



·高功率微波技术·

封闭舱室电磁屏蔽用频率选择表面吸波体设计^{*}

金雨霜¹, 王东俊², 张 袁^{2,3}, 刘长军¹, 闫丽萍¹

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610091;

3. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘 要: 为了解决封闭舱室内反射型电磁屏蔽结构引起的电磁场水平易于升高的问题, 提出了一种斜入射电磁波相位补偿频率选择表面(FSS)吸波体设计方法, 并基于该方法设计了一款超宽带、角度稳定的FSS吸波型电磁屏蔽结构。利用吸波结构中不同介质层对斜入射时高频和低频的电磁波相位分别进行补偿, 实现了宽频带内良好的角度稳定性。在此基础上, 采用宽度渐变条带, 并结合开缝和顶端加载技术设计出了新型十字FSS单元结构, 有效拓展了该单层单谐振FSS吸波体的工作带宽。仿真结果表明, 该结构90%吸波频带为3.9~25.8 GHz(相对带宽147.5%); 在4.7~22.1 GHz(129.9%)频带内, 两种极化下满足90%吸波率的角度稳定性达30°; 即使斜入射增加到50°时, 吸波率仍高于80%。对所设计的吸波体进行加工和测试, 实验结果与仿真结果吻合良好, 验证了设计的有效性。

关键词: 频率选择表面; 吸波体; 超宽带; 角度稳定性; 封闭舱室

中图分类号: TN03

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230446

A frequency selective surface absorber for electromagnetic shielding in enclosed cabins

Jin Yushuang¹, Wang Dongjun², Zhang Yuan^{2,3}, Liu Changjun¹, Yan Liping¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Chengdu Aircraft Industry (Group) Company Limited, Chengdu 610091, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This article proposes a phase compensation method for oblique incident electromagnetic wave to improve the angular stability of frequency selective surface (FSS) absorber. By using this method, an ultra-wideband, incident angle-stable FSS absorber-based electromagnetic shield structure is designed to reduce the electromagnetic environment level in enclosed cabins. The proposed single-layer FSS absorber achieves excellent angular stability within an ultrawide band by intentionally using different dielectric layers to compensate for the electromagnetic wave phase at high and low frequency bands respectively, and by designing a novel FSS cross unit cell featuring with gradually width-varying, slotted and top-loaded metallic strips. Simulation results reveal that the proposed absorber achieve over 90% absorption in the frequency range of 3.9–25.8 GHz, with a fractional bandwidth of 147.5%. In the frequency range of 4.7–22.1 GHz (129.9%), the angular stability of two polarizations reaches 30° with 90% absorptivity, and the absorptivity retains over 80% even when the incident angle increases up to 50°. The good agreement between the measurement and simulation results has verified the effectiveness of the design.

Key words: frequency selective surface, absorber, ultra-wideband, angular stability, enclosed cabins

雷达侦测技术和现代无线技术的飞速发展, 对电子系统的电磁防护提出了更高要求^[1-2]。电磁屏蔽技术是一种保护电子设备免受电磁干扰的有效防护手段, 常用的反射型电磁屏蔽结构(如金属屏蔽层、反射型频率选择表面(FSS)结构等)通过反射干扰波实现电磁屏蔽^[3-4]。然而对处于飞机、舰艇、汽车等封闭舱室中的电子设备, 采用反

* 收稿日期: 2023-12-22; 修订日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金区域联合创新基金项目 (U22A2015)

联系方式: 金雨霜, jinyushuang1@qq.com。

通信作者: 闫丽萍, liping_yan@scu.edu.cn。

射型电磁屏蔽方法极易因多次反射在舱室中产生电磁谐振或混响,使得舱室内某些位置处场强增强,对处于该位置的电子设备带来更严重的电磁干扰。吸波型电磁屏蔽方法为该问题提供了良好的解决方案^[5-6],该技术通过欧姆损耗、介电损耗或磁损耗来吸收干扰波,通过减少反射波有效降低封闭舱室内的电磁环境场水平。与电阻膜 FSS 吸波体^[5-6]相比,集总电阻 FSS 吸波体可方便地与带通 FSS 结构组合形成吸透一体结构^[7-8],或者加载二极管等有源器件构成可调吸波结构^[9],因而得到了广泛关注和研究。

由于封闭舱室中电磁干扰源频带宽、来波方向未知,因此研究宽带且角度稳定的 FSS 吸波体对舱内电磁屏蔽具有重要意义。FSS 吸波体的宽带设计方法主要包括多模谐振^[10-11]、组合技术^[12-13]、多层级联技术^[14-15]、三维技术^[16-17]、加载介质补偿层^[18-19]等技术。其中多模谐振、组合技术、多层级联技术不可避免地会增加单元结构中的集总电阻数量,而三维技术则通过增加一个维度来拓宽带宽因而提高了设计和加工组装的复杂度^[16]。在提高入射角度稳定性方面,加载介质补偿层或宽角阻抗匹配层^[18-20]、小型化技术^[21]是目前最常用的设计方法。由此可见,在吸波体表面加载介质补偿层兼具拓宽带宽和提高角度稳定性的优点,且能避免 FSS 结构因外界环境影响而导致的性能下降风险。

因此,本文提出了一种基于介质层的斜入射电磁波相位补偿 FSS 吸波体设计方法,并采用宽度渐变、开缝金属条带和顶端加载技术设计了新型十字 FSS 单元结构,从而使用仅加载 4 个集总电阻的单层 FSS 结构实现了超宽带且角度稳定的 FSS 吸波体,可用于封闭舱室中对干扰波进行吸收式电磁屏蔽。

