

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04344>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 李若笛, 万国宾, 魏梓晗, 等. 一种新型宽带低剖面多层复合吸波体设计[J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 278–284.
LI R D, WAN G B, WEI Z H, et al. Design of a novel broadband low-profile multilayer composite absorber[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 278–284 (in Chinese).

一种新型宽带低剖面多层复合吸波体设计



扫码阅读全文

李若笛*, 万国宾*, 魏梓晗, 贾佳蓉, 王梦瑶

西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072

摘要: [目的] 针对传统吸波体性能的局限性, 设计一种新型宽带低剖面多层复合吸波体。[方法] 结合方环形电阻膜单元拓展工作带宽, 基于集总电感加载的导体单元小型化设计, 并通过优化单元结构参数, 实现宽带低剖面吸波特性和降低最低工作频率。[结果] 仿真结果显示, 所设计的复合吸波体在 3.22~14.63 GHz 频率范围内对电磁波的吸收率超过 90%, 相对带宽拓展至 127.8%, 剖面高度仅有 0.068 λ_L 。[结论] 通过等效电路模型分析其工作机理, 并提出进一步优化的方向。该设计为宽带低剖面吸波体的开发提供了重要参考。未来的工作将集中于用金属曲折线结构替代集总电感, 以降低加工的复杂度和成本。

关键词: 吸波体; 宽带; 低剖面; 电阻膜; 电磁波吸收; 雷达吸波材料

中图分类号: U665.22

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04344

0 引言

在现代海战中, 水面舰船面临着复杂多变的作战环境和日益先进的探测制导技术的双重挑战。为提高舰船生命力和作战效能, 雷达波隐身技术成为各国海军装备研究的重点。吸波体作为一种能够有效吸收电磁波能量的结构型功能材料, 是实现舰船雷达波隐身的关键手段之一。

开发高性能吸波体对于增强舰船的隐身性能具有十分重要的意义和价值, 且理想的吸波体应具备“薄、轻、宽、强”的特性, 即厚度薄、质量轻、工作频带宽以及吸波效果强^[1-4]。传统的索尔兹伯里屏^[5]和乔曼吸波体^[6]结构简单, 原理易懂, 但需要在工作带宽和剖面高度之间进行权衡。2008年, Landy等^[7]首次提出完美超材料吸波体(meta-material absorber, MA)概念。该吸波体利用共振响应特性, 能够实现优异的吸波效果, 但其带宽相对较窄, 限制了其在宽带隐身领域的应用。为拓展工作带宽, 研究者们开发了加载阻性频率选择表面的超材料吸波体, 通常通过在导体单元上加载集总电阻或利用电阻膜来构建阻性频率选择

表面以实现能量损耗。其中, Kumar等^[8]利用交叉箭头谐振器和4个SMD电阻组成宽带吸波结构, 实现了在4.5~12.4 GHz频段内超过90%的吸波率; Ruan等^[9]则通过在聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)层上印刷复杂单元形状的电阻膜, 实现了11.2~42.8 GHz频率范围内的吸波率超过90%。同时, 研究人员还喜欢设计多谐单元来增加谐振频率的数量, 以此拓展带宽, 如单方环、双方环、耶路撒冷十字结构等。随着时间的推移, 研究者们发现容性频率选择表面可以在保持宽带吸收的基础上降低剖面高度。其中Kundu等^[10]采用容性开口贴片电阻膜单元, 实现了3个连续吸收峰, 并通过逆向映射法对其阵列进行表面阻抗分析, 最终设计出具有宽带低剖面特性的吸波体, 其相对带宽达到120%, 剖面高度仅为0.08 λ_L (λ_L 为最低工作频率对应的波长)。此外, 多层结构也往往可以同时实现宽带和低剖面的吸波特性, 尤其是利用准单层和互补层结构。其中, Bhardwaj等^[11]基于双互补电阻膜层设计的吸波体, 在2~4.5 GHz频率范围内吸波率超过90%, 厚度仅有0.085 λ_L 。该设计中没有使

收稿日期: 2024-12-31 修回日期: 2025-04-07 网络首发时间: 2025-05-09 10:48

基金项目: 航空科学基金资助项目(20230018053003)

作者简介: 李若笛, 女, 2000年生, 硕士生。研究方向: 超材料吸波体设计及其应用。E-mail: lrd@mail.nwpu.edu.cn

万国宾, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 天线罩分析与设计, 电磁功能材料的理论与应用, 天线理论及电磁散射数值分析等。E-mail: gbwan@nwpu.edu.cn

