



一种基于多机制协同设计的低频超宽带吸波体

孔祥林¹, 刘佳琪^{2*}, 赵雷^{1*}, 宋杭², 张生俊²

1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 徐州 221116

2. 试验物理与计算数学国家重点实验室, 北京 100072

* 通信作者. E-mail: lj006@vip.sina.com, leizhao@cumt.edu.cn

收稿日期: 2024-06-09; 修回日期: 2024-08-15; 接受日期: 2024-08-27; 网络出版日期: 2024-12-10

中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2023XSCX026)、江苏省研究生科研创新计划项目 (批准号: KYCX23-2707) 和中国矿业大学研究生创新计划项目 (批准号: 2023WLKXJ094) 资助

摘要 针对隐身目标低频超宽带电磁吸收的需求, 提出了一种基于多机制协同的设计方法, 通过结合磁性材料和阻性表面的损耗特性, 并联合等效电路模型和遗传算法实现快速阻抗匹配和参数优化, 实现 P-Ku 波段低频宽带吸波体设计. 本文理论分析了磁性材料降低吸波体厚度和提升低频吸波性能的机制, 通过磁性材料和阻性表面协同设计, 实现 P-L 频段内优异吸波效果. 进而, 通过多层阻性表面级联结构补偿 S-Ku 波段内的吸波性能, 实现 P-Ku 超宽带高性能吸波体设计. 设计的低频超宽带吸波体在 0.3~0.33 GHz 和 0.33~18 GHz 内分别实现至少 -8 dB 和 -10 dB 的反射损耗, 厚度仅为 $0.027\lambda_L$ (λ_L 为最低频率处的波长). 同时, 该吸波体具有大角度稳定性, 在 TE 极化波和 TM 极化波斜入射下依然保持良好的吸波性能. 最后, 进行了加工和实验测试, 结果表明该吸波体具有低频超宽带吸波性能以及宽角度稳定特性.

关键词 多机制协同设计, 磁性材料, 阻性表面, 低频超宽带, 超材料吸波体

1 引言

微波吸波体具有高效吸收和衰减入射电磁波的能力, 因此被广泛应用于隐形技术和电磁兼容等领域^[1~4]. 在吸波体设计中, 吸波带宽、反射损耗和厚度是三个主要的考虑因素. 然而, 设计具有低频、宽带和高吸波特性的吸波体是一个巨大挑战. 为了寻求解决方案, 研究学者从多个角度进行了大量探索, 并取得了显著进展. 传统吸收材料存在吸波带宽不足和厚度大等性能局限性, 推动了对新型微波吸收结构的研究^[5~13]. 其中, 经典的微波吸收结构, 如 Jaumann 吸收器^[12], 按照 1/4 波长间隔将电阻片堆叠来扩展吸收带宽. 尽管这种结构可以实现宽带吸收特性, 若使用此方法实现低频吸收特性, 吸波体的厚度会增加, 限制了其实际应用.

引用格式: 孔祥林, 刘佳琪, 赵雷, 等. 一种基于多机制协同设计的低频超宽带吸波体. 中国科学: 信息科学, 2024, doi: 10.1360/SSI-2024-0175

Kong X L, Liu J Q, Zhao L, et al. A low-frequency ultra-wideband absorber based on multi-mechanism collaborative design (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, doi: 10.1360/SSI-2024-0175

自超材料吸波体被首次提出^[14], 它就被认为是突破 1/4 波长厚度 - 带宽限制的潜在解决方案, 引起了研究人员的广泛关注. 迄今为止, 大量超宽带超材料吸收体被报道, 但主要致力于实现 1 GHz 以上的吸波特性和^[15~35]. 例如, 文献 [28] 基于电阻器 - 金属结构设计的宽带吸波体, 在 2.68~12.19 GHz 范围内实现良好的吸收特性. 文献 [32] 提出了一种多层结构吸波体, 可以实现 1~18 GHz 吸收带宽. 随着人类对超低频 (如 P 波段) 频谱资源的进一步利用, 上述带宽显然已经不能满足隐身需求. 为了实现这一目标, 研究人员提出了一些用于设计超低频吸波体的方法^[36~39]. 例如, 文献 [36] 利用金属弯折线结构设计了吸波体, 可以用于 0.8~2.7 GHz 频率范围的电磁吸收. 为了进一步提高低频吸收能力, 文献 [38] 提出了一种基于紧耦合阵列的吸波体, 取得了 0.23~1.18 GHz 的工作带宽. 这些吸波体可以有效吸收低频段电磁波, 但结构复杂, 厚度较大.

研究表明, 磁性材料的磁导率相对较高, 在低频段更容易实现吸收共振, 因此可以用于拓展吸波带宽和减少吸波材料的厚度^[40~42]. 然而, 磁性材料的低频共振吸收带依赖于厚度, 仅使用磁性材料设计吸波体往往难以平衡低频段和高频段的吸收效果. 将磁性材料与其他方法相结合, 如嵌入频率选择表面^[43~45]、介质材料^[46,47]和超材料^[48~50], 为克服这一局限性提供了可能. 例如, 文献 [49] 提出了一种混合吸波体, 以实现 0.78~4.8 GHz 频率范围内的宽带吸收. 然而, 关于 P-Ku 波段的低频超宽带吸波体鲜有报道, 因为吸收超长波长的电磁能量的同时, 还需要考虑超宽频率范围内的阻抗匹配特性, 这使得其成为一个巨大的挑战.

本文针对低频超宽带的隐身需求, 通过结合磁性材料和阻性表面损耗特性, 利用等效电路模型结合遗传算法辅助吸波体阻抗匹配和参数优化, 设计了一种基于多机制协同的吸波体. 在设计中, 磁性材料的磁损耗提供低频处谐振吸收, 将阻性表面嵌入磁性材料, 谐振吸收拓展为 0.3~2 GHz 吸收频带. 然后, 采用多层阻性表面级联结构补偿 2~18 GHz 范围内的吸收性能, 实现 0.3~18 GHz 的超宽带吸波体设计. 此外, 从阻抗匹配理论和功率损耗密度等角度分析了吸波体的协同工作机理. 最后, 加工了样品并进行了测试, 测试结果与仿真结果吻合较好, 结果表明设计的吸波体具有超低频、超宽带、宽角域和极化不敏感等特性.

2 理论分析与设计原理

2.1 磁性材料应用理论分析

根据 Rozanov 极限理论^[42], 吸波材料的最小厚度 - 带宽比可以表示为

$$\left| \int_0^{\infty} \ln |\rho(\lambda)| d\lambda \right| \leq 2\pi^2 \sum_i \mu_{s,i} d_{s,i}, \quad (1)$$

其中, $\mu_{s,i}$, $d_{s,i}$ 是多层吸波体第 i 层的磁导率和厚度, $\rho(\lambda)$ 是线性形式的反射参数. 磁导率与厚度之间呈现反比例关系, 说明加入磁性材料可以减少吸波体的整体厚度. 此外, 磁性材料的磁导率较大, 更容易吸收低频处的电磁能量^[40]. 根据公式 (1), 如果要在 0.3~18 GHz 范围内提供 -10 dB 的反射损耗, 对于非磁性吸波体, 其最小厚度约为 57.17 mm. 如果利用磁性材料来设计吸波体, 理论上其厚度可以进一步降低.