1 吸波体结构设计

1.1 单元结构

FSS 吸波体的单元结构如图 1(a)所示。结构从上到下依次由介质补偿层、空气间隔层 1、FSS 损耗层、介质衬底层、空气间隔层 2 和金属反射板组成,介质补偿层和介质衬底层分别选用 FR-4 材料($\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$)和 Rogers 4350B 材料($\epsilon_r=3.66$, $\tan\delta=0.0037$)。FSS 单元由金属十字结构通过渐变导带宽度、开缝、加顶以及中心加载圆形贴片获得,将阻值 R 为 $120\ \Omega$ 的集总电阻放置在四个枝节上以实现欧姆损耗,如图 1(b)所示。吸波体内各空气层和介质层的厚度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 , p 为结构的单元尺寸, FSS 结构中 l_1 、 l_2 和 l_3 分别为各枝节长度, w_1 、 w_2 、 w_3 和 w_4 分别为各枝节宽度, s_1 和 s_2 为缝隙宽度。吸波体结构参数及取值如表 1 所示。

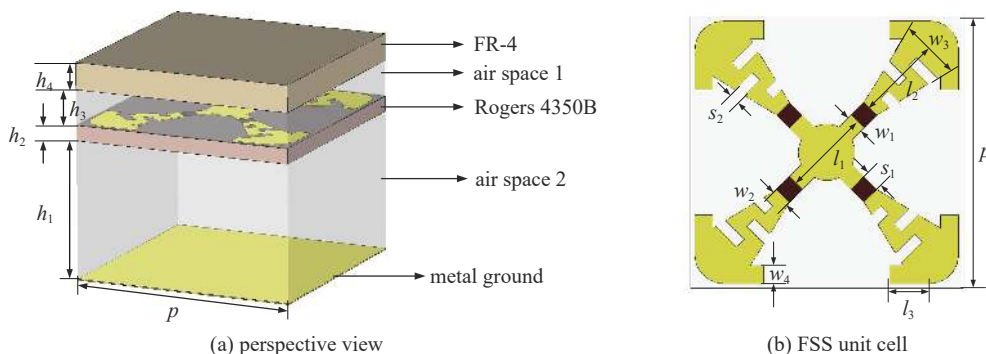


Fig. 1 Unit cell structure of the proposed FSS absorber

图 1 FSS 吸波体单元结构

表 1 FSS 吸波体结构参数

Table 1 Structure parameters of the proposed FSS absorber

p/mm	h_1/mm	h_2/mm	h_3/mm	h_4/mm	l_1/mm	l_2/mm	l_3/mm
7.5	4.6	0.508	1.1	1.0	2.5	2.4	1.1
w_1/mm	w_2/mm	w_3/mm	w_4/mm	s_1/mm	s_2/mm	R/Ω	
0.5	0.5	1.6	0.5	0.5	0.3	120	

1.2 斜入射电磁波相位补偿方法

根据吸波体等效传输线理论,电磁波入射到吸波体表面的反射系数定义为

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{in}} - Z_0}{Z_{\text{in}} + Z_0} \quad (1)$$

式中: Z_{in} 为 FSS 吸波体的输入阻抗; Z_0 为自由空间波阻抗。因此, 二者之间良好匹配是提高吸波性能的前提。

吸波体表面输入阻抗、自由空间波阻抗均与电磁波的极化方式和入射角度 θ 有关。随着入射角度的增大, TE 和 TM 两种极化波的波阻抗分别随 $Z_0/\cos\theta$ 和 $Z_0\cos\theta$ 变化, 而 Z_{in} 随 θ 的变化更加复杂, 因此二者之间难以匹配从而导致反射增大, 吸波性能下降。根据 Munk 理论, 在 FSS 吸波体表面加载介质补偿层可在增加带宽的同时对入射角度进行补偿, 提高吸波体的角度稳定性^[22]。

由于集总电阻封装具有一定厚度, 加载集总电阻的 FSS 层上方无法直接覆盖均匀介质层, 因此需在集总电阻 FSS 层间隔空气层后再加载介质补偿层^[18], 或者将介质补偿层通过 3D 打印的方式设计为带孔缝的材料^[19], 以避免集总电阻位置。为了拓展吸波带宽、实现良好的角度稳定性且降低加工成本和复杂度, 这里采用间隔空气层后加载介质补偿层的方式对吸波体进行设计, 如图 1(a) 所示。

Ma 等^[18] 基于 Salisbury 屏和 Snell 定律, 得到了垂直入射时图 1(a) 中各介质层的选取方法

$$\begin{cases} h_1 + h_2 \approx \lambda_m/4 \\ h_3 + h_4 \approx \lambda_h/4 \\ h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \approx \lambda_l/4 \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ_l 、 λ_m 、 λ_h 分别为吸波频段对应的最低频率、中心频率和最高频率处的波长。但对于斜入射情况, 目前尚未见相关讨论。因此, 本文基于电磁波斜入射至多层介质 FSS 吸波体时产生的折射、反射现象(如图 2 所示), 推导获得斜入射时满足相位补偿关系的各介质层厚度选取方法。

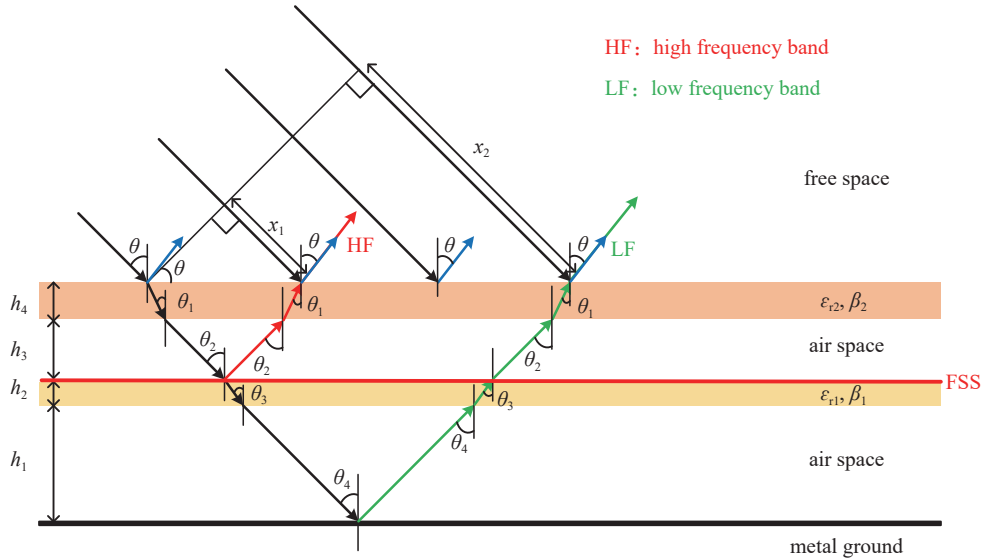


Fig. 2 Phase compensation mechanism of the proposed absorber for oblique incidence

