

新型吸/透波一体化超表面夹芯结构电磁特性研究

茅志文¹, 钱小妹¹, 卢俊杰¹, 徐焜¹, 姬宇璐¹, 邵泽山², 刘健²

(1. 电子科技大学航空航天学院, 成都 611731; 2. 空天飞行技术全国重点实验室, 北京 100074)

摘要: 吸/透波一体化超表面多功能结构, 有望显著提升未来飞行器隐身特性, 改善结构综合设计品质, 符合未来飞行器结构平台功能化、整体化发展趋势。本文提出了新型吸/透波一体化超表面夹芯结构, 经详尽考虑超表面谐振机制与芯体厚度影响, 引入超表面谐振单元集总等效电路与结构层传输线, 构建了基于结构等效电路模型的电磁特性一体化协同优化设计方法。经案例数值仿真和理论分析表明, 新型吸/透波一体化超表面结构能获得低插损透波 (10 GHz, 0.26 dB) 和超宽频低反射损耗 (3.8~16.6 GHz, $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$) 电磁特性, 且具有优异的极化不敏感性和角度稳定性, 验证了新型吸/透波夹芯结构一体化协同设计方法的有效性; 同时, 分析了结构的吸/透波电磁谐振机理, 讨论了芯层厚度及其介电常数对结构电磁传输特性的影响规律, 为新型吸/透波一体化超表面多功能复合材料结构优化设计与工程研制提供了研究思路。

关键词: 结构功能一体化; 超表面; 等效电路模型; 协同优化; 宽频

中图分类号: V218 文献标志码: A 文章编号: XXXX-XXXX (XXXX) XX-XXXX-XX

Research on Electromagnetic Performances for Novel Absorption/Transmission Integrated Sandwich Rasorber with Metasurfaces

MAO Zhiwen¹, QIAN Xiaomei¹, LU Junjie¹, XU Kun^{1*}, JI Yulu¹, SHAO Zeshan², LIU Jian²

(1. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. National Key Laboratory of Aerospace Flight Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The multifunctional absorption/transmission structure exhibits significant potential for enhancing stealth capabilities and optimizing design quality in next-generation aircraft. This aligns with the prevailing trends in the functional and integrated development of future combat platforms. In this study, a novel metasurface-based sandwich rasorber is proposed. The design thoroughly considers the electromagnetic resonance mechanisms of the metasurfaces and the influence of the core layer thickness. Specifically, The lumped equivalent circuit of the metasurface resonant unit and the transmission line model of the structural layer are analyzed, and an equivalent circuit model of the complete sandwich rasorber is formulated. Utilizing this equivalent circuit model, a collaborative optimization method is developed to enhance the electromagnetic performances of the absorption/transmission sandwich rasorber. Calculations and simulation results demonstrate that the optimized sandwich rasorber achieves a low reflection band ($|S_{11}| \leq -10\text{dB}$) from 3.8 to 16.6 GHz, while maintaining a transmission band with an insertion loss as low as 0.26 dB at 10 GHz. These results validate the effectiveness of the proposed collaborative design method for the absorption/transmission sandwich rasorbers. Additionally, a systematic investigation is conducted to study the electromagnetic resonance mechanism and assess the influence of core layer thickness and dielectric constants on the electromagnetic performances of the sandwich rasorber. These findings offer important guidance for the optimal design and practical engineering of novel metasurface-based multifunctional composite structures.

Key words: structure/function integrated; metasurface; equivalent circuit model; collaborative optimization; wideband

未来飞行器复合材料结构将日益注重“轻量化、高感知、强隐身、防隔热”等多功能一体化设计。吸/透波一体化超表面复合材料夹芯结构,作为一种新颖的电磁功能结构,有望协同实现吸/透波、承载和防隔热等性能要求,有利于强化飞行器机体结构综合设计品质^[1-6],尤其符合未来机体结构功能化、整体化发展趋势。吸/透波超表面夹芯结构主要由功能层和结构层组成。其中,功能层由有耗阻抗超表面与无耗频率选择表面构成,实现工作频带低损透波,同时,获得带外入射电磁波宽频吸收能力。结构层主要指蒙皮和芯体结构,对电磁特性尤其是带外吸波性能亦具有重要影响。可见,吸/透波功能层超表面与夹芯结构融合,有望实现电磁吸/透波特性与结构承载防隔热特性的协同强化。