魏梓晗, 男, 2001年生, 硕士生。研究方向: 超材料吸波体高性能设计。E-mail: wzh2022@mail.nwpu.edu.cn

*通信作者: 万国宾

用金属背板而是利用互补底面来减小吸波体结构的厚度。肖绍球教授团队^[12]将2个单方环结构分别打印在介质基板顶部和底部表面,设计了一种准单层吸波体,虽然仅使用一层介质,却可以结合多层和多谐振的优点,将吸波体的相对带宽拓展至135.2%,工作频带范围涉及2.22~11.48 GHz,度厚仅有 $0.075\lambda_L$ 。吸波体的小型化设计也是降低剖面高度的有效途径。例如:Zuo等^[13]设计的集总电阻加载的曲折金属方环结构,实现了0.8~2.7 GHz频带内不低于90%的吸波率,其整体剖面高度仅为 $0.071\lambda_L$;Banadaki等^[14]则在16等边环的基础上,对侧边进行收缩,同时扩大条带环的总长度,最终设计出一种花瓣结构,工作频带为1.35~3.5 GHz,此时厚度为 $0.097\lambda_L$ 。

传统方法多采用“自结构到性能”的正向设计思路,主要侧重于对全波模型的修改。相比之下,从电路角度出发,挖掘能实现宽带低剖面性能的潜在电路结构,并将其转化为全波模型的设计方法,具有更清晰的原理和更强的通用性。基于这种设计思路,Li等^[15]提出一种基于色散操纵方法的可重构吸波体模型,其通过电阻并联电感的阻抗低频色散操作,满足了超高频波段阻抗匹配要求,并借助变容管的重新配置,实现超宽带低剖面调谐吸收。然而,这种结构加载了较多集总电阻和电感元件,并引入有源器件,导致设计复杂度和加工难度较高。现有文献中,电感加载常用来抵消PIN二极管产生的寄生电容效应^[16],或利用电感和电容的并联加载实现吸波带内传输窗口的设计^[17],但鲜见直接用于吸波体设计。

因此,本文将首先利用方片形电阻膜单元和集总电感加载的方环形导体单元构建初始多层复合吸波体,并对其参数分析和等效电路分析。接着优化电阻膜单元形状以拓展工作带宽,进一步通过对导体单元小型化处理降低最低工作频率,并结合等效电路理论和参数分析探讨此时宽带低剖面性能实现的原理。

1 初始多层复合吸波体

1.1 结构设计

基于文献[16]提出的电阻并联电感的阻抗色散机制,结合方片形电阻膜和集总电感加载的方环形导体,考虑实际介质加载,构建如图1所示的初始多层复合吸波体。单元结构由上往下依次为刻蚀在FR-4基板上的集总电感加载的方环形导体单元、沉积在PET基板上的方片形电阻膜单元、空气间隔层以及金属地板。此时FR-4介质

的介电常数为4.4,损耗角正切为0.02,PET介质的介电常数为3,损耗角正切为0.06。由于存在金属地板,该吸波体的吸收率 $A(\omega)$ 可用式(1)进行计算,式中 $\Gamma(\omega)$ 表示反射率。

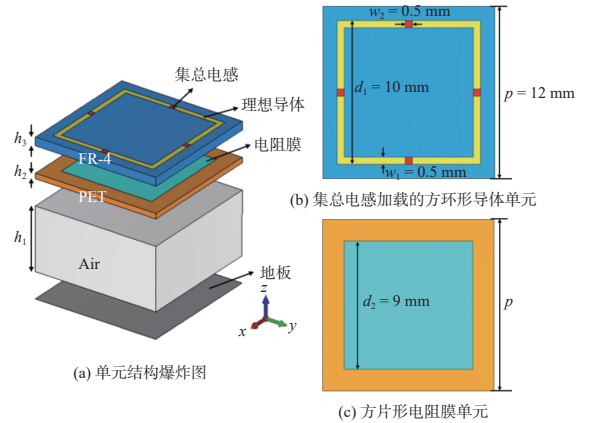


图1 初始多层复合吸波体单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the initial multilayer composite absorber unit structure

$$A(\omega) = 1 - \Gamma(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 \quad (1)$$

利用电磁仿真软件CST Microwave Studio对初始多层复合吸波体进行仿真优化,优化后的结构参数为:空气层厚度 $h_1 = 6$ mm, PET介质层厚度 $h_2 = 0.125$ mm, FR-4介质层厚度 $h_3 = 0.2$ mm,单元周期边长 $p = 12$ mm,方环形导体单元外边长 $d_1 = 10$ mm,环宽 $w_1 = 0.5$ mm,加载集总电感值 $L = 5$ nH,电感加载位置开缝宽 $w_2 = 0.5$ mm,方片形电阻膜单元边长 $d_2 = 9$ mm,电阻膜方阻值 $R_s = 200 \Omega/\text{sq}$ 。此时吸波体的吸波性能曲线如图2所示。由图可见,初始多层复合吸波体可实现3.36~10.94 GHz范围内的-10 dB吸波效果,对应吸波率大于90%。

