) Absorption in TE mode, (f) Absorption in TM mode

图 8. 吸透波一体化天线罩平板电磁响应 S21 曲线：(a) TE 模式透射曲线；(b) TM 模式透射曲线；(c) TE 模式反射曲线；(d) TM 模式反射曲线；(e) TE 模式吸收曲线；(f) TM 模式吸收曲线

Table 1. Average values of the transmission and absorption rates of an absorptive/transmissive integrated radome panel
表 1. 吸透波一体化天线罩平板透波率、吸收率统计平均值

入射角度(°)	TE 透波(%)	TM 透波(%)	TE 吸收(%)	TM 吸收(%)
0	88.5%	88.5%	94.5%	94.5%
10	88.3%	88.8%	94.4%	94.6%
20	87.6%	89.6%	94.4%	94.6%
30	86.4%	91.0%	94.3%	94.5%
40	84.2%	92.7%	93.5%	93.2%
50	80.1%	94.8%	91.1%	88.3%
60	72.3%	96.5%	83.6%	78.5%

4. 结论

本文介绍了利用级联设计思想设计吸透波一体化机载天线罩方法,分别设计了厚度为 7 mm 的频选透波部和厚度为 4 mm 的吸波部,级联形成的厚度为 11 mm 原理件实现了低频透波、高频截止吸波的性能。从仿真数据看,在 0°~60°入射角度范围内,L 波段 TM 模式下透波率为 72.3%~88.5%,TE 模式下透波率为 88.5%~96.5%。与此同时,Ku 波段 TE 模式下吸收率在 83.6%~94.5%之间,TM 模式下吸收率在 78.5%~94.5%之间。

吸透波一体化设计方法较好平衡了低频透波和高频截止吸波之间的性能,三维立体复合超材料的使用为宽频宽角吸透波提供了更大设计空间,非金属微结构的引入在超材料电场增强局部带来了吸收能量转化为热量的效应,是一种有效的频率选择吸波设计手段。后续面向吸透波一体化设计天线罩的工程化应用,将继续开展复合超材料电磁性能随环境、天线功率变化机理以及失效机制等方面的研究。

基金项目

深圳市科技计划项目(JCYJ20151015165557141、JSGG20180507182842541)。

参考文献

- [1] 刘丽. 天线罩用透波材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 25-35.
- [2] Li, W., Wu, T.L., Wang, W., *et al.* (2014) Integrating Non-Planar Metamaterials with Magnetic Absorbing Materials to Yield Ultra-Broadband Microwave Hybrid Absorbers. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 022903. <https://doi.org/10.1063/1.4862262>
- [3] 张强. 天线罩理论与设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 79.
- [4] 熊波. 频率选择表面在吸波材料中的应用进展[J]. 信息记录材料, 6(3): 57-60.
- [5] Terracher, F. and Berginc, G. (2000) Thin Electromagnetic Absorber Using Frequency Selective Surface. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Salt Lake City, 16-21 July 2000, 846-849. <https://doi.org/10.1109/APS.2000.875349>
- [6] 甘为. 结构功能一体化 FSS 雷达罩仿真建模平台的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2017.