吸/透波一体化超表面夹芯结构设计涉及包含小型化谐振单元的多层超表面与结构层的协同优化,不仅呈现出设计变量多、尺度跨度大、耦合关系强等特点,显著提升了设计复杂度^[7-12],而且结构层几何特性及其特性阻抗会与吸/透波超表面产生强耦合效应,很大程度控制和影响夹芯结构电磁传输特性。Lee^[13]等研究了聚甲基丙烯酸酯胺(polymethacrylimide, PMI)泡沫夹芯纤维增强复合材料夹芯结构。因受结构层额外透波损耗影响,其透波中心插损较高,达到 1.2 B。Yang^[14]等分析了关键结构层参数对 PMI 泡沫夹芯吸/透波结构透波性能的影响规律。Mao^[15]等基于等效电路建模,揭示了蜂窝夹芯吸/透波复合材料结构的电磁特性演变规律,发现蜂窝芯体厚度对结构电磁性能具有显著调控作用。张蓉^[16]和毛依婷^[17]分别提出的波纹梁夹芯和点阵夹芯吸/透波结构,均展现出优于泡沫夹芯的承载特性。Ozdin^[18]等研究了玻璃纤维增强聚四氟乙烯层合板(GF-PTFE)夹芯吸/透波结构。结构承载能力较好,但由于芯体介电常数高达 2.5,严重弱化了吸波带宽,同时增强了透波损耗。

上述研究表明,夹芯结构层虽作为力学承载主体,却显著影响结构电磁性能,尤其是,芯体厚度及其介电常数与超表面的耦合效应较为显著^[19]。可见,探索新型吸/透波一体化超表面夹芯结构协同设计规律,揭示芯体厚度与介电常数对结构吸/透波性能的影响机制,有利于提高结构电磁传输特性,其已成为新型吸/透波超表面夹芯结构一体化设计的关键问题之一。目前,吸/透波一体化超表面设计分析方法主要包括全波仿真与等效电路建模。全波仿真可精确表征结构物理和几何

特性,获得结构胞 S 参数及其电磁场分布,有利于揭示超表面电磁谐振机理。但全波电磁建模精度要求高,分析效率较低^[20]。相对而言,等效电路模型将结构层等效为串联传输线,把超表面等效为传输线上的并联集总元件,直接建立结构电磁分析模型。尤其是,通过超表面电路模型与集总参数的显式关联,可有效集成遗传算法,高效完成结构目标电磁特性寻优。因此,等效电路模型计算分析效率高、便于快速迭代,是开展吸/透波一体化超表面结构总体电磁传输特性研究的重要理论方法。然而,等效电路模型精度受限于超表面集总参数与其几何构型的映射精度。为充分发挥等效电路与全波分析各自优势,构建“等效电路+全波仿真”相结合的协同优化设计框架是一种重要的研究策略。

本文以 PMI 泡沫为芯材,拟提出一种新型吸波/透波一体化超表面夹芯结构。经综合考虑电磁超表面谐振机制与芯体厚度、介电常数等特性,引入超表面集总等效电路模型,提出夹芯结构的等效电路模型,构建新型吸/透波夹芯结构电磁特性协同优化设计方法,详尽分析结构电磁传输特性的极化敏感性和角度稳定性,并深入研究芯层厚度和介电常数对结构电磁传输特性的影响规律。

1 吸/透波一体化超表面夹芯结构

鉴于低介电常数结构层有助于实现良好的阻抗匹配,从而提升吸波与透波性能,本文夹芯结构材料体系遵循低介电常数选择原则^[19]。

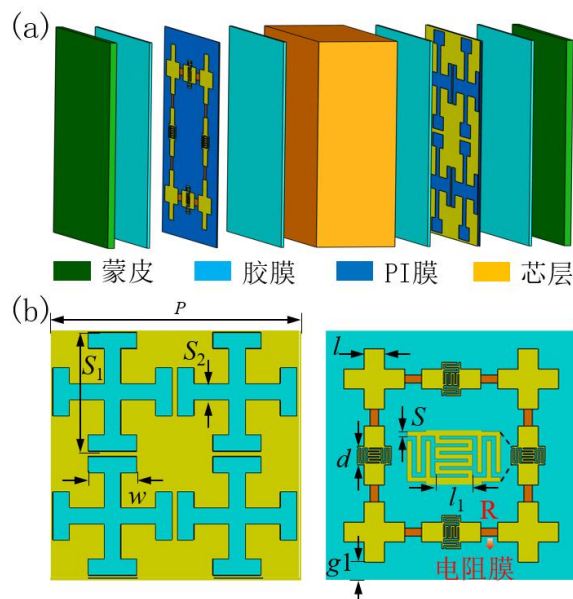


图 1 吸/透波一体化超表面夹芯结构

Fig.1 Absorption/transmission sandwich raserber with metasurfaces

图 1 给出了典型夹芯结构形式示例,其由结

构层和功能层超表面构成。其中，结构层包含芯层、蒙皮和胶膜，见图 1 (a)。为实现夹芯结构在吸波、透波、承载、隔热等方面的综合性能，本文选用 PMI 泡沫作为芯层，其相对介电常数为 1.3、介电损耗正切为 0.01、弹性模量为 350 MPa、热导率为 0.05 W/(m·K)^[21]；同时，采用石英纤维平纹织物增强氰酸酯层合板作为蒙皮，其纤维体积含量为 60%。功能层和结构层通过环氧/双马来酰亚胺胶膜粘接，并固化成型^[4-5,22]。