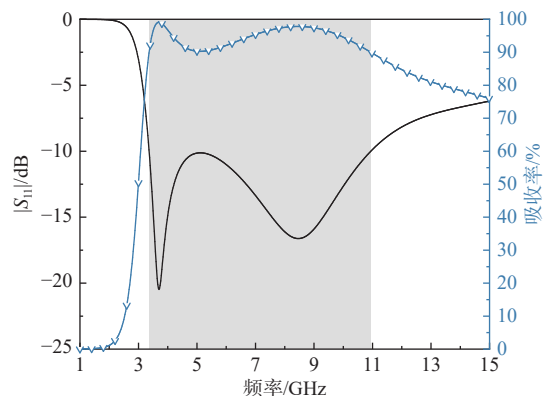


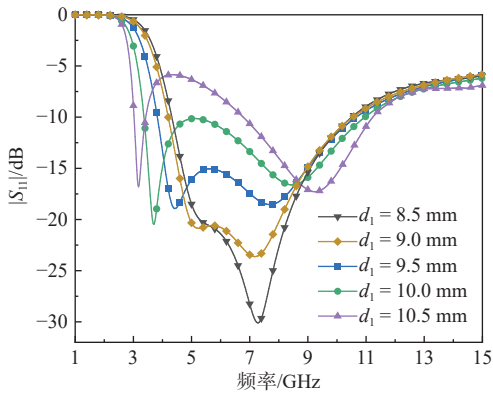
图2 初始多层复合吸波体的吸波性能曲线

Fig. 2 Absorption performance of the initial multilayer composite absorber

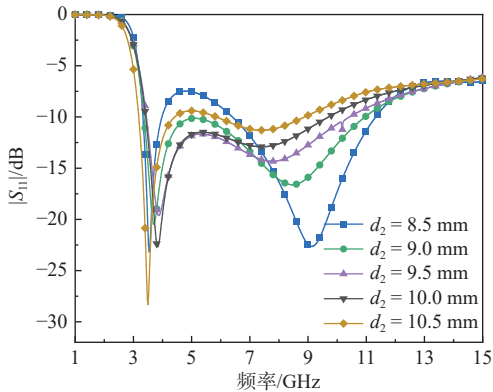
1.2 参数分析

为探究各结构参数对初始多层复合吸波体的工作带宽和最低工作频率的影响,仿真分析不同

方环形导体单元外边长 d_1 和不同方形电阻膜单元外边长 d_2 下的吸波性能,如图3所示。由图3(a)可见,随着方环形导体单元外边长 d_1 逐渐增大,最低工作频率逐渐向低频移动,而当 $d_1 (= 8.5 \text{ mm}) < d_2 (= 9 \text{ mm})$ 时, d_1 对最低工作频率的影响将被削弱,转而换为 d_2 占主导地位。由图3(b)可见,当 $d_2 < d_1$ 时,改变 d_2 对最低工作频率影响不大,而当 $d_2 (= 10.5 \text{ mm}) > d_1 (= 10 \text{ mm})$ 时, d_2 对最低工作频率的影响将占主导地位,随着 d_2 进一步增大,最低工作频率向低频移动。也就是说,对于初始多层复合吸波体而言,在导体和电阻膜结构之间,具有较大外边长的一方对最低工作频率起主导作用,并进一步对工作带宽产生影响。外边长越大,最低工作频率越低,工作带宽越宽,但2个吸收峰之间的吸收波谷处的反射系数也会随之增大,并有可能将宽带吸波分裂为2个-10 dB工作频带。



(a) $d_2 = 9 \text{ mm}$ 时改变方环形导体单元外边长 d_1



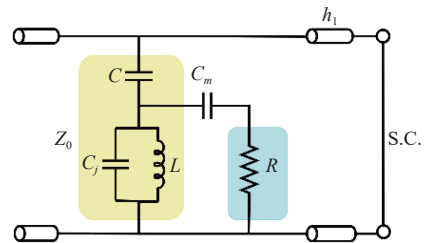
(b) $d_1 = 10 \text{ mm}$ 时改变方形电阻膜单元边长 d_2

图3 不同结构参数下多层复合吸波体的反射系数
Fig. 3 Reflection coefficients of the multilayer composite absorber under different structural parameters