为了确定磁性材料在吸波体中的分布位置, 分析了金属板上方的电磁能量密度分布. 当平面波从无耗媒质垂直入射到理想导体边界时^[51], 电场和磁场随离边界的距离呈正弦变化, 并遵循以下规律: 电场的零值出现在 $z = (n \times \lambda)/2$, $n = 0, 1, 2, \dots$, 却是磁场的最大值; 磁场的零值出现在 $z = ((2n + 1) \times \lambda)/2$, $n = 0, 1, 2, \dots$, 却是电场的最大值. 根据 Poynting 定理, 电场能量密度 W_e 和磁场能

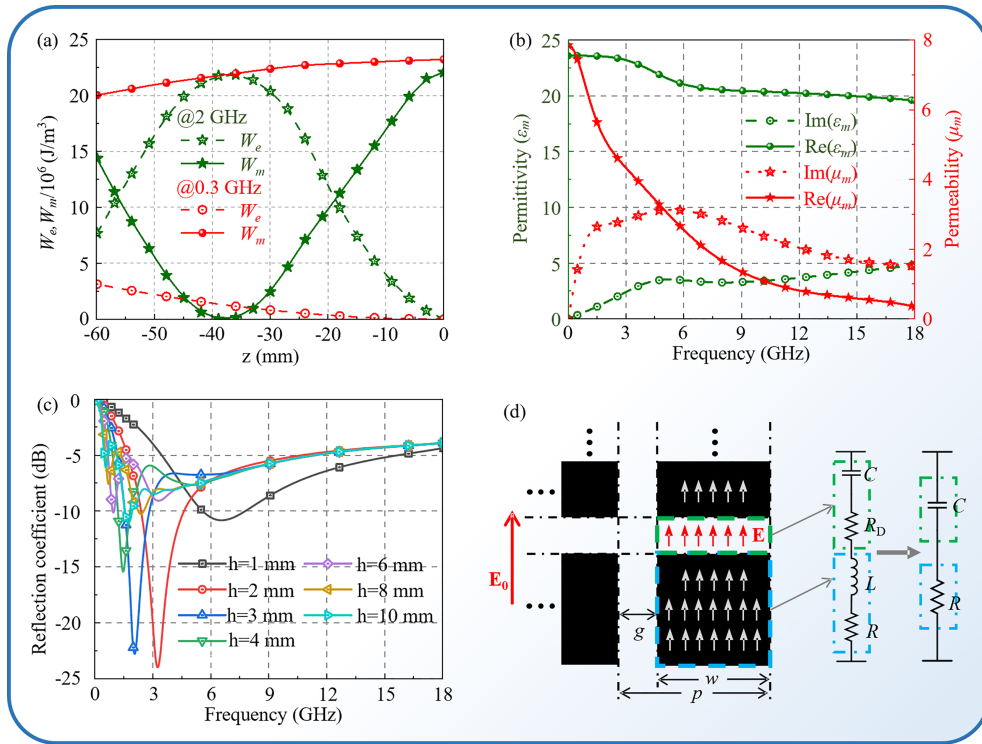


图 1 (网络版彩图) (a) 0.3 GHz 和 2 GHz 处, 距离导体边界 60 mm 的电能量密度分布和磁能量密度分布; (b) 所选磁性材料的介电常数和磁导率; (c) 所选磁性材料的厚度与反射特性关系; (d) 垂直入射下, 阻性表面内电流和电场定性表征及其等效电路模型

Figure 1 (Color online) (a) The magnetic and electric energy density distribution within 60 mm above the metal plane at 0.3 GHz and 2 GHz; (b) the permittivity and permeability of the selected magnetic material; (c) the behavior of the thickness-reflection of the selected magnetic material; (d) qualitative representation of the currents and electric field within the resistive surface under normal incidence and its equivalent circuit model

量密度 W_m 同样遵循上述定律. 对金属板上方 60 mm 内的 W_e 和 W_m 进行了仿真, 确定磁性材料在吸波体中的分布, 0.3 GHz 和 2 GHz 处的仿真结果如图 1(a) 所示. 其中, $z > 0$ 代表电磁波入射方向, $z < 0$ 表示与理想导体的距离. 在图 1(a) 中, 在距离导体表面 60 mm 范围内, 0.3 GHz 处的磁能量密度大于电能量密度; 在距离导体表面 10 mm 范围内, 2 GHz 处的磁能量密度大于电能量密度. 因此, 在靠近金属导体的位置放置磁性材料为设计低频宽带吸波体提供了理论可能性.

2.2 低频磁性吸波体设计与分析

在低频磁性吸波体 (magnetic absorber, MA) 设计中, 采用在两层磁性材料中嵌入方形阻性表面的方法实现 0.3~2 GHz 范围内的良好吸收特性, 磁性材料 (magnetic material, MM) 的介电常数和磁导率如图 1(b) 所示. 明显地, 在低频段, 特别是 0.3~2 GHz 内, 磁导率的实部远大于 1. 根据 Rozanov 极限理论, 采用该磁性材料设计吸波体在 0.3~2 GHz 范围内提供 -10 dB 反射损耗, 吸波体的整体厚度将会明显降低. 此外, 磁性材料的磁导率虚部不等于 0, 可以提供磁损耗用于磁能量衰减. 为了探索磁性材料厚度与反射关系, 对不同厚度的磁性材料进行了仿真, 如图 1(c) 所示. 结果表明, 磁性材料的吸收谐振频率与厚度相关, 厚度增加引起谐振频率降低. 当厚度增加至 10 mm, 出现两个谐振频率位于 0.48 GHz 和 1.56 GHz, 为实现 0.3~2 GHz 的低频宽带吸收特性提供了可能.

等效电路模型结合遗传算法是设计、优化吸波体的一种高效方法. 首先, 基于传输线理论, 建立吸波体的等效电路模型, 即电阻、电容与吸波体设计参数之间的闭合关系. 然后, 结合遗传优化算法, 可以得到满足目标反射参数的集总元件的最优值. 最后, 通过闭合表达式计算得到吸波体的物理结构参数. 为了便于结合等效电路模型和遗传算法, 分析了方形阻性表面 (resistive surface, RS) 结构参数和等效电路元件的关系. 如图 1(d) 呈现了方形阻性表面的电流和电场特性及等效电路模型, 对于平面波垂直入射下的方形阻性表面阵列, 可以等效为 RL 串联电路, 电阻 R 源于阻性表面的欧姆损耗, 电感值很小, 可以忽略不计^[18]. 相邻贴片边缘之间的间隙处的电场相对强, 可以视为电容 C 和源于介质损耗的电阻 R_D . 其中, 介质的介电损耗远小于阻性表面的欧姆损耗, 即 $R_D \ll R$, 可以忽略不计. 因此, 方形阻性表面阵列可以等效为 RC 串联电路. 电阻 R 与阻性表面的方阻 R_s 、宽度 w 和单元周期 p 相关, 可以表示为^[18]

$$R = R_s \frac{S}{A} = R_s \frac{p^2}{w^2}, \quad (2)$$

其中, S 和 A 分别是周期单元的表面积和阻性表面的表面积. 嵌入在介质中的阻性表面的等效电容 (C) 可以表示为^[22]

$$C = \varepsilon_{\text{eff}} C_0 = \varepsilon_{\text{eff}} \frac{2\varepsilon_0 p}{\pi} \ln \left(\csc \frac{\pi g}{2p} \right), \quad (3)$$