本文功能层超表面谐振结构选用典型阻抗层和 FSS 构型^[23]，其具有双极化和小型化特征。如图 1 (b) 所示，阻抗层构型由加载了小型化谐振单元和碳基电阻膜（石墨/无机硅酸盐，0.6 mm×0.3 mm）的金属格栅构成。阻抗层可采用丝网印刷工艺制备金属薄膜，并利用标定技术，在其预留间隙精确印刷碳基薄膜^[14]。该构型在特定频率发生谐振，并表现出趋于无穷大的阻抗虚部，从而实现低插损透波。带通 FSS 采用耶路撒冷缝隙单元，其谐振频率与阻抗层匹配。在 FSS 阻带，阻抗层生成阻抗零点，整个夹芯结构工作机制相当于超材料吸波器，以实现宽频吸波。

上述吸/透波一体化超表面夹芯结构及其吸/透波谐振机制，可适用于多种夹芯结构形式、材料体系及超表面构型。

2 吸/透波一体化夹芯结构设计

为阐明新型吸/透波一体化超表面夹芯结构中超表面与结构层的耦合机理，本文提出了基于精细化等效电路模型的协同优化设计方法。吸/透波一体化夹芯结构中阻抗层和 FSS 用于控制结构电磁谐振机制，而芯层厚度不仅对结构吸波性能影响显著，也是决定其承载性能的关键因素^[18,24]。鉴于地面探测雷达工作频率范围主要集中在 L、S、X、Ku 波段，机载雷达的工作频率范围主要集中在 X、Ku 波段，因此，本文以 10 GHz 作为目标透波频点，以 2~18 GHz 作为目标低反射带，重点聚焦阻抗层、FSS 及芯层厚度的协同设计方法及其规律研究。

整体设计方法流程如图 2 所示。首先，在设计变量空间内采用拉丁超立方采样方法生成初始种群；其次，将该种群代入吸/透波一体化夹芯结构的等效电路模型，计算其 S 参数，并结合优化目标构建最小二乘误差适应度函数。最后，借助遗传算法对芯层厚度与超表面集总电路参数进行迭代优化，并基于路-场转换关系推导获得最优的超表面结构参数配置。

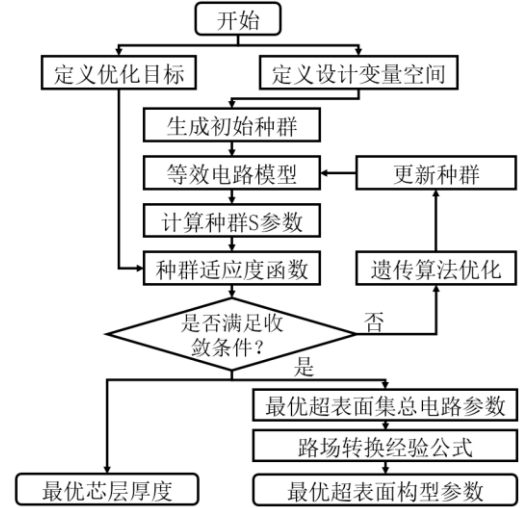


图 2 吸/透波一体化超表面夹芯结构设计方法流程图

Fig.2 Flowchart of the design method for the absorption/transmission sandwich rasorber with metasurfaces

2.1 吸/透波一体化夹芯结构等效电路建模

吸/透波一体化超表面夹芯结构等效电路模型见图 3。其中， h_C 、 h_S 、 h_A 和 h_P 分别表示芯层、蒙皮、胶膜和 PI 膜的厚度。除芯层外，其余结构层厚度为常数（ $h_S = 0.4\text{mm}$ ， $h_P = 0.05\text{mm}$ ， $h_A = 0.15\text{mm}$ ）。此外， Z_C 、 Z_S 、 Z_A 、 Z_P 和 Z_0 分别是芯层、蒙皮、PI 膜和空气的特征阻抗（ $Z_0 = 377\Omega$ ， $Z_S = 216\Omega$ ， $Z_C = 290\Omega$ ， $Z_P = 204\Omega$ ， $Z_A = 221\Omega$ ）。阻抗层可等效为一组由并联 LC 电路和串联 RLC 电路组成的集总电路。其中，小型化谐振器可等效为 $L_{P,R}$ 和 $C_{P,R}$ ，电阻膜、格栅条带和单元间隙可分别等效为串联 $R_{S,R}$ 、 $L_{S,R}$ 和 $C_{S,R}$ 。FSS 可等效为并联 $L_{P,F}$ 和 $C_{P,F}$ 。

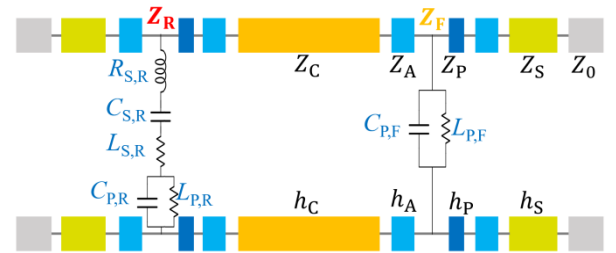


图 3 吸/透波一体化超表面夹芯结构等效电路

Fig.3 Equivalent circuit model of absorption/transmission sandwich rasorber with metasurfaces