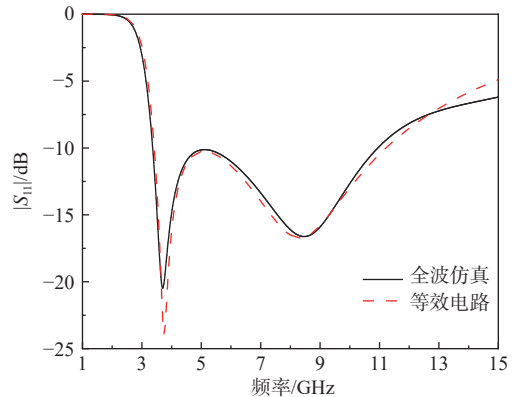
1.3 等效电路分析

接着从等效电路的角度探究初始多层复合吸波体的工作机理。按照图1所示的初始多层复合吸波体的物理结构建立相应的等效电路模型并进行简化处理。由等效电路理论分析可知,方环形导体单元阵列可等效为 LC 串联电路。此时,不

同方环形导体单元之间的空隙可等效为电容 C , 与电场平行的方环臂可等效为小电感,加之臂中心位置处存在集总电感,二者可共同等效为电感 L ,又由于加载位置处缝隙的存在, L 上应并联一个小电容 C_j 。由等效电路理论还可以知道,方形电阻膜单元阵列可等效为 RC 串联电路。由上节可知,具有较大外边长的方环形导体单元对最低工作频率具有主导地位,由设计经验可知此时是方环形导体单元阵列等效的电容 C 在起主导作用。基于此,在简化后的等效电路中忽略方形电阻膜单元阵列等效的电容。又由于2层介质均较薄,构建时可忽略不计。同时,导体单元和电阻膜单元之间存在的强烈相互作用可用耦合电容 C_m 表示,故初始多层复合吸波体的简化等效电路模型可表达为图4(a)的形式。图中,空气间隔层与金属地板可视为一段长度为 $h_1 = 6 \text{ mm}$ 的终端短路传输线。当电路参数 $R = 210 \Omega$, $C = 0.147 \text{ pF}$, $L = 5.09 \text{ nH}$, $C_j = 0.042 \text{ pF}$, $C_m = 0.318 \text{ pF}$ 时,简化后的等效电路与全波仿真结果的对比如图4(b)所示,从图中可以看出,二者吻合较好。



(a) 简化后的等效电路模型



(b) 等效电路模型与全波仿真结果对比

图4 初始多层复合吸波体简化后的等效电路模型及其与全波仿真结果对比

Fig. 4 Simplified equivalent circuit model of the initial multilayer composite absorber and its comparison with the full-wave simulation results

2 电阻膜单元宽带设计

2.1 结构设计

为拓展初始多层复合吸波体的工作带宽,保持各层介质厚度和单元周期不变,如图5(b)所示

改变电阻膜单元的形状,将图 1(c)中的方片电阻膜单元替换为方环形电阻膜单元,以构成方环电阻膜型多层复合吸波体。为实现-10 dB 宽带吸波效果,如图 5(a)所示适当优化导体单元的部分结构参数。此时方环形电阻膜单元外边长 $d_2 = 9\text{ mm}$,环宽 $w_3 = 1.1\text{ mm}$,方阻值 $R_s = 58\ \Omega/\text{sq}$,方环导体单元外边长 $d_1 = 9.1\text{ mm}$ 。

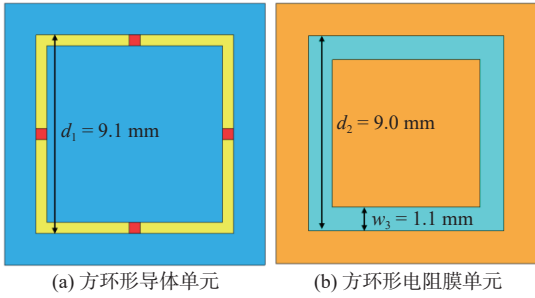


图 5 方环电阻膜型多层复合吸波体各层单元示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the units in each layer of the multi-layer composite absorber with square loop resistive film

对比不同电阻膜单元形状下多层复合吸波体的反射系数随频率的变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出,改变电阻膜单元形状后,反射系数曲线在高频处出现额外的吸收峰,工作频带的相对带宽得到了拓展。此时方环电阻膜型多层复合吸波体可工作在 $3.87\sim 15.73\text{ GHz}$ 频率范围内,相对带宽由初始的 106% 拓展至 121%。从图中还可以看到,虽然带宽得到了拓展,但此时最低工作频率有所升高,对应着吸波体的剖面高度由 $0.071\lambda_L$ 上升至 $0.081\lambda_L$ 。