其中, $g = p - w$ 是阻性表面单元间隙, $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m 是真空介电常数. C_0 是阻性表面阵列在自由空间中的等效电容. 等效介电常数 ε_{eff} 取决于阻性表面周围的介质环境, 如果阻性表面印刷在介质 - 空气交界面上, 等效介电常数等于两者的平均值, 即 $\varepsilon_{\text{eff}} = (\varepsilon_r + 1)/2$; 当阻性表面嵌入在相同介质中, 等效介电常数等于介质的介电常数, 即 $\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_r$, ε_r 为介质的介电常数.

通过联合等效电路模型和遗传算法, 可以简化阻抗匹配和参数优化^[52]. 图 2(a) 和 (b) 呈现了低频磁性吸波体的物理模型和等效电路模型. 根据传输线理论, 介质层可等同于相同厚度的传输线, 而金属板可视为终端短路. 磁性材料的特征阻抗 Z_m 和电长度 δ_m 的表达式为

$$Z_m = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}}, \quad (4)$$

$$\delta_{m,i} = 2\pi f h_i \sqrt{\varepsilon_m \mu_m} / c \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

其中, 377Ω 是自由空间的波阻抗, ε_m 和 μ_m 是磁性材料的介电常数和磁导率, $c = 3 \times 10^8$ m/s 是电磁波在自由空间的波速, h_i 和 $\delta_{m,i}$ 是第 i ($i=1,2$) 层磁性材料的厚度和电长度. 相应地, 磁性吸波体的传输矩阵可以表示为

$$\begin{pmatrix} A^{MA} & B^{MA} \\ C^{MA} & D^{MA} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{m,2} & jZ_m \sin \delta_{m,2} \\ j\frac{\sin \delta_{m,2}}{Z_m} & \cos \delta_{m,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_1}{1+j\omega C_1 R_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_{m,1} & jZ_m \sin \delta_{m,1} \\ j\frac{\sin \delta_{m,1}}{Z_m} & \cos \delta_{m,1} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中, R_1 和 C_1 是等效电阻和电容, 可以通过公式 (2) 和 (3) 计算得到, $\omega = 2\pi f$.

那么, 磁性吸波体的输入阻抗的表达式为

$$Z_{in}^{MA} = \frac{A^{MA} Z_L + B^{MA}}{C^{MA} Z_L + D^{MA}}. \quad (7)$$

由于电路终端视为短路, 所以 $Z_L = 0$. 进而, 反射参数 S_{11} 可以表示为

$$S_{11} = \frac{Z_{in}^{MA} - Z_0}{Z_{in}^{MA} + Z_0}. \quad (8)$$

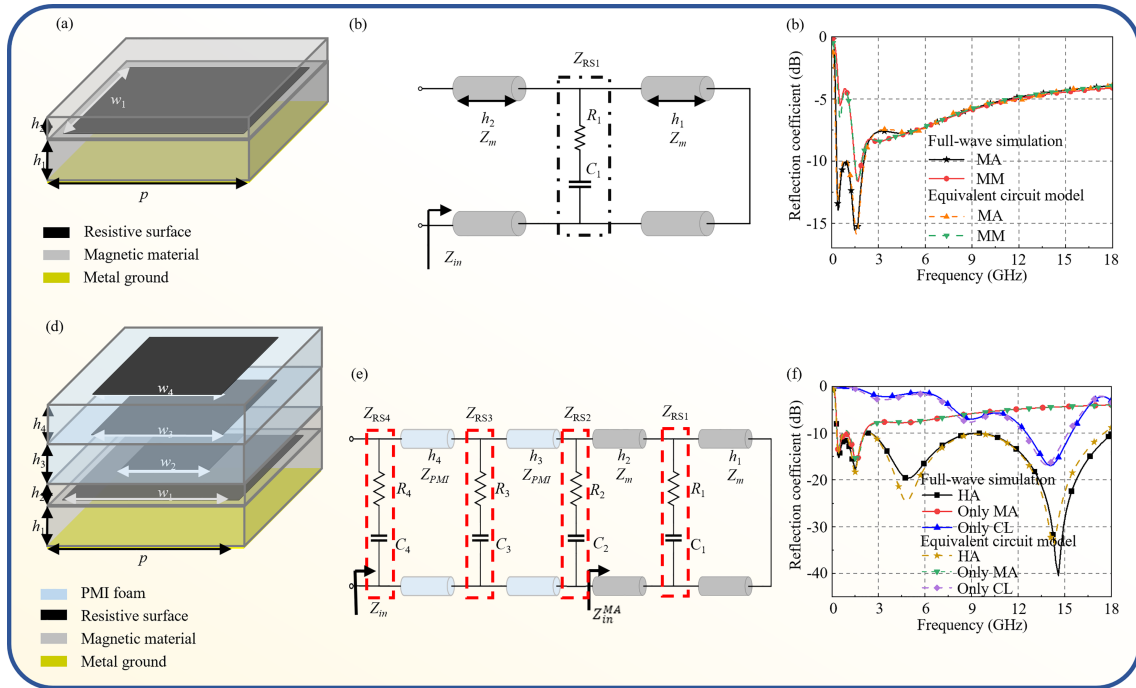


图 2 (网络版彩图) 磁性吸波体的 (a) 物理模型及其 (b) 等效电路模型; (c) 磁性材料和磁性吸波体的反射系数比较; 混合吸波体的 (d) 物理模型及其 (e) 等效电路模型; (f) 混合吸波体、磁性吸波体和补偿层的反射系数比较

Figure 2 (Color online) (a) The physical structure and (b) equivalent circuit model of the designed magnetic absorber; (c) comparison for reflection coefficients of magnetic material and magnetic absorber; (d) the proposed hybrid absorber structure and (e) its equivalent circuit model; (f) comparison for reflection coefficients of hybrid absorber, only magnetic absorber and only compensate layer

通过等效电路模型和遗传算法优化, 得到等效电路中集总元件参数: $C_1=2.96$ pF, $R_1 = 172.84 \Omega$. 根据公式 (2) 和 (3) 计算得到混合吸波体的物理结构参数: $h_1 = 7$ mm, $h_2= 3.7$ mm, $R_{s1} = 140 \Omega/\text{sq}$, $w_1= 10.8$ mm 和 $p =12$ mm. 基于这些结构参数在全波仿真软件中建立物理模型并求解, 获得其在垂直入射下的反射系数曲线. 从图 2(c) 可以看出, 磁性材料仅能在 0.48 GHz 和 1.49 GHz 处提供两个谐振吸收峰, 并没有良好的宽带吸波特性的. 当阻性表面嵌入到磁性材料, 磁性吸波体等效电路模型和全波仿真的反射系数吻合较好, 在 0.3~0.33 GHz 范围内低于 -8 dB, 在 0.33~2 GHz 范围内低于 -10 dB, 表明加载阻性表面可以扩展吸波带宽并提高吸收深度. 设计的磁性吸波体的厚度为 10.7 mm, 仅为最低频率的最大波长的 0.01 倍. 此外, 2~18 GHz 范围内的反射系数均位于 -10 dB 以上, 几乎不受阻性表面的影响. 结果表明, 利用磁性材料和阻性表面可以实现低频宽带吸波特性的, 并减少吸波体厚度.

