一种新型宽带低剖面多层复合吸波体设计

李若笛 万国宾 魏梓晗 贾佳蓉 王梦瑶

Design of a novel broadband low-profile multilayer composite absorber LI Ruodi, WAN Guobin, WEI Zihan, JIA Jiarong, WANG Mengyao 在线阅读 View online: https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04344

CSCD收录期刊

Scopus收录期刊 JSTT收录期刊

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型宽带电阻膜吸波体设计

Design of novel broadband absorber based on resistive film 中国舰船研究. 2021, 16(2): 78-83 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01724

一种基于有源频率选择表面的可调吸波体特性分析

Performance analysis of a tunable absorber based on active frequency selective surface 中国舰船研究. 2020, 15(2): 36–41 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673–3185.01713

典型舱内爆炸载荷作用下吸能元件防护特性研究

Protective characteristics of energy absorbing elements under typical cabin explosion loads 中国舰船研究. 2024, 19(3): 182–192 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673–3185.03357

石墨烯材料在舰船强电磁防护技术中的应用

Application of graphene in strong electromagnetic protection technology for ships 中国舰船研究. 2020, 15(4): 1-8 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01662

声激励下圆柱壳敷设多孔吸声材料声辐射特性及计算方法

Characteristics and calculation method of sound radiation of cylindrical shell with porous sound-absorbing material under acoustic excitation

中国舰船研究. 2023, 18(2): 97-106 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02518

小水线面三体船耐波性数值模拟

Numerical simulation of seakeeping performance of a trimaran small waterplane area center hull 中国舰船研究. 2020, 15(4): 135–143, 152 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673–3185.01764



扫码关注微信公众号,获得更多资讯信息

Vol. 20 No. X xxx 2025

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, 2025, 20(X): 1-8. 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, 2025, 20(X): 1-8 (in Chinese).

一种新型宽带低剖面多层复合 吸波体设计



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θ**]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,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 0.068λ_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。为提高舰船的生命力和作战效能,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、工作频带宽以及强吸波效果^[13]。传统的索尔 兹伯里屏^[4]和乔曼吸波体^[5]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^[6]首次提出了完美超材料吸波 体(metamaterial absorber, MA)的概念。这种吸波 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^[7]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¹⁸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,实现了在 11.2~42.8 GHz 频率范围内的吸波率超过 90%。 与此同时,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¹⁹ 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 0.08λ, (λ 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

收稿日期: 2024-12-31 修回日期: 2025-02-08 网络首发时间: 20xx-xx-xx xx:xx 基金项目: 航空科学基金 (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

Bhardwaj 等^[10] 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 0.085λ,。该设计中没有使用金属背板 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¹¹¹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, 厚度仅有 0.075λ₁。吸波体的小型化设计也是降低剖面高度 的有效途径。例如,左伟庆等¹¹²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 0.071λ_L。Banadaki 等^[13]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 0.097λ₁。

传统方法大都采用"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,挖掘能够实现宽带低剖 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, 2024年2月, Li等¹⁴提出一 种基于色散操纵方法的可重构吸波体模型。该模 型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 种结构加载了较多的集总电阻和电感元件,并引 入了有源器件,导致其设计复杂度和加工难度较 高。在现有文献中,电感加载常用来抵消 PIN 二 极管产生的寄生电容效应¹¹⁵,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16,而 用于直接用于吸波体设计的文献则相对较少。

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,并对其进行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 [14] 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*(ω)可用式 (1)进 行计算, 式中 Γ(ω) 表示反射率。



图1 初始多层复合吸波体单元结构示意图



$$A(\omega) = 1 - \Gamma(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$$
(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 = 5nH, 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 $R_s = 200$ Ω/sq_o 绘制此时吸波体的吸波性能曲线如图 2 所 示。从图中可以看出,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%。

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 工作带宽以及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 d₁以及不同方片形电 阻膜单元外边长 d₂下的吸波性能,如图 3 所示。 从图 3(a)中可以看出,随着方环形导体单元外边 长 d₁的逐渐增大,最低工作频率逐渐向低频移动, 而当 d₁(= 8.5 mm) < d₂(= 9 mm)时, d₁ 对最低工作 频率的影响将被削弱,转而换为d₂占主导地位。 从图 3(b)中也可以看出,当 d₂ < d₁时,改变 d₂ 对



Fig. 2 The absorption performance of the initial multilayer composite absorber

最低工作频率影响不大,而当 d₂(=10.5 mm)> d₁(=10 mm)时, d₂ 对最低工作频率的影响将变为 主导地位,随着 d₂ 的进一步增大,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。