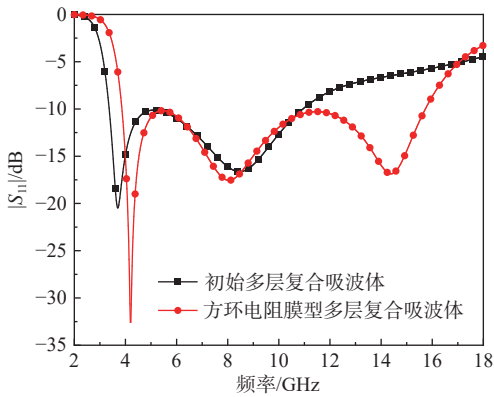
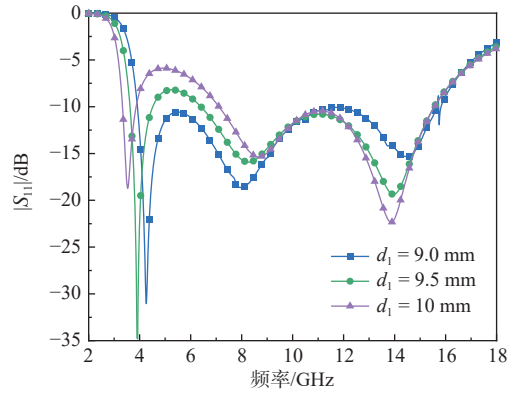


图 6 不同电阻膜单元下的多层复合吸波体的反射系数
Fig. 6 Reflection coefficients of the multilayer composite absorbers under different resistive film units

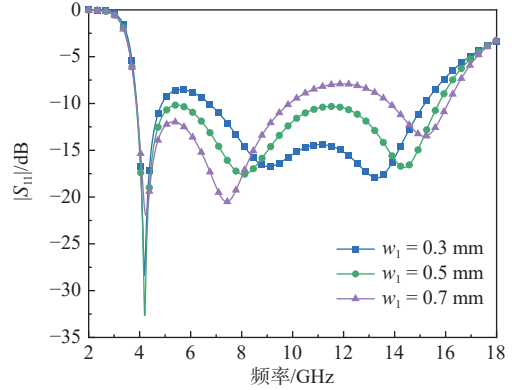
2.2 参数分析

为探究各结构参数对方环电阻膜型多层复合吸波体的工作带宽、最低工作频率以及第 3 个吸收峰的影响,仿真分析不同单元参数下的反射系数曲线如图 7 所示。从图中可以看到,最低工作频率主要受方环形导体单元外边长 d_1 的影响,随

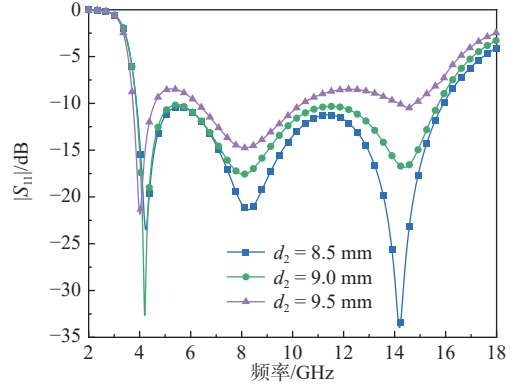
着 d_1 的增加,最低工作频率逐渐向低频移动,并伴随着第 1 个吸收波谷处的吸收性能减弱。最高



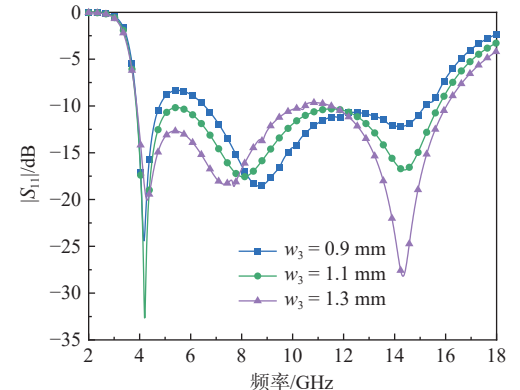
(a) 方环形导体单元外边长 d_1 不同



(b) 方环形导体单元环宽 w_1 不同



(c) 方环形电阻膜单元外边长 d_2 不同



(d) 方环形电阻膜单元环宽 w_3 不同

图 7 不同结构参数下方环电阻膜型多层复合吸波体的反射系数
Fig. 7 Reflection coefficients of the multilayer composite absorber with square loop resistive film under different structural parameters

工作频率主要受方环形导体单元环宽 w_1 和方环形电阻膜单元环宽 w_3 的影响,随着 w_1 和 w_3 的增加,第2个吸收峰对应频率向低频移动,最高工作频率向高频移动。第3个吸收峰峰值则主要受方环形电阻膜单元的结构参数影响,随着方环形电阻膜单元外边长 d_2 的减小、环宽 w_3 的增大,第3个吸收峰处的吸收性能变强。也就是说,此时吸波体的最低工作频率仍然由具有较大外边长的方环形导体单元外边长 d_1 决定,改变电阻膜单元形状后最低工作频率升高的原因也是如此,而其他3个结构参数尤其是方环形电阻膜单元的结构参数对第3个吸收峰的影响较大。