2.3 混合吸波体设计与分析

将磁性吸波体与超材料补偿层 (compensate layer, CL) 级联设计的吸波体称为混合吸波体 (hybrid absorber, HA). 图 2(d) 和 (e) 呈现了设计的混合吸波体的物理模型和等效电路模型. PMI 泡沫的特征阻抗 Z_{PMI} 和电长度 δ_i 的表达式为

$$Z_{PMI} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}, \tag{9}$$

$$\delta_i = 2\pi f h_i \sqrt{\epsilon_r \mu_r} / c, \tag{10}$$

其中, $\varepsilon_r=1.05$ 和 $\mu_r=1$ 分别是 PMI 泡沫的介电常数和磁导率, h_i 和 δ_i 是 PMI 泡沫的第 i 层的厚度和电长度.

混合吸波体的传输矩阵可以通过级联磁性吸波体和补偿层的传输矩阵求得, 表示为

$$\begin{pmatrix} A^{CL} & B^{CL} \\ C^{CL} & D^{CL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_4}{1+j\omega C_4 R_4} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_4 & jZ_{PMI} \sin \delta_4 \\ j\frac{\sin \delta_4}{Z_{PMI}} & \cos \delta_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_3}{1+j\omega C_3 R_3} & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \cos \delta_3 & jZ_{PMI} \sin \delta_3 \\ j\frac{\sin \delta_3}{Z_{PMI}} & \cos \delta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{j\omega C_2}{1+j\omega C_2 R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A^{MA} & B^{MA} \\ C^{MA} & D^{MA} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中, R_2, R_3, R_4 和 C_2, C_3, C_4 是等效电阻和等效电容, 可以通过公式 (2) 和 (3) 求得.

混合吸波体的输入阻抗可以表示为

$$Z_{in}^{HA} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D}, \quad (12)$$

其中, 由于电路终端短路, $Z_L = 0$. 反射系数 S_{11} 可以表示为

$$S_{11} = \frac{Z_{in}^{HA} - Z_0}{Z_{in}^{HA} + Z_0}. \quad (13)$$

那么, 吸收率的表达式为

$$\text{Absorptivity} = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \times 100, \quad (14)$$

其中, $|S_{21}|$ 等于 0, 因为底层金属板阻止电磁波的传播.

通过等效电路模型和遗传算法优化, 得到等效电路中集总元件参数: $C_2=0$ pF, $C_3=0.035$ pF, $C_4=0.042$ pF, $R_2 = 0 \Omega$, $R_3 = 440.82 \Omega$, $R_4 = 648.2 \Omega$. 根据公式 (2) 和 (3) 计算得到混合吸波体的物理结构参数: $h_3=7$ mm, $h_4=6.5$ mm, $w_2=0$, $w_3=7$ mm, $w_4=7.6$ mm, $R_{s3} = 150 \Omega/\text{sq}$, $R_{s4} = 260 \Omega/\text{sq}$, 和 $p=12$ mm. 然后, 基于上述结构参数在全波仿真软件中建立模型, 求解其在平面波垂直入射下的反射系数, 并与等效电路模型求解的反射系数比较, 如图 2(f) 所示. 结果表明, 两者反射系数吻合较好, 混合吸波体可以在 0.33~2 GHz 范围内实现 -10 dB 的反射损耗, 在 0.3~0.33 GHz 范围内实现 -8 dB 的反射损耗, 而补偿层可以在 2~18 GHz 范围内提升磁性吸波体的反射损耗至 -10 dB 的水平. 根据公式 (1), 想要实现上述反射特性, 如果不采用磁性材料设计吸波体, 其厚度至少需要 73.82 mm. 然而, 设计的混合吸波体的厚度 $h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 24.2$ mm, 约为无磁吸波体的 0.33 倍, 仅为最低频率的最大波长的 0.027 倍. 因此, 将磁性材料和超材料的优势相结合来设计 P-Ku 波段的吸波体是一条有效的途径.

斜入射角度下的吸收特性是衡量吸波体吸收特性的重要指标之一. 对于垂直入射下, 设计的吸波体在 0.3~0.33 GHz 内吸收率高于 85%, 在 0.33~18 GHz 内吸收率高于 90%. 如图 3(a) 所示, 对于 45° 范围内斜入射的 TE 波, 在 0.33~18 GHz 内的吸收率高于 82%. 如图 3(b) 所示, 对于 60° 范围内斜入射的 TM 波, 在 0.33~18 GHz 内的吸收率高于 90%. 结果表明, 设计的吸波体具有广角稳定性的特点. 如图 3(c) 所示, 不同极化角度下的吸波率是不变的, 说明设计的吸波体具有良好的极化不敏感特性.