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_i。由等效电路理论还可以知道,方片 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片 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 层与金属地板可看作一段长度为 $h_1 = 6 \text{ mm}$ 的终 端短路传输线。当电路参数 $R = 210 \Omega$, C = 0.147pF, L = 5.09 nH, C_i = 0.042 pF, C_m=0.318 pF 时, 简 化后的等效电路和全波仿真结果如图 4(b)所示,



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 The simplified equivalent circuit model of the initial multilayer composite absorber and its comparison with the fullwave simulation results

从图中可以看出,二者吻合较好。

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)中的方片形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 mm,环宽 w_3 = 1.1 mm,方阻值 R_s = 58 Ω /sq,方环形导体单元外边长 d_1 = 9.1 mm。



(a) 方环形导体单元

(b) 方环形电阻膜单元



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。从图中可以看到,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 3.87~15.73 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 0.071λ_L 上升至 0.081λ_L。





Fig. 6 Reflection coefficients of multilayer composite absorbers under different resistive film unit

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, 的影响, 随 着 d₁ 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 工作频率主要受方环形导体单元环宽 w1 和方环 形电阻膜单元环宽 w₃ 的影响, 随着 w₁和 w₃ 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,的减小、环宽 w,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 d₁ 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 它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L1,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将略小为5.04 nH,干路电 容C将变小为0.107 pF,并联电容C,将保持不变 仍为 0.042 pF, 当其它电路参数 C_m = 0.117 pF, R = 232 Ω, L₁ = 3.01 nH 时, 等效电路与全波仿真结果 对比如图 8(b)所示。从图中可以看到,引入电感 L₁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 得吸波体工作频段的相对带宽得到拓展。

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





Fig. 7 Reflection coefficients of multilayer composite absorber with ring resistive film under different structural parameters

吸波体的剖面高度,应尽可能增大方环形导体单 元外边长 d₁ 以降低最低工作频率,同时需要保证



- 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 The simplified equivalent circuit model of the multilayer composite absorber with ring resistive film and its comparison with the full-wave simulation results

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 $R_s = 31$ $\Omega/sq, 加载的集总电感值 L = 4.5$ 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 rectangular ring 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。从图 中可以看到,对方环形导体单元进行小型化处理 后,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 *λ*_L 下降至 0.068*λ*_L,相对带宽更是进一步拓展 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 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,加之其它电路参数 L = 6.26nH, $C_j = 0.042$ pF, $C_m = 0.204$ pF, $R = 226 \Omega$, $L_1 =$ 1.95 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 conductor square ring multilayer composite absorber with 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 论

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了一种工作在 3.36~10.94 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 0.081λ_L下降至 0.068λ_L,此时其工作 频率范围为 3.22~14.63 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 吸波体与其它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 the performance of broadband lowprofile absorbers

参考文献	层数	工作频带 /GHz	相对带宽 /%	剖面高度/λ _L	T-BR
文献[9]	1	3~12	120	0.08	0.107
文献[10]	4	2~4.5	77	0.085	0.144
文献叫	准单层	2.24~11.40	134.3	0.078	0.098
文献[12]	1	0.8~2.7	108.5	0.071	0.1
文献[13]	1	1.35~3.5	88.6	0.097	0.158
文献[17]	3	1.14~14.2	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
 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). 第X期

- [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] 曾宪亮,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] FANTE R L, MCCORMACK M T. Reflection properties of the Salisbury screen[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1443–1454.
- [5] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [6] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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]** In light of the constraints associated with conventional wave-absorbing structures, a groundbreaking broadband low-profile multilayer composite absorber has been meticulously engineered. **[Method]** This innovative approach incorporates square ring resistive film units, which serve to significantly broaden the operational bandwidth. Additionally, it utilizes miniaturized conductor units that are predicated on lumped inductance loading principles, while also optimizing various structural parameters to realize broadband low-profile wave-absorbing capabilities. This optimization effectively contributes to a reduction in the minimum operational frequency. **[Results]** The simulation outcomes demonstrate that the developed composite absorber achieves an impressive electromagnetic wave absorption rate that surpasses 90% across the frequency spectrum ranging from 3.22 to 14.63 GHz. This performance is characterized by a remarkable relative bandwidth expansion of 127.8% and a profile height measuring a mere $0.068\lambda_L$. **[Conclusion]** The oper-

ational mechanism of the absorber is thoroughly examined through the application of an equivalent circuit model, and potential avenues for further optimization are delineated. This design offers substantial insights and serves as a significant reference point for the advancement of broadband low-profile absorbers. Future work will focus on substituting 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