根据等效电路分析，吸/透波一体化超表面夹芯结构的 ABCD 矩阵可以表示为式 (1)^[25]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = M_S \times M_A \times M_R \times M_P \times M_A \times M_C \times M_A \times M_F \times M_P \times M_A \times M_S \quad (1)$$

式中: M_A 、 M_C 、 M_S 和 M_P 分别表示胶膜、芯层、蒙皮和 PI 膜的串联传输矩阵, 具有相同的数学形式

$$M_T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & jZ_T \sin(\theta) \\ j\frac{\sin(\theta)}{Z_T} & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\theta = 2\pi h / \lambda$, h 是结构层厚度。 Z_T 表示特征阻抗。同时, M_F 和 M_R 分别是 FSS 和阻抗层的并联导纳矩阵, 具有相同的数学形式

$$M_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_E} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Z_E 表示功能层的等效阻抗。阻抗层和 FSS 阻抗 Z_R 和 Z_F 分别表现为复阻抗和纯电抗, 见式 (4)

$$\begin{cases} Z_R = R_R + jX_R \\ = R_{S,R} + j \left(\frac{\omega L_{P,R}}{1 - \omega^2 L_{P,R} C_{P,R}} - \frac{1 - \omega^2 L_{S,R} C_{S,R}}{\omega C_{S,R}} \right) \\ Z_F = jX_F = j \left(\frac{\omega L_{P,F}}{1 - \omega^2 L_{P,F} C_{P,F}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

透波和反射系数可表示为式 (5) 和式 (6)

$$|S_{21}| = \left| \frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \right| \quad (5)$$

$$|S_{11}| = \left| \frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \right| \quad (6)$$

2.2 电磁超表面与芯层协同优化

基于上述等效电路模型, 本文构造了最小二乘误差, 利用遗传算法, 实现超表面集总电路参数和芯层厚度的协同优化。以吸波带内 $|S_{11}| \leq 0.316$ (-10dB) 和透波带内 $|S_{21}| \geq 0.89$ (-1dB) 为目标, 最小二乘误差如下

$$EF = \sum_{i=1}^N D_{A,i}^2 + \sum_{i=1}^M D_{T,i}^2 = \sum_{i=1}^N [\max(0, |S_{11}| - 0.316)]^2 + \sum_{i=1}^M [\max(0, 0.89 - |S_{21}|)]^2 \quad (7)$$

式中: $D_{A,i}$ 和 $D_{T,i}$ 分别表示反射和透波系数与目标之间的误差; N 和 M 分别表示吸波带和透波带

频点个数。优化模型表示如式 (8)

$$\begin{cases} \text{Find } L_{P,R}, C_{P,R}, R_{S,R}, L_{S,R}, C_{S,R}, L_{P,F}, C_{P,F}, h_C \\ \text{Minimize } EF \end{cases} \quad (8)$$

根据最优集总电路参数, 超表面构型参数初始值可由以下经验公式预测^[23, 26]

$$L_{P,R} = 0.2l_A \left[\ln \frac{l_A}{s} + 1.193 + 0.2235 \frac{s}{l_A} \right] \times 10^{-9} \quad (9)$$

$$C_{P,R} = 0.0285(\varepsilon_{\text{eff}} + 1)(d - 2s) \times 10^{-12} \quad (10)$$

$$L_{S,R} = \mu_0 \frac{l_B}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi l}{2l_B} \right)} \right) \quad (11)$$

$$C_{S,R} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}} \frac{l}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi g_1}{l} \right)} \right) \quad (12)$$

$$L_{P,F} = \mu_0 \frac{w}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi l_C}{2w} \right)} \right) \quad (13)$$

$$C_{P,F} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{eff}} \frac{(s_1 - s_2)}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin \left(\frac{\pi s_2}{s_1 - s_2} \right)} \right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} l_A &= d - 2s + 5l_1, l_B = P - d - 2l - 2l_R, \\ l_C &= \frac{P - s_1}{2}, \varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_A}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: l_R 为电阻膜长度; ε_P 和 ε_A 分别为 PI 膜和胶膜的相对介电常数。

3 结果与讨论

为验证本文设计方法有效性, 开展了新型吸/透波夹芯结构优化设计, 研究了结构的电磁传输特性和电磁谐振机理。首先, 以阻抗层和 FSS 超表面 S 参数和阻抗虚部分析为基础, 系统研究了双极化吸/透波一体化超表面夹芯结构的总体电磁传输特性, 分析了结构在 TE 和 TM 极化模式下 S 参数, 并评估了入射角对结构 S 参数的影响规律。其次, 基于 CST 频域有限元建模分析, 详尽研究了结构超表面电磁谐振机理; 最后, 本文详尽讨论了芯层厚度和介电常数对结构电磁性能的影响规律。