2.4 阻抗匹配和损耗机制分析

混合吸波体的反射系数可以根据输入阻抗和自由空间阻抗计算得出, 对等式 (14) 两边取绝对值

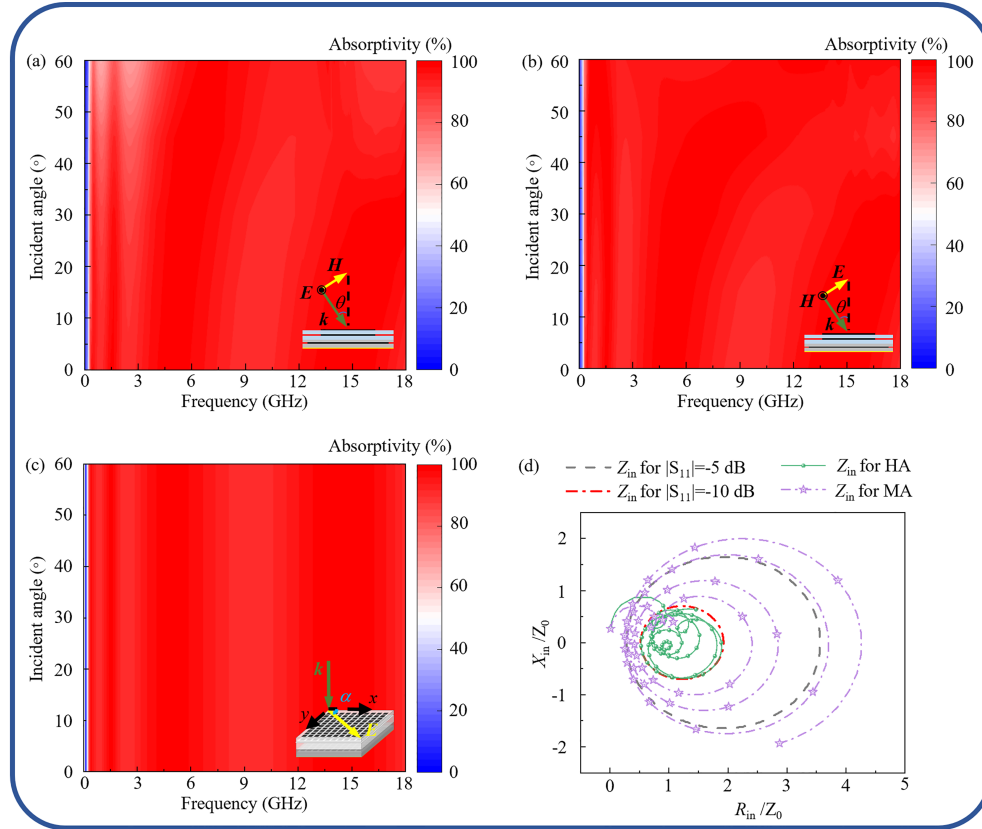


图 3 (网络版彩图) (a) TE 极化波和 (b)TM 极化波斜入射下混合吸波体的吸收率仿真结果; (c) 不同极化角度下混合吸波体的吸收率仿真结果; (d)MA 与 HA 的输入阻抗

Figure 3 (Color online) Absorption simulation results of the hybrid absorber under oblique incidence for (a) TE polarization and (b) TM polarization; (c) absorption simulation results of the hybrid absorber at various polarization angles; (d) input impedance of MA and HA

可以得到

$$|S_{11}| = \left| \frac{Z_{in}^{HA} - Z_0}{Z_{in}^{HA} + Z_0} \right|. \quad (15)$$

混合吸波体的输入阻抗可以表示为

$$Z_{in}^{HA} = R_{in} + jX_{in}. \quad (16)$$

将公式 (17) 带入公式 (16), 并对两边取平方, 进一步推导可以得到一个圆方程:

$$R_{in}^2 - X_{in}^2 + 2Z_0R_{in} \frac{|S_{11}|^2 + 1}{|S_{11}|^2 - 1} + Z_0^2 = 0. \quad (17)$$

它的圆心位于 $(-Z_0 \left(\frac{|S_{11}|^2 + 1}{|S_{11}|^2 - 1} \right), 0)$, 半径 $r = Z_0 \sqrt{(|S_{11}| + 1)^2 / (|S_{11}| - 1)^2 - 1}$.

图 3(d) 呈现了不同反射系数的归一化输入阻抗实部和虚部. 如果要实现目标反射系数, 那么输入阻抗的实部和虚部均要位于相应的阻抗圆中. 对于设计的混合吸波体, R_{in} 和 X_{in} 的值几乎全部位于 $|S_{11}| = -10$ dB 的阻抗圆中, 说明在工作带宽内具有良好的阻抗匹配.

为了更深入地分析混合吸波体的损耗机制和能量损耗的分布情况, 仿真了 0.42, 1.53, 4.85 和 14.55 GHz 处的功率损耗密度和表面功率损耗密度. 从图 4(a)~(d) 可见, 磁性材料在低频和高频能

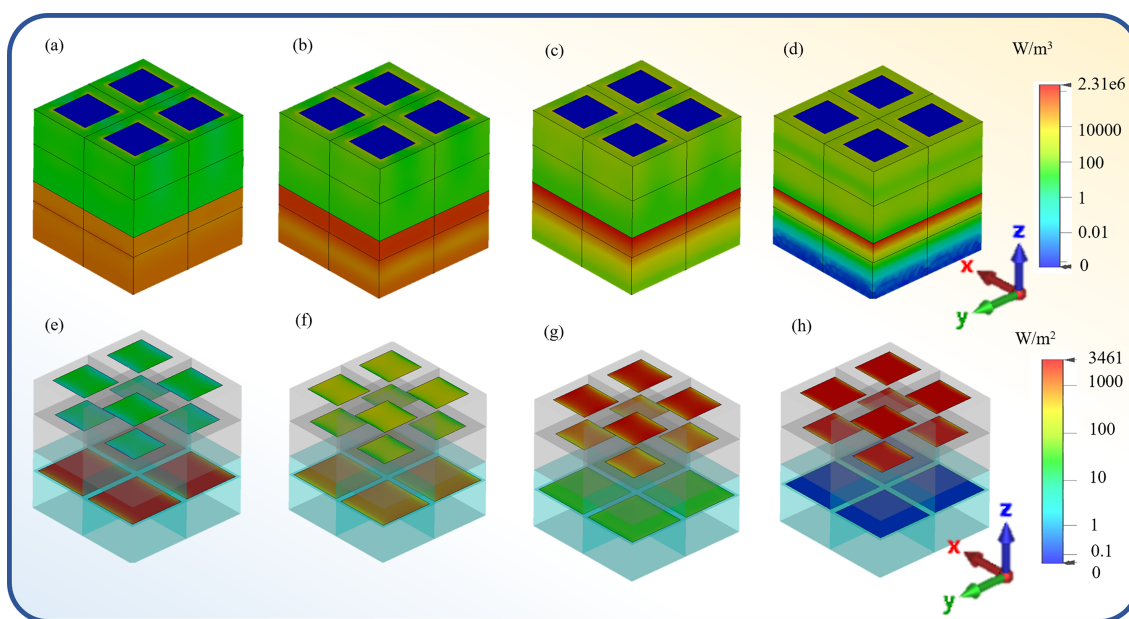


图 4 (网络版彩图) 0.42, 1.53, 4.85, 14.55 GHz 处的 (a)~(d) 功率损耗分布及 (e)~(h) 表面功率损耗分布
 Figure 4 (Color online) (a)~(d) Power loss distribution and (e)~(h) surface power loss distribution at 0.42, 1.53, 4.85, and 14.55 GHz

量损耗中发挥关键作用, 低频谐振吸收频率的能量损耗集中在磁性材料 MM1 和 MM2 中, 高频吸收谐振的能量损耗集中在上层磁性材料 MM2. 如图 4(e)~(h) 所示, 阻性表面在电磁能量损耗中发挥着重要作用. 在 0.42 GHz 和 1.53 GHz 处, 嵌入在磁性材料中的阻性表面 RS1 提供能量损耗, 高于补偿层中的阻性表面 RS2 和 RS3. 对于 4.85 GHz 和 14.55 GHz, 补偿层中的阻性表面提供能量损耗, 高于嵌入在磁性材料中的阻性表面. 结果表明, 磁性介质损耗和阻性表面的电阻损耗协作实现低频及高频良好的吸波性能.