图 2 所提出的吸波结构在斜入射下的相位补偿机理

在整个吸波体表面, 当入射电磁波的第一次反射波与其因 FSS 层和金属板所产生反射波的相位满足干涉相消条件时, 吸波体的反射系数减小, 吸波性能提高。

根据图 2, 以及第一次反射波与 FSS 层表面产生的反射波反相抵消条件可获得

$$\left(\frac{2h_4}{\cos\theta_1}\beta_2 + \frac{2h_3}{\cos\theta_2}\beta_0 + \pi \right) - (x_1\beta_0 + \pi) = \pi \quad (3)$$

同理, 当第一次反射波与金属板产生的反射波反相抵消时可获得

$$\left(\frac{2h_4}{\cos\theta_1}\beta_2 + \frac{2h_3}{\cos\theta_2}\beta_0 + \frac{2h_2}{\cos\theta_3}\beta_1 + \frac{2h_1}{\cos\theta_4}\beta_0 + \pi \right) - (x_2\beta_0 + \pi) = \pi \quad (4)$$

注意, 式(3)和式(4)均考虑了电磁波从波疏介质传播到波密介质时的半波损失现象。式中 β_0 、 β_1 和 β_2 分别为空气、介质衬底以及介质补偿层中的传播常数, 计算公式如下

$$\begin{cases} \beta_0 = 2\pi f/c, \\ \beta_i = 2\pi f \sqrt{\epsilon_{ri}}/c \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

根据 Snell 定律可知图 2 中各入射角度之间满足如下关系

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_{r2}}}\right) \\ \theta_2 = \theta \\ \theta_3 = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{\sqrt{\varepsilon_{r1}}}\right) \\ \theta_4 = \theta \end{cases} \quad (6)$$

根据上述公式可得到各介质层参数与入射角度之间的关系。由于频率越高波长越短,对频率越高的电磁波进行相位补偿时所需的介质厚度越薄,因此可采用不同介质层分别对斜入射时高频段和低频段的电磁波相位进行补偿,使得整个吸波结构能在宽频带内减少反射波,实现较好的吸波效果。综上,本文推导出一种斜入射电磁波相位补偿 FSS 吸波体设计方法,其各介质层的选取依据如式(7)和式(8)所示

$$h_3 \sqrt{1 - \sin^2\theta} + h_4 \sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta} \approx \lambda_h/4 \quad (7)$$

$$h_1 \sqrt{1 - \sin^2\theta} + h_2 \sqrt{\varepsilon_{r1} - \sin^2\theta} + h_3 \sqrt{1 - \sin^2\theta} + h_4 \sqrt{\varepsilon_{r2} - \sin^2\theta} \approx \lambda_l/4 \quad (8)$$

根据上面的推导可知,共需确定四个介质层厚度 h_1 至 h_4 ;且入射角度越大,吸波结构应越厚。提高介质板的介电常数可降低整体厚度,但将影响吸波体工作带宽^[22]。因此,考虑到加工成本和常用工程板材厚度,本文的介质衬底层和补偿层分别选用 0.508 mm 厚 Rogers 4350B 材料和 1 mm 厚 FR-4 材料。此时,只需根据式(2)、式(7)和式(8)确定 h_1 和 h_3 的取值范围。

考虑到飞机、舰艇等封闭舱室中的干扰电磁波频段主要为 X、Ku 波段,吸波体应至少工作在该频段并尽量拓展吸波带宽,因此选取初始工作频段为 6~24 GHz。为了提高厚度优势,选取最大入射角度为 50°。根据式(2)可估算垂直入射时工作于该频段的吸波体的空气间隔层厚度,将其作为最低参考厚度。根据式(7)和式(8)可估算 50°斜入射时的空气间隔层厚度,将其作为最大参考厚度。由此初步得到两个空气间隔层的参考厚度范围: h_1 约为 4~7.9 mm, h_3 约为 1~2.2 mm,这里取中间值作为空气间隔层的初始厚度,即 $h_1=6$ mm, $h_3=1.6$ mm。结合 FSS 损耗层设计,并采用全波分析软件对 FSS 吸波体性能进行优化,最终获得吸波体各介质层厚度为: $h_1=4.6$ mm, $h_2=0.508$ mm, $h_3=1.1$ mm, $h_4=1$ mm。

1.3 FSS 结构设计

为了减少集总电阻数量以节约加工运维成本、提高工程实用性,并且使 FSS 吸波体具有极化不敏感性,本文采用具有 90°旋转对称特征的单谐振结构对 FSS 进行设计。图 3 给出了 FSS 损耗层单元结构的演化过程,每个新 FSS 结构都在保持与前一结构相同部分的参数不变的前提下进行改进,相应的结构参数取值见表 1。首先, FSS 1 选用传统金属十字结构,由图 4 中的输入阻抗和反射系数可知, FSS 1 构成的吸波体在中低频段时输入阻抗与自由空间波阻抗难以匹配,导致该频段内反射系数较大。考虑到渐变结构可有效拓展带宽,将 FSS 1 中的均匀金属条带改进为 FSS 2 中的宽度渐变条带。通过调节吸波体在中低频段的阻抗,增强了该频段内吸波结构与自由空间的阻抗匹配,有效改善了反射系数,如图 4 所示。