3.1 吸/透波超表面夹芯结构电磁传输特性

超表面集总电路参数和芯层厚度最优值如表 1 所示，相应超表面几何构型参数如表 2 所示。

表 1 超表面等效电路参数和芯层厚度优化结果

Table 1 Optimal values of equivalent circuit parameters and core thickness

参数	数值	参数	数值
$L_{P,R}/\text{nH}$	1.57	$C_{S,R}/\text{pF}$	0.14
$C_{P,R}/\text{pF}$	0.17	$L_{P,F}/\text{nH}$	1.76
$R_{S,R}/\Omega$	226	$C_{P,F}/\text{pF}$	0.15
$L_{S,R}/\text{nH}$	1.72	h/mm	4.8

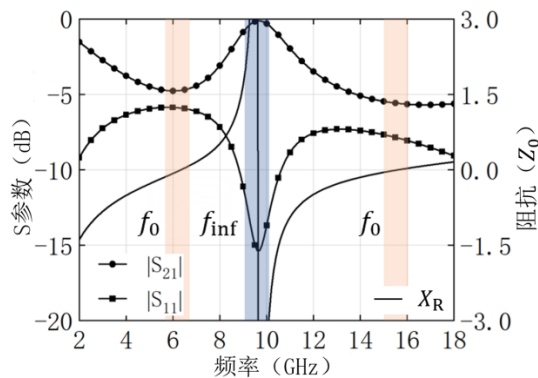
表 2 超表面几何构型参数优化结果

Table 2 Optimal values of metasurface geometric configuration parameters

参数	数值	参数	数值
P/mm	15	l_1/mm	0.8
l/mm	1.2	s_1/mm	6.2
g_1/mm	1.1	s_2/mm	1
s/mm	0.1	w/mm	2.9
d/mm	1.1		

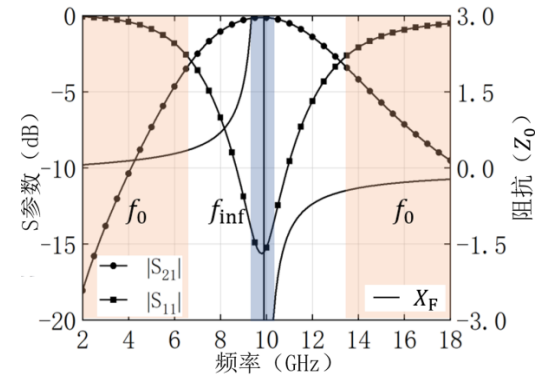
阻抗层和 FSS 的阻抗虚部和 S 参数分别如图 4 (a) 和 (b) 所示。在透波带，阻抗层和 FSS 在 10GHz 附近各生成一个阻抗极点 (f_{inf})，证明低插损透波窗口的必要条件是双层超表面的阻抗极点匹配。在吸波带，阻抗层生成两个阻抗零点 (f_0)，阻抗层呈现纯阻性，协同 FSS 的低阻抗金属板效应，实现阻抗匹配和强吸波。

吸/透波超表面夹芯结构 S 参数的等效电路模型和仿真计算结果对比如图 5 所示。仿真结果表明，结构在 9.7 GHz 生成了 0.15 dB 的低插损透波中心，在 3.8~16.6 GHz 实现了 $|S_{11}| \leq -10\text{dB}$ 的宽频低反射带。此外，等效电路和仿真计算结果具有较好一致性，但由于现有集总参数经验公式和电路形式的精度有限，在高频处仍有一定误差。



(a) S-parameter of the impedance layer and the

imaginary part of the impedance



(b) S-parameter of the FSS layer and the imaginary part of the impedance

图 4 超表面阻抗虚部与 S 参数

Fig.4 S-Parameters and impedance of metasurfaces

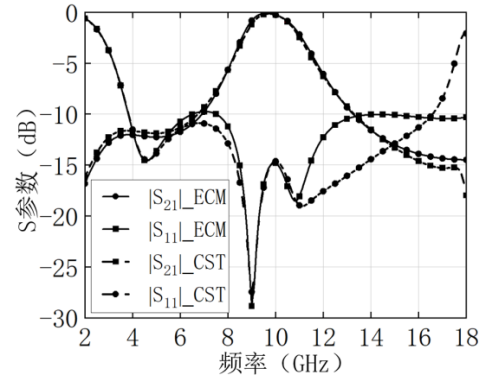


图 5 吸/透波一体化超表面夹芯结构 S 参数的等效电路与仿真结果对比

Fig.5 Comparison between the simulated and calculated S-parameters of the absorption/transmission sandwich rasorber with metasurfaces

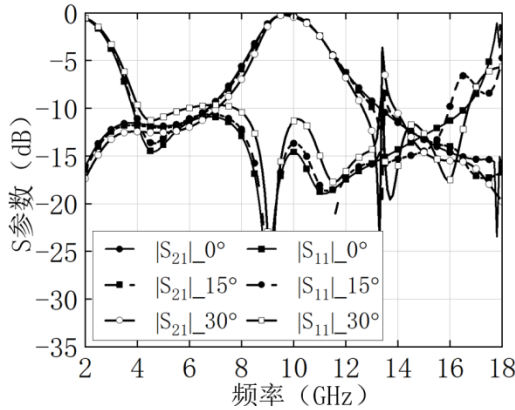
表 3 吸/透波一体化超表面夹芯结构性能对比

Table 3 Performance comparison of absorption/transmission sandwich rasorbers with metasurfaces