此外, 对工作频率范围内各材料能量损耗占比进行定量分析, 如图 5(a) 所示. 在 0.3~2 GHz 范围内, 磁性材料 MM1 和 MM2 与阻性表面 RS1 协同实现对低频段电磁能量的损耗. 在 2~18 GHz 范围内, 磁性材料和补偿层阻性表面协同实现了电磁能量的损耗. 如图 5(b)~(e) 所示, 给出了 0.42, 1.53, 4.85 和 14.55 GHz 处各材料提供的能量损耗占比, 进一步说明各材料之间协同吸波机制. 在 0.42 GHz 处, 阻性表面 RS1 的能量损耗占主导地位, 占比约 70.4%, 磁性材料总占比 26.3%. 在 1.53 GHz 处, 磁性材料能量损耗总占比为 76.9%, 阻性表面 RS1 占比为 18.8%. 在 4.85 GHz 处, 能量损耗主要集中在磁性材料 MM2, 占比约为 66.4%, 补偿层的阻性表面能量损耗比例约为 30.1%. 在 14.55 GHz 处, 补偿层的阻性表面能量损耗占主导地位, 总占比约为 82.3%, 磁性材料 MM2 的能量损耗占比约为 17.5%. 综合功率损耗和表面功率损耗以及各材料能量损耗占比分析, 结果表明磁性介质损耗和阻性表面的电阻损耗的机制协同是实现低频超宽带吸波的有效方法.

3 性能测试与讨论

为了进一步验证吸波体的性能, 加工并制作了尺寸为 400 mm × 400 mm 的吸波体样品, 如图 6(a) 所示. 使用丝网印刷技术将阻性表面印在厚度为 0.05 mm 的 PET 薄膜上, 介电常数为 3.0+i0.003, 其

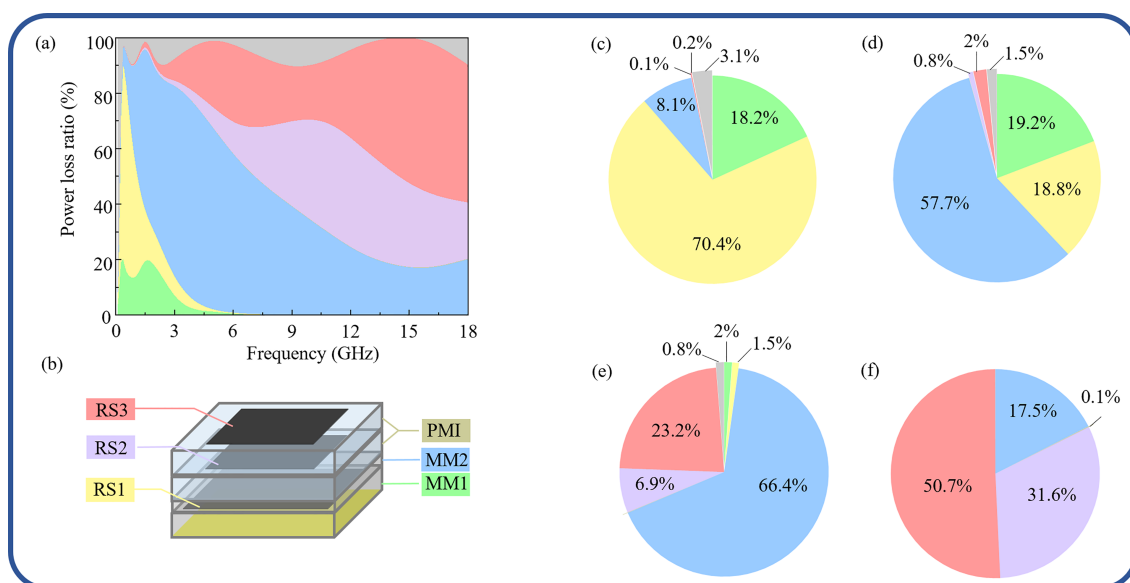


图 5 (网络版彩图) (a) 工作带宽内吸波体各材料的能量损耗比例; (b) 吸波体中各材料分布; (c) 0.42 GHz, (d) 1.53 GHz, (e) 4.85 GHz, (f) 14.55 GHz 处的各材料能量损耗比例

Figure 5 (Color online) (a) Proportion of energy loss of each kind of material in the absorber in operating band; (b) distribution of material in the absorber; proportion of energy loss of each kind of material in the absorber at (c) 0.42 GHz, (d) 1.53 GHz, (e) 4.85 GHz, (f) 14.55 GHz

微小厚度对吸收特性的影响可以忽略不计. 所选的磁性材料型号为 LCXBFT-2¹⁾, 将阻性表面嵌入两层磁性材料并粘在金属板上, 制成磁性吸波体. 然后将阻性表面按照设计的顺序粘附 PMI 泡沫上, 制成补偿层与磁性吸波体堆叠形成吸波样品.

在微波暗室中, 使用弓形法测试吸波样品. 在图 6(a) 中, 采用两对宽带喇叭天线连接矢量网络分析仪 (Keysight E5063A) 作为发射器和接收器, 记录测试数据. 两对天线的工作频带为 1~8 GHz (LB-1080-SF) 和 2~18 GHz (LB-20180-SF). 在测试中, 天线与样品之间的距离 (L_{as}) 需要满足远场条件, 即 $L_{as} > 2D_a^2/\lambda$, 其中 D_a 是天线口径长边. 采用与吸波样品相同尺寸的金属板作为参考板, 对吸波样品的反射率进行归一化处理. 图 6(b) 和 (c) 显示了设计的吸收器在 1~18 GHz 内 TE 极化波、TM 极化波斜入射时的反射率测量曲线. 在 TM 极化波入射条件下, 其反射率可保持在 -10 dB 以上; 在 TE 极化波入射下, 其反射率可保持在 -8 dB 以上, 表明它具有斜入射角稳定性. 测量结果与仿真结果一致, 由此推断, 在 0.3~1 GHz 范围内, 测试结果与仿真结果一致.

图 7 对比了设计的吸波体和其他报道的吸波体, 其中图 7(a) 比较了吸波体 -10 dB 反射损耗的相对厚度和相对带宽, 相对厚度可以通过 t/λ_{\max} 计算得到, 其中 λ_{\max} 是最低频率的波长, t 为吸波体的总厚度; 相对带宽可以通过 $2(f_{\max} - f_{\min})/(f_{\max} + f_{\min})$ 计算得到, 其中 f_{\max} , f_{\min} 分别为最高频率和最低频率. 图 7(b) 比较了具有 -10 dB 反射损耗的初始频率和截止频率. 与其他已报道的吸收体相比, 设计的混合吸体表现出更优异的性能.