2.3 等效电路分析

进一步从等效电路的角度分析方环电阻膜型多层复合吸波体第3个吸收峰实现的工作机理。由等效电路分析理论可知,电阻膜单元形状由方片变为方环后,将在图4(a)所示电阻膜的等效电路上引入电感 L_1 ,吸波体简化后的等效电路模型将变为图8(a)。由于加载的集总电感值不变,开缝宽度不变,但方环形导体单元外边长变小的缘故,对应等效电路中 L 将变小为 5.04 nH,干路电容 C 将变小为 0.107 pF,并联电容 C_j 将保持不变仍为 0.042 pF,当其他电路参数 $C_m = 0.117$ pF, $R = 232 \Omega$, $L_1 = 3.01$ nH 时,等效电路与全波仿真结果

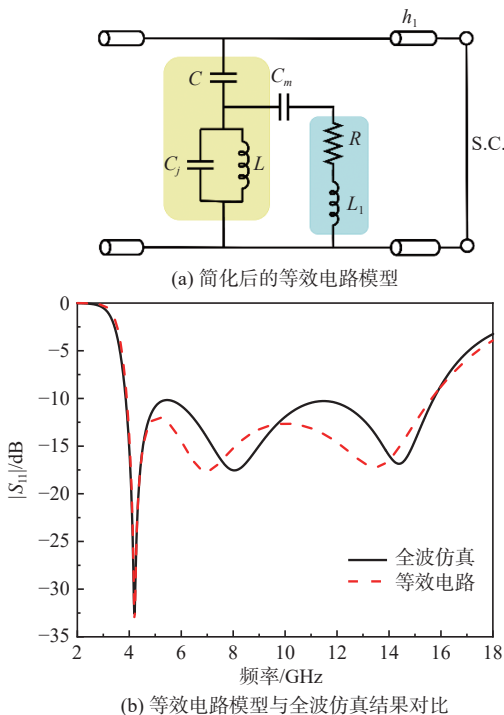


图8 方环电阻膜型多层复合吸波体简化后的等效电路模型及其与全波仿真结果对比

Fig. 8 Simplified equivalent circuit model of the multilayer composite absorber with square loop resistive film and its comparison with the full-wave simulation results

对比如图8(b)所示。从图中可以看到,引入电感 L_1 后,等效电路对应的仿真结果出现第3个吸收峰,且与全波仿真结果在第1个吸收峰值频率附近吻合较好,二者在整体上大致吻合。也就是说,当电阻膜单元形状由方片变为方环时,对应等效电路模型中相当于引入了电感成分,这种处理对第3个吸收峰的形成具有促进作用,从而使吸波体工作频段的相对带宽得到了拓展。

3 导体单元宽带低剖面设计

3.1 结构设计

由图7可知,为降低方环电阻膜型多层复合吸波体的剖面高度,应尽可能增大方环形导体单元外边长 d_1 以降低最低工作频率,同时需要保证加载集总电感的导体单元与方环形电阻膜单元结构不能相距太远以维持它们之间的强耦合效果。为此,在方环电阻膜型多层复合吸波体的基础上,对导体单元进行小型化处理,如图9(a)所示,具体表现为增大 d_1 至 10.31 mm 并将方环四臂中心向内弯折,最终构建了弯折方环导体型多层复合吸波体。此时弯折方环形导体单元环宽 w_1 仍为 0.5 mm,四臂中心向内弯折宽度 $a = 2.38$ mm,深度 $b = 2$ mm,方环形电阻膜单元外边长 $d_2 = 7.5$ mm,环宽 $w_3 = 0.8$ mm,电阻膜的方阻值 $R_s = 31 \Omega/\text{sq}$,加载的集总电感值 $L = 4.5$ nH,除此之外,各层介质厚度和结构周期 p 均保持不变。

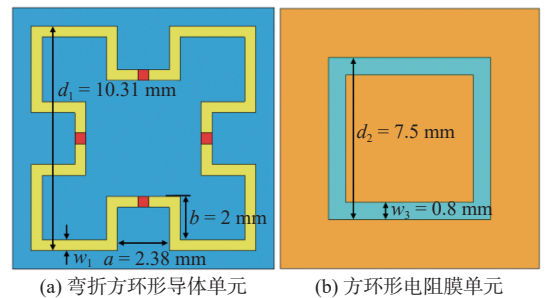


图9 弯折方环导体型多层复合吸波体各层单元示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the units in each layer of the multilayer composite absorber with bent square loop conductor