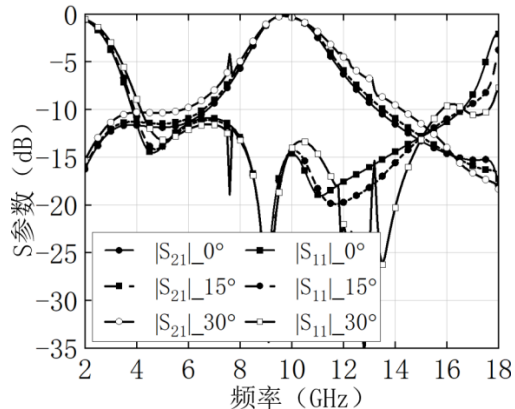
可承载吸/透波一体化超表面夹芯结构			
文献	芯材/介电常数	相对吸波带宽	插损
[13]	PMI泡沫/1.13	104%	1.2dB
[18]	GF-PTFE/2.5	98%	1.3dB
本文	PMI泡沫/1.3	125%	0.3dB
非承载吸/透波一体化超表面结构			
文献	芯材/介电常数	相对吸波带宽	插损

[11]	空气/1	124%	0.1dB
[27]	空气/1	120%	0.6dB
[28]	空气/1	116%	0.1dB

为进一步展示本文新型吸/透波一体化超表面夹芯结构电磁传输特性优势,表3详尽对比了典型吸/透波一体化结构电磁性能仿真值。如表可知,对于可承载吸/透波一体化夹芯结构,芯体介电常数直接影响结构吸波带宽,总体上,介电常数与吸波带宽呈显著负相关;同时,本文高介电刚性 PMI 泡沫夹芯结构实现了相对带宽为 125% 的宽频吸波与 0.3dB 低插损透波特性。此外,与其他采用相似超表面但不具备承载能力的吸/透波一体化结构相比,本文结构在宽频吸波性能方面依然表现出显著优势。可见,本文所构建的协同优化设计方法,能实现优异的吸/透波电磁性能,进一步验证了本文方法的有效性。



(a) TE polarization mode



(b) TM polarization mode

图6 吸/透波一体化超表面夹芯结构斜入射 S 参数

Fig.6 S-parameters of absorption/transmission sandwich raserber with metasurfaces under oblique incidence

为进一步展示吸/透波结构角度和极化稳定性,图6详尽研究了该结构对不同极化电磁波的角域响应特性。图6(a)和(b)分别给出 TE 和 TM 双极化模式下结构 S 参数的频率响应。当入射角小于 30° 时,两种极化模式下的透波中心频率偏移量小于 1%,吸波相对带宽缩减率小于 0.8%,表明所设计的吸/透波结构可满足复杂电磁环境下多角度入射、多极化混叠场景的应用需求。

3.2 吸/透波超表面夹芯结构电磁谐振机理分析

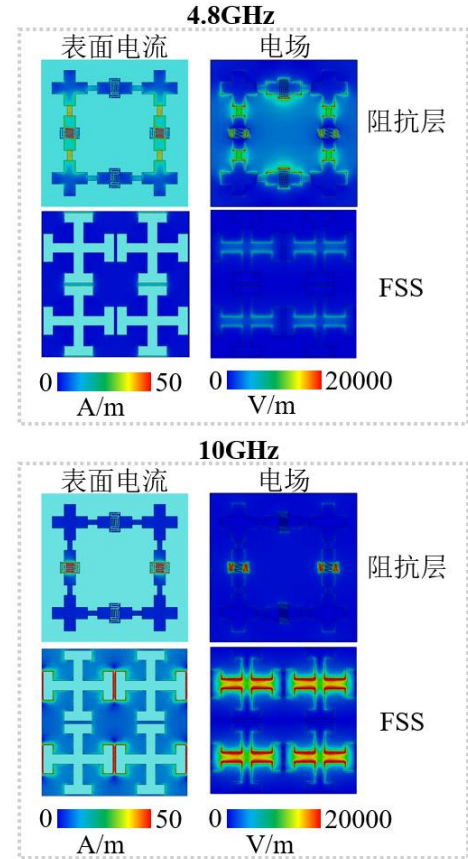


图7 超表面电场和面电流分布

Fig.7 Electric field and surface current distribution of metasurfaces

通过频域有限元分析,得到了夹芯结构超表面的感应表面电流和电场分布图,如图7所示。在吸波带,例如 4.8 GHz 频率下,阻抗层电阻膜附近激发出强电场和电流,表明阻抗层的电抗极低,主要表现为电阻性,从而提供了电磁损耗机制。同时 FSS 中的电场和电流分布均匀,未出现谐振现象,说明 FSS 的阻抗较小,呈现出类似金属的反射效应。这种效应与阻抗层和芯层共同作用,形成了有效的相位匹配机制。综合电磁损耗机制与相位匹配机制,该结构实现了显著的吸波效果。在透波带,例如 10 GHz 频率下,阻抗层谐振器附近激发出强电场和电流,表明谐振器发