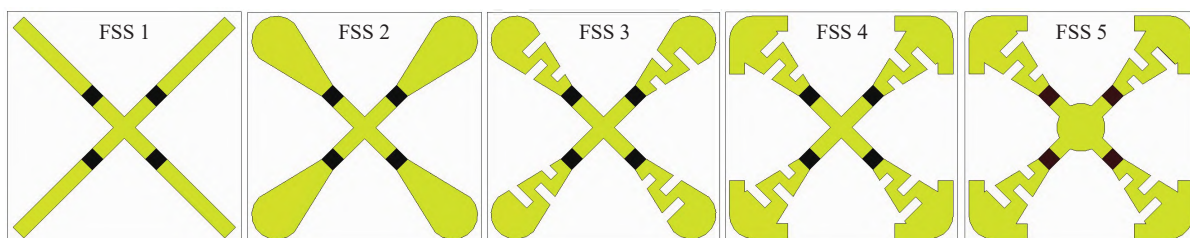


Fig. 3 Design evolution of the FSS lossy layer

图 3 FSS 损耗层的演化过程

为了拓展带宽且改善吸波结构在整个频带内的阻抗匹配,在 FSS 2 的金属渐变条带中开缝得到 FSS 3。开缝结构通过引入电容,有效改善了高频段吸波结构的输入阻抗。由图 5 中 FSS 2 和 FSS 3 的电流密度分布可知,在条带中开缝增加了电流路径,使得工作频带向低频扩展,同时也增强了 FSS 结构的表面电流分布,使得流经集总电阻的电流增强而提高欧姆损耗,从而降低结构在整个频带内的反射系数。

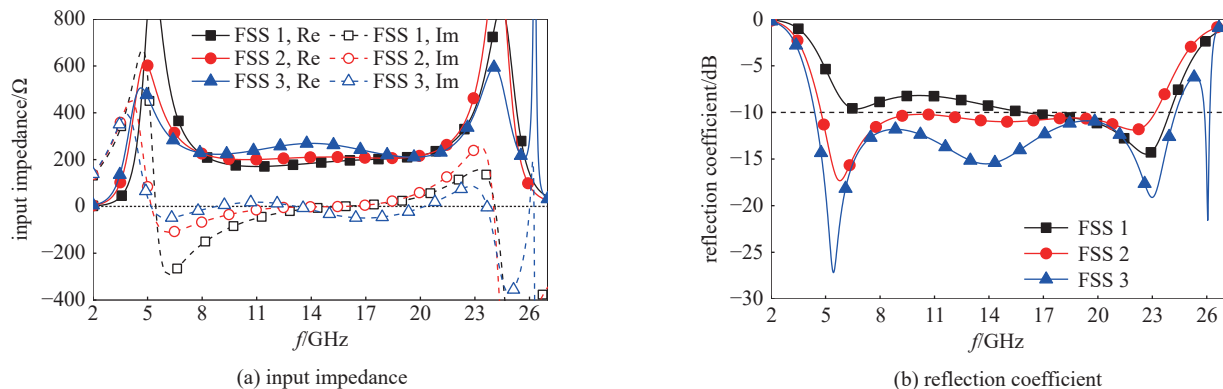


Fig. 4 Comparison of input impedance and reflection coefficient of FSS 1, FSS 2 and FSS 3 absorbers

图4 FSS 1、FSS 2和FSS 3所构成吸波体的输入阻抗及反射系数对比

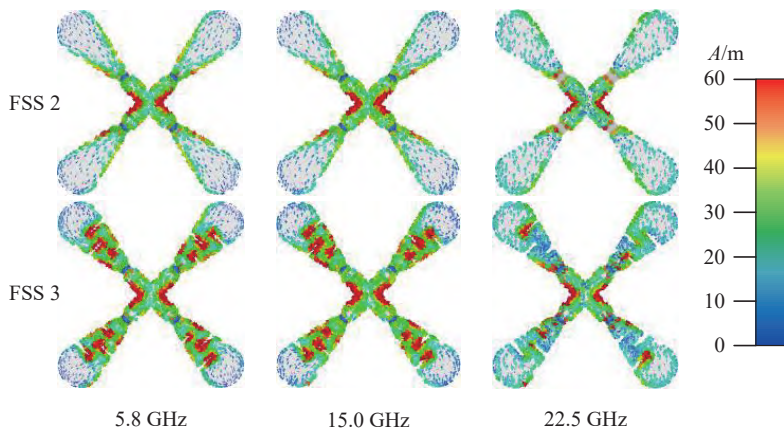


Fig. 5 Surface current density distribution of FSS 2 and FSS 3 absorbers

图5 FSS 2和FSS 3吸波体的表面电流密度分布

为了进一步拓宽 FSS 3 吸波体的低频带宽, 在 FSS 3 结构基础上在十字枝节顶端加载得到 FSS 4。这种改进将增大 FSS 在低频处的等效电感, 使得 FSS 吸波体的输入阻抗虚部更趋于 0、实部降低, 有效拓宽低频吸波带宽, 如图 6 所示。在 FSS 4 中心继续加载圆形贴片得到 FSS 5 结构, 不仅能够改善吸波体在高频处的阻抗, 还能调节电流分布以增强高频处的谐振作用(如图 7 所示), 使得吸波体在 24.0~25.8 GHz 频段内反射系数降低到 -10 dB 以下。

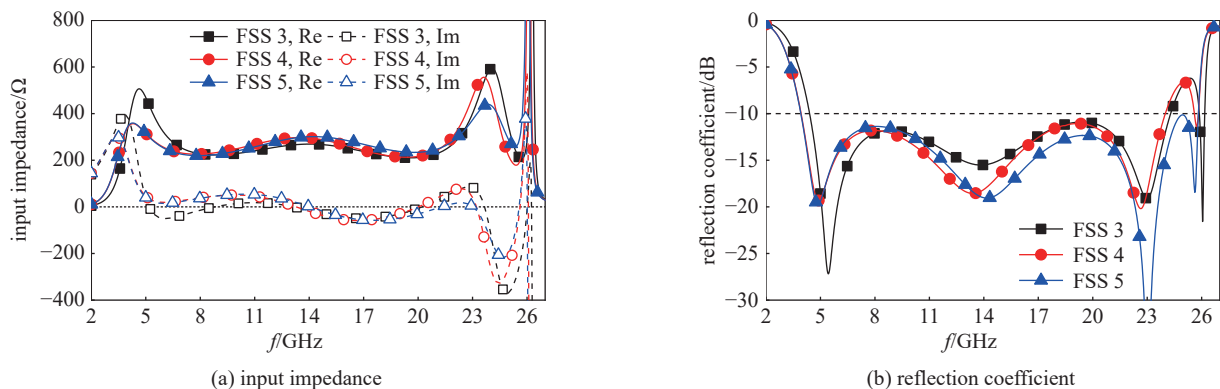


Fig. 6 Comparison of input impedance and reflection coefficient for FSS 3, FSS 4 and FSS 5 absorbers