对比不同导体单元形状下多层复合吸波体的反射系数随频率的变化曲线如图10所示,可以看到,对方环形导体单元进行小型化处理,反射系数曲线整体往低频移动,最低工作频率下降。此时弯折方环导体型多层复合吸波体可工作在 3.22~14.63 GHz 频率范围内,剖面高度由 $0.081\lambda_L$ 下降至 $0.068\lambda_L$,相对带宽进一步拓展至 127.8%。

3.2 等效电路分析

同样将弯折方环导体型多层复合吸波体等效

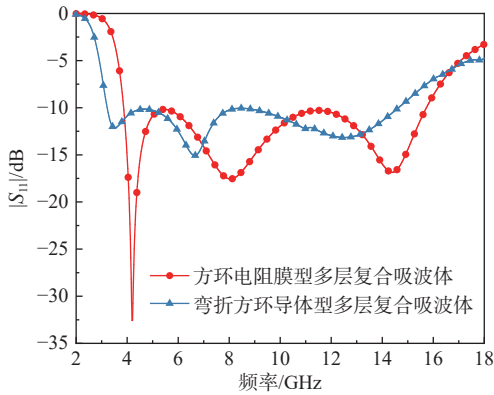


图10 不同导体单元下多层复合吸波体的反射系数

Fig. 10 Reflection coefficients of the multilayer composite absorbers under different conductor sheet units

为图 8(a)所示的等效电路模型。由于方环形导体单元外边长 d_1 的增大,等效电路中的干路电容 C 将变大为 0.138 pF ,加之其他电路参数 $L=6.26 \text{ nH}$, $C_j=0.042 \text{ pF}$, $C_m=0.204 \text{ pF}$, $R=226 \text{ } \Omega$, $L_1=1.95 \text{ nH}$ 时,等效电路与全波仿真结果对比如图 11 所示。从图中可以看到,等效电路与全波仿真结果在整体上吻合较好,而在 8.5 GHz 附近的反射系数幅值有些许差异。仿真表明,该点受 L_1 的影响较大, L_1 越大,该点的反射系数越大。

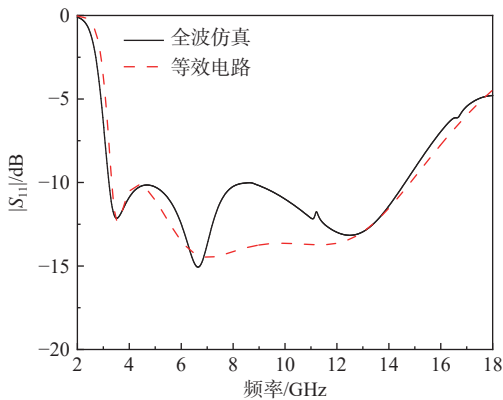


图11 弯折方环导体型多层复合吸波体简化后的等效电路模型与全波仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of the simplified equivalent circuit model of a bent square loop conductor multilayer composite absorber with the full-wave simulation results

综上所述,方环形导体单元外边长的增大有助于最低工作频率的下降,而对方环形导体单元的弯折处理则是为了保持耦合电容的存在,以维持整体的宽带吸波效果。

4 结语

本文结合方片形电阻膜单元和集总电感加载的方环形导体单元设计一种工作在 $3.36 \sim 10.94 \text{ GHz}$ 的初始多层复合吸波体,并利用等效电路模型分析了其宽带吸波性能实现的原因。接着对电阻膜单元进行宽带设计,通过将方片形电阻膜单元替

换为方环形电阻膜单元以在等效电路中引入电感,促进了第3个吸收峰的形成,相对带宽由 106% 拓展至 121% 。最后对导体单元进行宽带低剖面设计,通过对其进行小型化处理,增大等效电路中的干路电容,降低最低工作频率,实现了剖面高度由 $0.081\lambda_L$ 下降至 $0.068\lambda_L$,此时其工作频率范围为 $3.22 \sim 14.63 \text{ GHz}$,相对带宽更是进一步拓展至 127.8% 。

将本文最终设计的弯折方环导体型多层复合吸波体与其他宽带低剖面吸波体进行性能对比,结果如表 1 所示。从表中可以看到,本文设计的吸波体具有最低的厚度带宽比(T-BR),可在较少层数时实现剖面高度最低,相对带宽较宽,对于吸波体的宽带低剖面设计具有一定参考价值。下一步的工作侧重于将集总电感替换为金属曲折线结构来降低加工的复杂度和成本,并进行实际的加工测试。

表1 宽带低剖面吸波体性能对比

Table 1 Comparison of absorption performance of broadband low-profile absorbers

吸波体	层数	工作频段 /GHz	相对带宽 /%	剖面高度/ λ_L	T-BR
文献[10]	1	3.00~12.00	120.0	0.080	0.107
文献[11]	4	2.00~4.50	77.0	0.085	0.144
文献[12]	准单层	2.24~11.40	134.3	0.078	0.098
文献[13]	1	0.80~2.70	108.5	0.071	0.100
文献[14]	1	1.35~3.50	88.6	0.097	0.158
文献[18]	3	1.14~14.20	170.3	0.091	0.099
本文结构	2	3.22~14.63	127.8	0.068	0.087