4 结论

本文提出了一种基于多机制协同的吸波体设计方法, 结合磁性损耗和电阻损耗机制, 利用等效电

1) 1) Available: <http://www.xibopian.com/Product/9015761435.html>

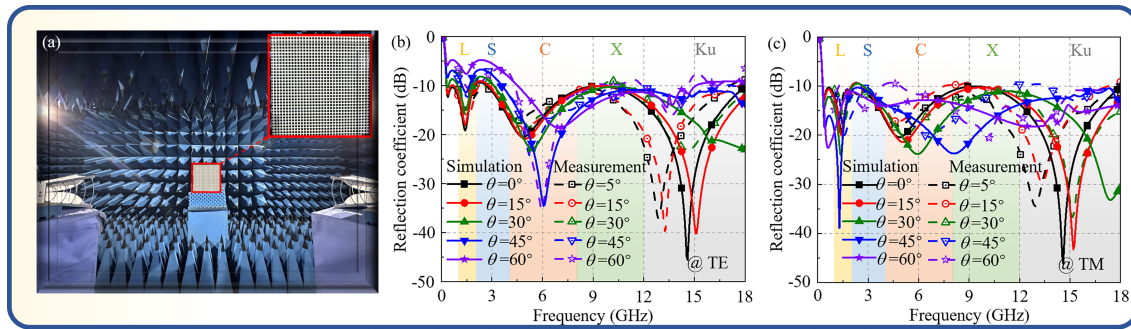


图 6 (网络版彩图)(a) 远场测试装置与制作的吸波体样品; (b)TE 极化波和 (c)TM 极化波斜入射下的测试的反射率曲线

Figure 6 (Color online) (a) The photography of far field test setup and the fabricated sample; reflection coefficients of the designed HA under the oblique incidence for (b) TE polarization and (c) TM polarization

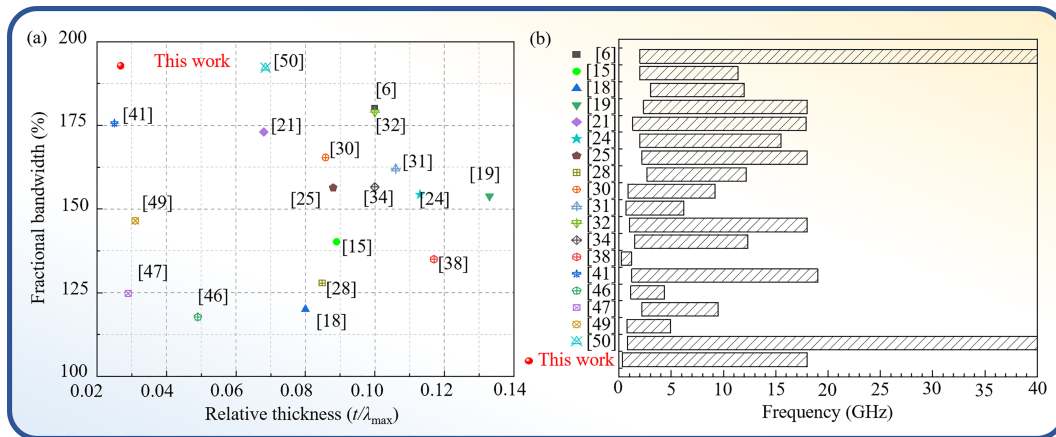


图 7 (网络版彩图) 设计的吸波体与已报道的吸波体性能对比。(a) 相对厚度和相对带宽; (b) 初始频率和截止频率

Figure 7 (Color online) Comparison of the designed absorber with other reported absorbers. (a) Relative thickness and fractional bandwidth; (b) initial and cutoff frequency

路模型和遗传算法实现快速阻抗匹配和参数优化, 设计 P-Ku 波段的超宽带吸波体. 设计的吸波体由磁性吸波体和补偿层组成, 其中磁性吸波体提供 P-L 波段的电磁能量吸收, 补偿层实现 S-Ku 波段的吸波性能补偿, 实现 P-Ku 波段电磁能量高效吸收. 通过阻抗匹配理论和功率损耗分布, 分析了低频超宽带协同吸波机制. 设计的吸波体相对厚度 $0.027\lambda_{\max}$, λ_{\max} 为最低频率的波长, 电磁波垂直入射下, 可以提供 -10 dB 反射损耗的相对带宽为 192.8%. 而且, 吸波体具有广角特性, 在 TE 极化波、TM 极化波斜入射下性能稳定. 仿真和实验结果表明设计的吸波体具有低频、超宽带、低剖面及广角稳定等优势, 在吸波领域具有良好的应用前景.

参考文献

- 1 Vinoy K J, Jha R M. Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization. New York: Springer, 1996
- 2 Panwar R, Puthucheri S, Singh D, et al. Design of ferrite-graphene-based thin broadband radar wave absorber for stealth application. IEEE Trans Magn, 2015, 51: 1-4
- 3 Munk B. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: Wiley, 2000

- 4 Buck G. Radar Cross Section Handbook. New York: Wiley, 1970
- 5 Wu L, Shi S, Wang G, et al. Carbon nanocoils/carbon foam as the dynamically frequency-tunable microwave absorbers with an ultrawide tuning range and absorption bandwidth. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2209898
- 6 An Q, Li D, Liao W, et al. A novel ultra-wideband electromagnetic-wave-absorbing metastructure inspired by bionic gyroid structures. *Adv Mater*, 2023, 35: 2300659
- 7 Zhang Z, Wang S, Lv Y, et al. MnO₂ nanostructures deposited on graphene foams for broadband and lightweight electromagnetic absorption. *J Alloys Compd*, 2019, 810: 151744
- 8 Chen N, Jiang J T, Xu C Y, et al. Co₇Fe₃ and Co₇Fe₃@SiO₂ nanospheres with tunable diameters for high-performance electromagnetic wave absorption. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9: 21933–21941
- 9 Zeng X, Cheng X, Yu R, et al. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*, 2020, 168: 606–623
- 10 Lv H, Yang Z, Ong S J H, et al. A flexible microwave shield with tunable frequency-transmission and electromagnetic compatibility. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1900163
- 11 Fante R L, McCormack M T. Reflection properties of the Salisbury screen. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1988, 36: 1443–1454
- 12 Toit L J. The design of Jauman absorbers. *IEEE Antennas Propag Mag*, 1994, 36: 17–25
- 13 Jaggard D L, Engheta N, Liu J. Chiroshield: a Salisbury/Dallenbach shield alternative. *Electron Lett*, 1990, 26: 1332–1334
- 14 Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 207402
- 15 Li H, Dong H, Zhang Y, et al. Transparent ultra-wideband double-resonance-layer metamaterial absorber designed by a semiempirical optimization method. *Opt Express*, 2021, 29: 18446
- 16 Zhang C, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 143551
- 17 Chen J, Shang Y, Liao C. Double-layer circuit analog absorbers based on resistor-loaded square-loop arrays. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, 17: 591–595
- 18 Kundu D, Baghel S, Mohan A, et al. Design and analysis of printed lossy capacitive surface-based ultrawideband low-profile absorber. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2019, 67: 3533–3538
- 19 Li M, Muneer B, Yi Z, et al. A broadband compatible multispectral metamaterial absorber for visible, near-infrared, and microwave bands. *Adv Opt Mater*, 2018, 6: 1701238
- 20 Hu D, Cao J, Li W, et al. Optically transparent broadband microwave absorption metamaterial by standing-up closed-ring resonators. *Adv Opt Mater*, 2017, 5: 1700109
- 21 Li Y, Fang Y, Huang Y, et al. Ultra-wideband, polarization-insensitive flexible metamaterial absorber base on laser printed graphene using equivalent circuit design method. *Carbon*, 2023, 32: 2209898
- 22 Zhao Y T, Chen B, Wu B. Miniaturized periodicity broadband absorber with via-based hybrid metal-graphene structure for large-angle RCS reduction. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2022, 70: 2832–2840
- 23 Bhardwaj A, Singh G, Srivastava K V, et al. Polarization-insensitive optically transparent microwave metamaterial absorber using a complementary layer. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2022, 21: 163–167
- 24 He F, Si K, Li R, et al. Frequency selective surface composites with honeycomb absorbing structure for broadband applications. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2022, 70: 8643–8647
- 25 Zheng J, Zheng H, Pang Y, et al. Transparent broadband absorber based on a multilayer ITO conductive film. *Opt Express*, 2023, 31: 3731–3742
- 26 Zhang C, Wu X, Huang C, et al. Flexible and transparent microwave-infrared bistealth structure. *Adv Mater Technologies*, 2019, 4: 1900063
- 27 Yao Z, Xiao S, Jiang Z, et al. On the design of ultrawideband circuit analog absorber based on quasi-single-layer FSS. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2020, 19: 591–595
- 28 Zhang B, Jin C, Shen Z. Low-profile broadband absorber based on multimode resistor-embedded metallic strips. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2020, 68: 835–843
- 29 Yao Z, Xiao S, Li Y, et al. Wide-angle, ultra-wideband, polarization-independent circuit analog absorbers. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2022, 70: 7276–7281
- 30 Cao Z, Li H, Wu Y, et al. Backend-balanced-impedance concept for reverse design of ultra-wideband absorber. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2022, 70: 11217–11222
- 31 Huang Y, Luo J, Pu M, et al. Catenary electromagnetics for ultra-broadband lightweight absorbers and large-scale flat antennas. *Adv Sci*, 2019, 6: 1801691
- 32 Du Z, Liang J, Cai T, et al. Ultra-light planar meta-absorber with wideband and full-polarization properties. *Opt*