图6 FSS 3、FSS 4和FSS 5所构成吸波体的输入阻抗及反射系数对比

综上, 采用宽度渐变、开缝、枝节顶端与中心加载技术设计的新型十字 FSS 单元结构, 使得吸波体在采用单层 FSS 损耗层且单元仅加载 4 个集总电阻的条件下, 与自由空间波阻抗在宽带范围实现了较好的阻抗匹配, 获得了超宽带吸波特性。

2 吸波体性能分析

吸波率是评价吸波体性能的重要指标, 可根据下式计算

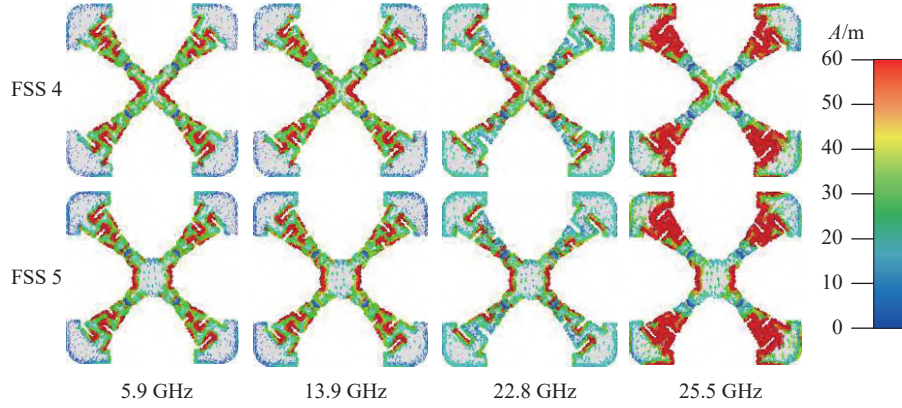


Fig. 7 Surface current density distribution of FSS 4 and FSS 5 absorbers

图 7 FSS 4 和 FSS 5 吸波体的表面电流密度分布

$$A = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \times 100\% \quad (9)$$

式中 S_{11} 和 S_{21} 分别为反射系数和透射系数, 由于金属反射板的存在, 故 $|S_{21}|=0$, 因此利用 $|S_{11}|$ 就可获得吸波率。计算可知 $|S_{11}|$ 小于 -10 dB 对应吸波率大于 90%, 而 $|S_{11}|$ 小于 -7 dB 则吸波率大于 80%。

2.1 角度稳定性及结构厚度分析

考虑到封闭舱室中干扰电磁波的入射方向未知, 所设计的 FSS 吸波体应具有良好的角度稳定性。图 8 给出了所设计 FSS 吸波体在 TE、TM 极化下吸波率随电磁波入射角度的变化。由图可知, 垂直入射时, 吸波体在 3.9~25.8 GHz (147.5%) 频带内的吸波率大于 90%, 在 3.6~25.9 GHz (151.2%) 频带内吸波率大于 80%。随着入射角度的增大, TE 极化下吸波体的吸波率逐渐降低, 而 TM 极化下其吸波频带向高频偏移且吸波率有所提高。在 4.7~22.1 GHz (129.9%) 范围内, 两种极化下满足 90% 吸波率的角度稳定性可达 30°; 即使入射角度增加到 50° 时, 吸波率仍高于 80%。

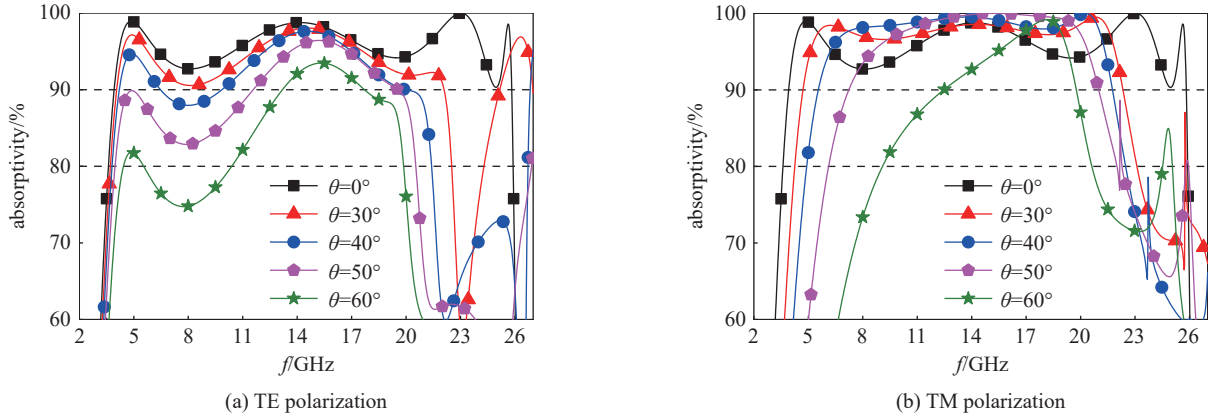


Fig. 8 Absorptivity of the absorber at different incidence angles

图 8 斜入射下吸波体的吸波率曲线

所提出吸波体的整体厚度为 $0.094\lambda_L$, λ_L 为最低吸波频率对应的波长。Rozanov 的研究指出非磁性吸波体在给定的频段存在一个理论极限厚度, 即 Rozanov 极限厚度^[23-24] 可表示为

$$d_{\text{lim}} = \frac{\left| \int_0^\infty \ln |\Gamma(\lambda)| d\lambda \right|}{2\pi^2} \quad (10)$$