参考文献:

- [1] 朱炜,陈炜,冯洋.水面舰船雷达波隐身技术与总体设计[J].中国舰船研究,2015,10(3):1-6,56.
ZHU W, CHEN W, FENG Y. Radar stealth technology of surface combatant ships and overall system design[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(3): 1-6, 56 (in Chinese).
- [2] 朱英富,熊治国,袁奕,等.现代水面舰船技术发展思考[J].中国舰船研究,2022,17(5):1-8.
ZHU Y F, XIONG Z G, YUAN Y, et al. Thoughts on development of modern ship technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 1-8 (in Chinese).
- [3] 曾亮亮,张麟兮,万国宾.一种基于有源频率选择表面的可调吸波体特性分析[J].中国舰船研究,2020,15(2):36-41.
ZENG X L, ZHANG L X, WAN G B. Performance analysis of a tunable absorber based on active frequency selective surface[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2): 36-41 (in both Chinese and English).

- [4] 唐斯密, 李铤, 宋汉江. 基于雷达回波特征显影技术的雷达吸波材料涂覆方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 17–24.
TANG S M, LI X B, SONG H J. Study on coating of radar absorbing materials based on radar echo development[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 17–24 (in Chinese).
- [5] FANTE R L, MCCORMACK M T. Reflection properties of the Salisbury screen[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1443–1454.
- [6] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [8] KUMAR A, REDDY G S, PADHI J, et al. Wideband, polarization independent electromagnetic wave absorber using cross arrow resonator and lumped SMD resistors for C and X band applications[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(7): e23163.
- [9] RUAN J F, MENG Z F, ZOU R Z, et al. Ultra-wideband metamaterial absorber based on frequency selective resistive film for 5G spectrum[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2023, 65(1): 20–27.
- [10] KUNDU D, BAGHEL S, MOHAN A, et al. Design and analysis of printed lossy capacitive surface-based ultrawideband low-profile absorber[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 3533–3538.
- [11] BHARDWAJ A, SINGH G, SRIVASTAVA K V, et al. Polarization-insensitive optically transparent microwave metamaterial absorber using a complementary layer[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(1): 163–167.
- [12] YAO Z X, XIAO S Q, JIANG Z G, 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.
- [13] ZUO W Q, YANG Y, HE X X, et al. An ultrawideband miniaturized metamaterial absorber in the ultrahigh-frequency range[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 928–931.
- [14] BANADAKI M D, HEIDARI A A, NAKHKASH M. A Metamaterial absorber with a new compact unit cell[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(2): 205–208.
- [15] LI H R, CAO Z W, XIA Y F, et al. Dispersion manipulation method for ultrahigh-frequency band reconfigurable absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(2): 1983–1988.
- [16] GUO S, MAO Z L, HU S M, et al. Parasitic effect suppression with resonance cancelation for broadband absorber/reflector[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(9): 1742–1746.
- [17] CHEN Q, YANG S L, BAI J J, et al. Design of absorptive/transmissive frequency-selective surface based on parallel resonance[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4897–4902.
- [18] SHI T, TANG M C, YANG J N, et al. A low-profile and ultrawideband capacitive circuit absorber empowered by enlarged unit periodicity[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(3): 551–555.

Design of a novel broadband low-profile multilayer composite absorber

LI Ruodi, WAN Guobin*, WEI Zihan, JIA Jiarong, WANG Mengyao

School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: [**Objective**] To overcome the limitations of conventional wave-absorbing structures, a novel broadband, low-profile multilayer composite absorber was designed. [**Method**] The proposed design integrates square loop resistive film units to significantly broaden the operational bandwidth and incorporates miniaturized conductor units based on lumped inductance loading. Structural parameters were further optimized to achieve broadband, low-profile wave-absorption, effectively lowering the minimum operational frequency. [**Results**] Simulation results show that the developed composite absorber achieves over 90% electromagnetic wave absorption across the frequency range of 3.22 to 14.63 GHz, with a relative bandwidth of 127.8% and a low profile height of just $0.068\lambda_L$. [**Conclusion**] The operational mechanism of the absorber is analyzed using an equivalent circuit model, and potential improvements are discussed. This design offers valuable insights and a solid reference for the development of broadband, low-profile absorbers. Future work will focus on replacing lumped inductors with metal meander-line structures to reduce processing complexity and costs.

Key words: absorber; broadband; low-profile; resistive film; electromagnetic wave absorption; radar absorbing materials