生谐振,阻抗趋近于无穷大,提供阻抗匹配机制,同时,阻抗层类似于断路电路,避免电流流经电阻膜产生电磁损耗。FSS 中同样激发出谐振电场和电流,保证阻抗匹配。综合低损耗和阻抗匹配机制,该结构生成了低插损透波窗口。

3.3 芯层厚度和介电常数对结构电磁性能的影响

图 8 展示了吸/透波超表面夹芯结构芯层厚度对其电磁性能的影响规律。随着厚度增加,吸波带向低频偏移,表明该结构吸波性能不仅依赖于阻抗层产生的阻抗零点,还受到芯层厚度变化引起的相位匹配机制的协同作用。此外,厚度变化对透波频率及其插入损耗的影响很小,表明结构透波性能主要取决于超表面的谐振频率匹配。

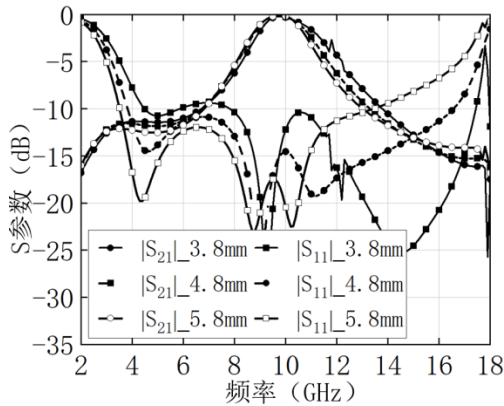


图 8 不同芯层厚度的 S 参数对比

Fig.8 Comparison of S parameters with different core thicknesses

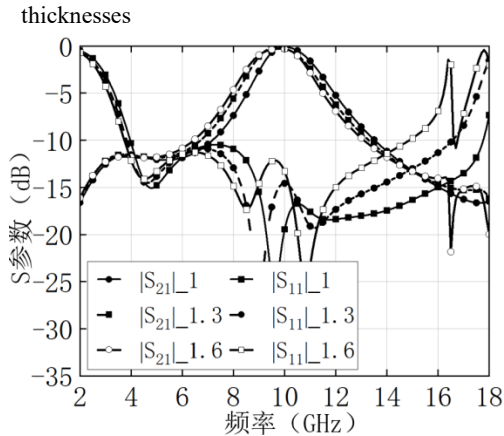


图 9 不同芯层相对介电常数的 S 参数对比

Fig.9 Comparison of S parameters with different relative dielectric constants of core

吸/透波超表面夹芯结构芯层介电常数对其电磁性能的影响规律如图 9 所示。随着相对介电常数的增加,吸波带向低频偏移且明显缩减。此外,由于相对介电常数的变化引起超表面本征阻抗和谐振频率的变化,进而导致透波窗口偏移。

以上分析揭示了芯体厚度与介电常数对吸/

透波一体化超表面夹芯结构电磁响应的决定性作用,证实了建立超表面-芯体多参数协同优化设计体系的必要性。

4 结 论

本文构建了新型吸/透波一体化超表面夹芯结构协同优化设计方法,主要工作与结论如下:

(1) 将等效电路建模和全波分析相结合,构建了新型吸/透波一体化超表面夹芯结构的协同优化设计方法,提高了设计精度与效率。

(2) 案例分析表明,吸/透波一体化超表面夹芯结构具有优异的吸/透波电磁传输特性,可实现 $S_{11} \sim 10$ dB 宽频 3.8~16.6 GHz 低反射特性,并在 10 GHz 频点具有 0.26 dB 超低插损透波能力。

(3) 详尽研究了电磁波入射角、芯体厚度及其介电特性等结构电磁传输特性和电磁谐振机理的影响规律。经分析超表面电场与电流分布特征,揭示了超表面的吸/透波电磁谐振机理。

本文工作可为未来多功能一体化高性能机载天线罩协同优化设计提供新方法和重要参考。

参考文献:

- [1] RAFIEIPOUR H, SETOODEH A, KIN-TAK LAU A. Mechanical and electromagnetic behavior of fabricated hybrid composite sandwich radome with a new optimized frequency-selective surface[J]. *Composite Structures*, 2021, 273: 114256.
- [2] ZHANG Z, LEI H S, YANG H Y, et al. Radar-stealth and load-bearing corrugated sandwich structures with superior environmental adaptability[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 227: 109594.
- [3] CHENG L H, SI Y, JI Z J, et al. A novel linear gradient carbon fiber array integrated square honeycomb structure with electromagnetic wave absorption and enhanced mechanical performances[J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116510.
- [4] HUANG Y X, WU D, ZHANG K, et al. Topological designs of mechanical-electromagnetic integrated laminate metastructure for broadband microwave absorption based on bi-directional evolutionary optimization[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 213: 108898.
- [5] LIN Y Y, YANG X Z, HUANG Y X, et al. Impact-resistant multilayered metastructure for broadband microwave absorption designed by evolutionary optimization[J]. *Composite Structures*, 2021, 272: 114235.
- [6] YANG X Z, LIN Y Y, HUANG Y X, et al. Mechanical reinforced lightweight multifunctional metastructure with ultrabroadband microwave absorption[J]. *IEEE Antennas and*