式中: $\Gamma(\lambda)$ 为反射系数关于波长的函数。根据式 (10) 可计算获得与本文同等反射系数条件下的 Rozanov 极限厚度为 6.735 mm, 则所设计吸波体厚度仅为极限厚度的 1.07 倍。

2.2 主要结构参数对吸波性能的影响

实物加工和装配过程中均可能存在误差, 本文对可能产生误差的结构参数进行了分析, 包括 FSS 结构中的相对敏感参数 s_2 (宽度渐变导带的开缝宽度)、FR-4 材料的相对介电常数 ϵ_{r2} 以及空气间隔层 1 的厚度 h_3 , 图 9 给出了它们在一定范围内波动时对吸波性能的影响。由图可知, s_2 主要对 24.5~25.5 GHz 频段的吸波性能存在影响, 在

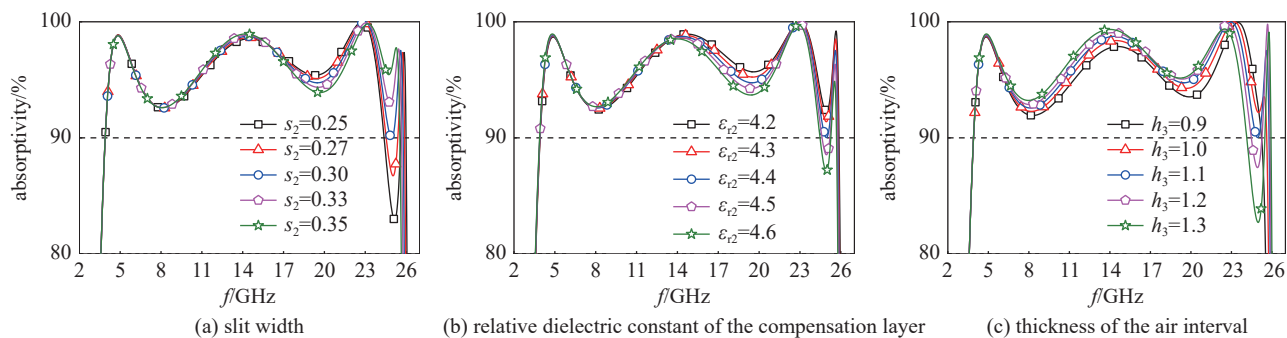


Fig. 9 Influence of main structure parameters on the absorptivity

图9 主要结构参数对吸波率的影响

存在加工误差情况下对其余频段的影响较小; ϵ_{r2} 波动主要影响 13.8~22.3 GHz 频段的吸波性能, ϵ_{r2} 越大, 该频段处的吸波率越低, 但仍能满足较好的吸波性能; 空气间隔厚度 h_3 略微增大, 有助于吸波性能的提升, 但会导致 25 GHz 处的反射增大、吸波率降低。

由于 FSS 损耗层所加载的集总电阻采用高精度高频贴片电阻, 阻值精度为 1%, 因此其阻值误差对吸波体性能几乎无影响。综上分析可知, 即使存在一定误差, 结构在 3.9~24.3 GHz 频带范围内吸波率始终大于 90%, 因此所设计的 FSS 吸波体具有很好的鲁棒性。

3 实验测试与性能对比

为了验证所提吸波体设计方法的有效性, 本文对 FSS 4 构成的吸波体进行了加工和测试。FSS 结构采用印制电路板(PCB)制备方法, 在 Rogers 4350B 介质基板上镀覆金属铜, 共制备了 38×38 个周期单元, 采用表面贴装技术(SMT)将阻值为 120 Ω 的贴片电阻焊接在周期结构上。空气间隔层采用介电常数为 1.06 左右的 PMI 泡沫替代, 将整张铝箔粘贴于下 PMI 泡沫上用作金属反射板。加工样品如图 10(a)所示, 整体尺寸为 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 7.2 mm。采用自由空间法测试该吸波体的反射率, 实验测试系统如图 10(b)所示。采用两组宽带喇叭天线和安捷伦 E8363C 矢量网络分析仪测量反射系数。为了消除测试中的环境噪声, 先测量金属铜板的反射系数作为参考, 再将铜板替换为吸波结构重新测试反射系数, 利用两次测量之差可获得吸波体的反射系数^[12]。

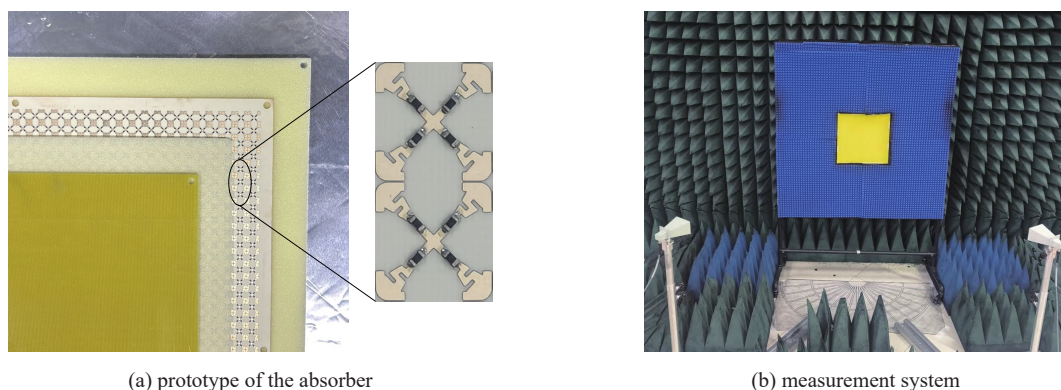


Fig. 10 Prototype of the absorber and measurement system

图10 吸波体样品照片及实验测试系统

FSS 4 吸波体垂直入射时测试与仿真结果的对比如图 11 所示, 二者吻合良好, 验证了设计方法的正确性。测试结果表明, 所设计的 FSS 吸波体具有良好的极化稳定性, 在 3.6~24.3 GHz 频带范围内达到 90% 以上的吸波率。实测和仿真结果间的差异可能是结构复合过程中存在误差、测试时测量系统搭建误差等原因造成的。