- Express, 2021, 29: 6434–6444
- 33 Liang C, Kong X, Wang F, et al. A broadband perfect metamaterial absorber with angle-insensitive characteristics. *J Electro Magn Waves Appl*, 2023, 37: 401–410
- 34 Luo G Q, Yu W, Yu Y, et al. A three-dimensional design of ultra-wideband microwave absorbers. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2020, 68: 4206–4215
- 35 Kong X, Ma X, Chen P, et al. Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance. *China J Radio Sci*, 2021, 36: 947–952
- 36 Zuo W, Yang Y, He X, et al. An ultrawideband miniaturized metamaterial absorber in the ultrahigh-frequency range. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, 16: 928–931
- 37 Venneri F, Costanzo S, Di Massa G. Fractal-shaped metamaterial absorbers for multireflections mitigation in the UHF band. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, 17: 255–258
- 38 Wu C, Lu S, Yang Z, et al. A UWB absorber based on the TCA concept in the UHF band. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, 68: 4132–4136
- 39 Khuyen B X, Tung B S, Kim Y J, et al. Ultra-subwavelength thickness for dual/triple-band metamaterial absorber at very low frequency. *Sci Rep*, 2018, 8: 11632
- 40 Zhang H, Deng L, Zhang N, et al. Effective application of magnetic material based on metamaterial absorber. *Adv Mater Res*, 2013, 774: 907–912
- 41 Ning J, Dong S, Luo X, et al. Ultra-broadband microwave absorption by ultra-thin metamaterial with stepped structure induced multi-resonances. *Results Phys*, 2020, 18: 103320
- 42 Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2000, 48: 1230–1234
- 43 Zhang L, Zhou P, Zhang H, et al. A broadband radar absorber based on perforated magnetic polymer composites embedded with FSS. *IEEE Trans Magn*, 2014, 50: 4004305
- 44 Cheng Y, Nie Y, Wang X, et al. Adjustable low frequency and broadband metamaterial absorber based on magnetic rubber plate and cross resonator. *J Appl Phys*, 2014, 115: 064902
- 45 Kazantsev Y N, Lopatin A V, Kazantseva N E, et al. Broadening of operating frequency band of magnetic-type radio absorbers by FSS incorporation. *Adv Funct Mater*, 2010, 58: 1227–1235
- 46 Shou H, Feng J, Qi B, et al. A wideband absorber working in the L- and S-bands based on magnetic materials. *Appl Phys Lett*, 2023, 122: 251703
- 47 Zhang Z, Zhang L, Chen X, et al. Broadband metamaterial absorber for low-frequency microwave absorption in the S-band and C-band. *J Magn Magn Mater*, 2020, 497: 166075
- 48 Li W, Wu T, Wang W, et al. Integrating non-planar metamaterials with magnetic absorbing materials to yield ultra-broadband microwave hybrid absorbers. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 022903
- 49 Hossain M I, Nguyen-Trong N, Abbosh A M. Broadband magnetic absorber based on double-layer frequency-selective surface. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2022, 70: 410–419
- 50 Zhang C, Yin S, Long C, et al. Hybrid metamaterial absorber for ultra-low and dual-broadband absorption. *Opt Express*, 2021, 29: 14078
- 51 Cheng D K. *Field and Wave Electromagnetics*. Boston: Addison-Wesley, 1989
- 52 Kong X, Zhang S, Pang X, et al. Fast design of ultrawideband absorbers based on equivalent circuit model. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2023, 23: 1869–1873

A low-frequency ultra-wideband absorber based on multi-mechanism collaborative design

Xianglin KONG¹, Jiaqi LIU^{2*}, Lei ZHAO^{1*}, Hang SONG² & Shengjun ZHANG²

1. *School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;*

2. *National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics and Numerical Mathematics, Beijing 100072, China*

* Corresponding author. E-mail: lj006@vip.sina.com, leizhao@cumt.edu.cn

Abstract Aiming at the demand of low-frequency wideband electromagnetic absorption for stealth targets, a multi-mechanism synergistic method is proposed to design low-frequency ultra-wideband absorbers in the P-Ku bands by combining the loss characteristics of magnetic materials and resistive surfaces and combining the equivalent circuit model and genetic algorithm to fast perform impedance matching and parameter optimization. In this paper, we theoretically analyze the mechanism of magnetic materials in reducing the thickness of the absorber and enhancing the low-frequency absorbing performance to achieve good absorbing characteristics in P-L bands via the synergistic design of magnetic materials and resistive surfaces. Further, the absorption in S-Ku bands is compensated by using multi-layer resistive surface cascade structure to design ultra-wideband absorber within P-Ku bands. The designed low-frequency ultra-wideband absorber with a thickness of only $0.027\lambda_L$ (λ_L is the wavelength at the lowest frequency) can realize at least -8 dB and -10 dB reflection loss within $0.3\sim 0.33$ GHz and $0.33\sim 18$ GHz. In addition, the absorber has large angular stability and maintains good absorption performance under the oblique incidence for TE polarization and TM polarization. Finally, the proposed absorber was manufactured and tested. The results show that it owns low-frequency ultra-wideband absorption and wide-angle stability characteristics.

Keywords multi-mechanism collaborative design, magnetic material, resistive surface, low-frequency ultra-wideband, metamaterial absorber