- Wireless Propagation Letters, 2021, 20(6): 1023-1027.
- [7] 巫瑞, 杨雪松, 杨芷一. 一种具有良好角度稳定性的频率选择吸波器[C]//2024年全国微波毫米波会议. 北京: 电子科技大学物理学院; 电子科技大学长三角研究院(湖州), 2024: 743 - 745.
- WU Rui, YANG Xuesong, YANG Zhiyi. A frequency selective rasorber with high angular stability[C]//Proceedings of the 2024 National Microwave and Millimeter Wave Conference (Volume 2) on Chinese Institute of Electronics. Beijing: School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China; Yangtze River Delta Research Institute, University of Electronic Science and Technology of China (Huzhou), 2024: 743-745.
- [8] ZHU S C, WANG Y L, WANG Z X, et al. On the equivalent-circuit-based design of double-lossy-layer wide transmissive rasorbers with ultrawide reflection suppression band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(6): 4999-5010.
- [9] FU Y, DING F, JIN J, et al. Conformal frequency selective rasorber in S, C, X-band with low backward-scattering[J]. Optics Express, 2024, 32(10): 16879-16890.
- [10] LI Y, ZHONG Y X, WANG M R, et al. A miniaturized and highly stable frequency-selective rasorber incorporating an embedded transmission window[J]. Micromachines, 2024, 15(8): 980.
- [11] WU K, XU W Y, YANG Y W, et al. A dual-polarized C-X-ku-band frequency-selective rasorber with wide high-transmission passband[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2024, 66(4): 1295-1299.
- [12] LI E J, WEI Z, WANG Q, et al. A conformal frequency selective rasorber with intelligent band-transfer abilities via jointly learning network[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023, 65(3): 738-748.
- [13] LEE I G, OH W S, KIM Y J, et al. Design and fabrication of absorptive/transmissive radome based on lumped elements composed of hybrid composite materials[J]. IEEE Access, 2020, 8: 129576-129585.
- [14] YANG J H, ZHENG H B, PANG Y Q, et al. Design, modelling, and manufacturing of sandwich radome structure with out-of-band absorption and in-band transmission performances[J]. Composite Structures, 2024, 339: 118138.
- [15] MAO Z W, XU K, QIAN X M, et al. A global-local design method for wideband absorption/transmission sandwich rasorber with frequency-selective surfaces[J]. Composite Structures, 2023, 322: 117401.
- [16] 张蓉. 波纹梁夹芯超表面吸/透波结构电磁—力学特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- ZHANG Rong. Electromagnetic-mechanical characterization of corrugated beam sandwich metasurface structures[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [17] 毛依婷. 新型点阵夹芯超表面吸/透波结构设计与等效电磁性能研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- MAO Yiting. Design and equivalent electromagnetic performance study of novel lattice sandwich metasurface absorbing/transmitting structure[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [18] MUSTAFA Ö, ORAK S, ERKEN F. Design of broadband absorptive optimum frequency selective rasorber without loaded circuit elements[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2020, 127: 153407.
- [19] 姚智馨. 超宽带宽入射角的电路模拟吸波材料机理与设计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- YAO Zhixin. Research on Mechanism and Design of Ultra-wideband Wide-angle Circuit Analog Absorbers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [20] WANG Z F, FU J H, ZENG Q S, et al. Wideband transmissive frequency-selective absorber[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1443-1447.
- [21] 詹茂盛, 王凯. 聚酰亚胺泡沫材料[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2018: 124-293.
- ZHAN Maosheng, WANG Kai. Polyimide foam materials[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 124-293.
- [22] WANG C X, CHEN M J, LEI H S, et al. Frequency-selective-surface based sandwich structure for both effective loadbearing and customizable microwave absorption[J]. Composite Structures, 2020, 235: 111792.
- [23] HONG J S. Microstrip Filters for RF/Microwave Applications[M]. [S.l.]: Wiley, 2011.
- [24] GUO M, SANG D, YUAN F, et al. Broadband absorptive frequency-selective rasorber based on multilayer resistive sheets using multilayer resonator[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(3): 2009-2022.
- [25] COLLIER R. Transmission Lines[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [26] LUUKKONEN O, SIMOVSKI C, GRANET G, et al. Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(6): 1624-1632.
- [27] SUN Z S, CHEN Q, GUO M, et al. Frequency selective rasorber and reflector with two-sided absorption bands[J]. IEEE Access, 2018, 7: 6025-6031.
- [28] YU Q M, LIU S B, MONORCHIO A, et al. Miniaturized wide-angle rasorber with a wide interabsorption high transparent

bandpass based on multiple 2.5-D resonators[J]. IEEE Antennas
and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(2): 416-420.