图 12 为 FSS 4 吸波体在 TE、TM 极化下电磁波斜入射时的测试结果。由图可知, 在 4.0~22.6 GHz 频带范围内, 结构在两种极化下满足 90% 吸波率的角度稳定性达到 30°。当入射角高达 50°时, TE 极化波在 3.8~20.6 GHz 范围内、TM 极化波在 5.1~22.4 GHz 频带内仍能实现 80% 以上的吸波率, 表明该吸波体具有良好的角度稳定性。

表 2 给出了 FSS 5 吸波体与其他文献中相关工作的仿真性能对比。由表可知, 本文在仅使用单层 FSS 且单元仅加载 4 个集总电阻的情况下实现了超宽带吸波和良好的角度稳定性, 且整体结构厚度仅为极限厚度的 1.07 倍。因此, 相比于文献中的同类结构, 本文所设计吸波体具有较好的综合性能优势。

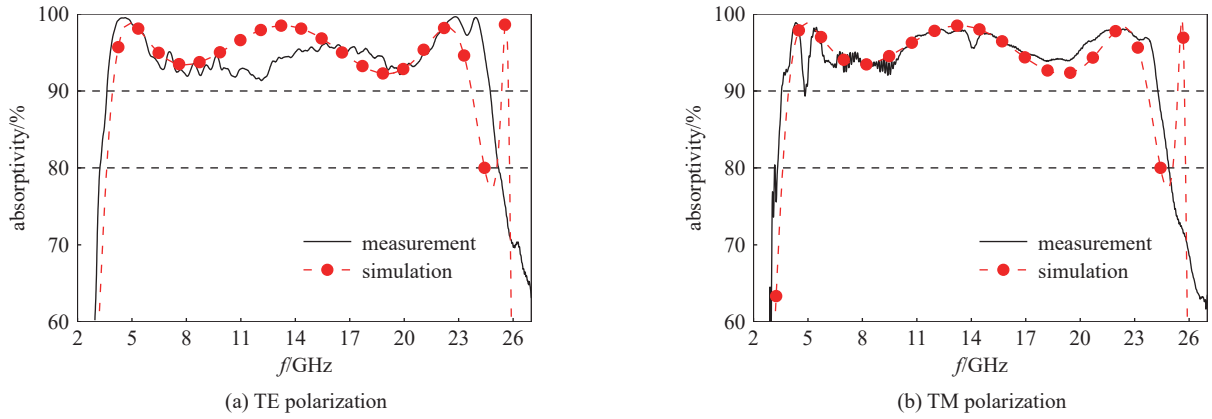


Fig. 11 Comparison of measured and simulated absorptivity at normal incidence

图 11 垂直入射时实测和仿真的吸波率对比

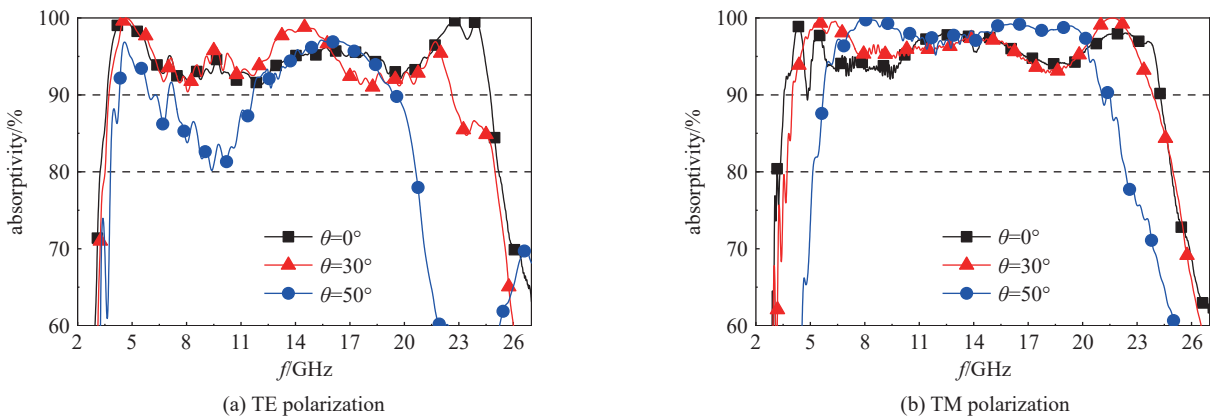


Fig. 12 Measured absorptivity of the absorber at different incidence angles

图 12 吸波体在斜入射下的测试结果

表 2 与其他 FSS 吸波体的仿真性能对比

Table 2 Simulation performance comparison with other FSS absorbers

references	absorption band ($A > 90\%$)/(GHz)	FBW/%	thickness/ λ_L	angular stability ($A > 80\%$)	number of lumped resistors in the unit cell	Num/Com
Ref.[11]	4.7–16.75	112.4	0.103	30° *	8	1/No
Ref.[12]	6.7–20.58	101.7	0.067	TE30°、TM45°	8	1/No
Ref.[13]	2.7–12.7	130.0	0.084	40°	8	1/No
Ref.[14]	2.24–11.4	134.3	0.075	45°	16	2/No
Ref.[15]	3.87–14.84	117.0	0.190	TE40°、TM50°	8	2/No
Ref.[17]	2.11–3.89	59.3	0.09	50° *	8	3D
Ref.[18]	5.8–22.2	117.1	0.155	TE40°、TM50° *	16	1/Yes
Ref.[20]	1.08–5.9	138.1	0.113	45° *	8	1/Yes
Ref.[25]	3.58–12.1	108.7	0.077	30°	4	1/No
this work	3.9–25.8	147.8	0.094	50°	4	1/Yes

FBW : fractional bandwidth, $FBW = 2(f_h - f_l)/(f_h + f_l)$; A : absorptivity; * : $A > 90\%$; Num: number of lossy FSSs; Com: compensation layer.

4 结 论

本文提出了一种斜入射电磁波相位补偿 FSS 吸波体设计方法,推导出斜入射情况下吸波体各介质层的厚度选取依据,并基于此设计了一款超宽带、角度稳定的单层 FSS 吸波结构。采用宽度渐变、枝节开缝和顶端加载技术设计出新型十字 FSS 单元结构,有效拓展了该单层单谐振 FSS 吸波体的吸波带宽。对加工和装配过程中可能产生误差的结构参数进行分析,证明了所提出的 FSS 吸波体具有较好的鲁棒性。对设计的 FSS 4 吸波体进行加工测试,验证了仿真和设计,实验结果表明,该结构 90% 吸波频带为 3.6~24.3 GHz(148.4%);斜入射高达 50°时,该吸波

体在 5.1~20.6 GHz(120.6%)范围内两种极化下的吸波率仍高于 80%。所提出的吸波体可用于飞机、舰艇、汽车等封闭舱室中以降低舱内电磁环境场水平,也可与带通 FSS 组合构成吸透一体结构应用于天线罩等隐身领域中。

参考文献:

- [1] 秦风, 蔡金良, 曹学军, 等. 车辆强电磁脉冲环境适应性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103203. (Qin Feng, Cai Jinliang, Cao Xuejun, et al. Investigation on the adaptability of vehicle in high-intensity electromagnetic pulse environment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103203)
- [2] 李克训, 马江将, 张泽奎, 等. 环氧树脂基碳纳米复合电磁屏蔽材料研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103204. (Li Kexun, Ma Jiangjiang, Zhang Zekui, et al. Study on epoxy resin-based carbon nanocomposite for electromagnetic shielding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103204)
- [3] 张靖晗, 闫丽萍, 黄钰, 等. 电磁屏蔽用低频比小型化双频带频率选择表面[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 053005. (Zhang Jinghan, Yan Liping, Huang Yu, et al. A miniaturized dual-band frequency selective surface with low frequency ratio for electromagnetic shielding[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 053005)
- [4] 沈宁, 闫丽萍, 谷智渊, 等. 频率选择表面结构的电子系统 K/Ka 波段电磁屏蔽分析[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 053006. (Shen Ning, Yan Liping, Gu Zhiyuan, et al. Electromagnetic shielding analysis of electronic systems containing frequency selective surface structure in K/Ka band[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 053006)
- [5] Sun Zihan, Yan Liping, Zhao Xiang, et al. An ultrawideband frequency selective surface absorber with high polarization-independent angular stability[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(4): 789-793.
- [6] Zhang Chonghuan, Liu Siyuan, Ni Haizhi, et al. An angle-stable ultra-wideband single-layer frequency selective surface absorber[J]. *Electronics*, 2023, 12: 3776.
- [7] 强宇, 周东方, 刘起坤, 等. 一种新型宽带吸收频率选择表面[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 103222. (Qiang Yu, Zhou Dongfang, Liu Qikun, et al. Novel absorptive frequency selective surface with wideband absorbing properties[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 103222)
- [8] Jia Yuxin, Zhai Huiqing, Guo Chaozong, et al. A dual-band composite frequency selective absorber with broadband absorption performance[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(8): 1992-1996.
- [9] Fan Yudi, Li Da, Ma Hanzhi, et al. Ultrawideband dual-polarized frequency-selective absorber with tunable reflective notch[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(3): 2855-2860.
- [10] Zhang Binchao, Jin Cheng, Shen Zhongxiang. Low-profile broadband absorber based on multimode resistor-embedded metallic strips[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(3): 835-843.
- [11] 曹文博, 麻哲义培, 黄小忠, 等. 基于单层频率选择表面的轻质宽频吸波体设计[J]. *电子元件与材料*, 2022, 41(2): 180-185. (Cao Wenbo, Ma Zheyipei, Huang Xiaozhong, et al. Design of lightweight broadband absorber based on single-layer frequency selective surface[J]. *Electronic Components and Materials*, 2022, 41(2): 180-185)
- [12] Sambhav S, Ghosh J, Singh A K. Ultra-wideband polarization insensitive thin absorber based on resistive concentric circular rings[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(5): 1333-1340.
- [13] Zhang Yufei, Yang Wenrong, Li Xiaonan, et al. Design and analysis of a broadband microwave metamaterial absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15: 4600810.
- [14] Yao Zhixin, Xiao Shaoqiu, Jiang Zhiguo, et al. On the design of ultrawideband circuit analog absorber based on quasi-single-layer FSS[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(4): 591-595.
- [15] Lim D, Lim S. Ultrawideband electromagnetic absorber using sandwiched broadband metasurfaces[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(9): 1887-1891.
- [16] Luo Guoqing, Yu Weiliang, Yu Yufeng, et al. A three-dimensional design of ultra-wideband microwave absorbers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(10): 4206-4215.
- [17] Shi Ting, Jin Lei, Han Lei, et al. Dispersion-engineered, broadband, wide-angle, polarization-independent microwave metamaterial absorber[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 229-238.
- [18] Ma Zheyipei, Jiang Chao, Cao Wenbo, et al. An ultrawideband and high-absorption circuit-analog absorber with incident angle-insensitive performance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(10): 9376-9384.
- [19] Rao Tingli, Yu Shixing, Shi Rongyang, et al. A dielectric matching layer loaded frequency selective absorber with enhanced angular stabilities[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(7): 1552-1556.
- [20] Yao Zhixin, Xiao Shaoqiu, Li Yan, et al. Wide-angle, ultra-wideband, polarization-independent circuit analog absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(8): 7276-7281.
- [21] Zhao Yutong, Chen Biao, Wu Bian. Miniaturized periodicity broadband absorber with via-based hybrid metal-graphene structure for large-angle RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 2832-2840.
- [22] Munk B A, Munk P, Pryor J. On designing Jaumann and circuit analog absorbers (CA absorbers) for oblique angle of incidence[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(1): 186-193.
- [23] Rozanov K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1230-1234.
- [24] Kazemzadeh A. Nonmagnetic ultrawideband absorber with optimal thickness[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(1): 135-140.
- [25] Parameswaran A, Ovhal A A, Kundu D, et al. A low-profile ultra-wideband absorber using lumped resistor-loaded cross dipoles with resonant nodes[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(5): 1758-1766.