

基于等离子体超材料局部场调控特性的 低频吸波材料设计方法

王振旭^{1,2}, 王甲富^{1,2}, 熊鑫蒙^{1,2}, 富新民^{1,2}, 丁畅^{1,2}, 韩亚娟^{1,2}, 孙杉³

(1. 空军工程大学基础部, 西安 710051; 2. 苏州实验室, 西安, 710051; 3. 93160 部队, 北京 100072)

摘要 实现低频段雷达波的高性能吸收, 通常需要增大磁性吸波材料(MAs)的厚度, 这无疑会增加吸波材料的重量, 制约实际应用潜能。对此, 本文我们提出了基于等离子体超材料(PM)调控传统磁性吸波材料内部磁场的方法, 利用金属短线调控磁场分布的特性, 通过增强其与底层金属底板之间整个局部空间的磁场强度, 在其中加入传统磁性吸波材料后, 就能有效提升传统磁性吸波材料的吸波性能, 进而使整体结构在其工作频段都具有较强的吸波性能。仿真和实验结果表明: 垂直入射时, 所设计的吸波超材料可在 0.9~2.2 GHz 频段内实现高效吸收, 入射角逐渐增大到 60°时, 90% 的吸收带宽仍可以达到 0.73~3.12 GHz。该设计方法在雷达隐身、电磁兼容和通信等领域都具有较大的潜在应用。

关键词 低频吸波; 等离子体超材料; 局部场调控

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.01.002

中图分类号 TN811; O441.4 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)01-0011-06

Absorption Enhancement of Low-Frequency Microwaves by Modulating Local Magnetic Fields using Plasmonic Metamaterials

WANG Zhenxu^{1,2}, WANG Jiafu^{1,2}, XIONG Xinmeng^{1,2}, FU Xinmin^{1,2}, DING Chang^{1,2},
HAN Yajuan^{1,2}, SUN Shan³

(1. Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Suzhou National Laboratory, Xi'an 710051, China; 3. Unit 93160, Beijing 100072, China)

Abstract In order to realize the absorption of radar waves in low-frequency band, the thickness of Magnetic Absorbers (MAs) or the weight is on the increase under normal conditions, and actual applied potentialities are restricted. For the above-mentioned reasons, this paper proposes a method based on Plasma Meta-material (PM) to regulate the internal magnetic field of conventional MAs. The short metal wires are utilized for enhancing the magnetic field distribution in the entire local space between it and the metal backboard, and the overall structure will have a stronger absorption after adding conventional MAs. The simulated results show that the proposed Plasma Meta-material Absorber (PMA) can achieve efficient absorption in the frequency band of 0.84~2.08 GHz at vertical incidence, and the bandwidth of -10 dB can still remain 0.7~2.95 GHz even at an incidence angle of 60°. This design method may find the potential

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U21A20428)

作者简介: 王振旭(1995—), 男, 河南周口人, 博士生, 研究方向为电磁超表面、吸波体。E-mail: wxz206@126.com

通信作者: 王甲富(1981—), 男, 山东聊城人, 教授, 博士生导师, 研究方向为超材料设计及应用。E-mail: wangjiafu1981@126.com

引用格式: 王振旭, 王甲富, 熊鑫蒙, 等. 基于等离子体超材料局部场调控特性的低频吸波材料设计方法[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(1): 11-16. WANG Zhenxu, WANG Jiafu, XIONG Xinmeng, et al. Absorption Enhancement of Low-Frequency Microwaves by Modulating Local Magnetic Fields using Plasmonic Metamaterials[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 11-16.

applications in the fields of electromagnetic compatibility, wireless communication, and so on.

Key words low-frequency wave absorption; plasma meta-materials; local field modulation

对于雷达隐身技术而言,雷达吸波技术的研究是近年来最热门的话题之一。作为一种重要而且高效的电磁隐身方法,雷达吸收材料不仅在军事领域,如电磁干扰屏蔽和降低雷达反射截面方面得到了广泛的应用^[1-3],而且在民用领域,如太阳能采集、生物传感、热光伏和光电探测等方面也得到了广泛应用^[4-8]。传统的雷达吸收材料,特别是磁性吸波材料(magnetic absorbers, MAs),一般由磁性金属或铁氧体纳米颗粒分散在聚合物基体中,以此来实现对电磁波的高效吸收,但这远远不能满足如今对低频段以及大角度吸收等指标的要求。

超材料是由结构单元周期/非周期阵列而成的人工结构功能材料,通过人为设计结构单元,可以实现一些天然材料不可能或很难实现的奇特物理现象和效果,包括负折射率^[9]、电磁波隐身^[10]、逆多普勒效应^[11]等。经过二十多年的发展,超材料已被广泛应用于许多领域,如超级透镜、隐形斗篷、完美吸收器等^[12-14]。对于雷达吸波材料领域,由于超材料的高效吸波和灵活设计,吸波超材料一直都是国内外的研究热点之一,在雷达隐身技术、图像传感、能量采集、热发射控制等许多举足轻重的领域得到了广泛应用^[15-17]。2008年,Landy等^[14]设计了一种超材料“完美吸波体”,通过在背有铜条的电介质衬底顶部使用开口谐振环,实现了特定频率下99%的超高吸收率。自此,吸波超材料开始得到广泛关注与研究。研究人员设计了多种具有“金属-介质基板-金属”构型的吸波超材料,可以实现窄带、双带和多频带吸波性能。该设计通过改变结构单元的几何参数即可灵活调节吸收频率以及吸收效率。然而,这种吸波超材料的带宽太窄,制约了其在雷达吸波领域的进一步发展与应用。对于如何实现宽带高性能吸波,研究者们想出了很多方法,并进行了大量的研究,包括集成多个谐振^[18],引入三维结构^[19]和利用人工表面等离激元(spoof surface plasmon polariton, SSPP)的色散调控^[20-21]。然而,制约吸波超材料应用的2个关键问题仍亟待解决。一是大入射角下,吸收性能恶化;二是低频吸收与低剖面、低重量之间存在矛盾制约。为了解决上述问题,学者们进行了大量的研究工作。文献[22]提出了一种带有折叠电阻片的三维结构吸波超材料,在3.6~11.4 GHz的频段内,可以实现在75°大入射角吸收。文献[23]提出了一个由非平面超材料和磁性微波吸收

材料组成的2层吸波超材料,在2~18 GHz范围内表现出90%的吸收率。如何将两者优势结合,设计不仅具有宽入射角吸收性能,而且在低频段性能优异的吸波超材料,同样具有重要的研究意义和广泛的应用前景。

本文提出了一种基于等离子体超材料调控传统磁性吸波材料内部磁场的方法,利用金属短线调控磁场分布的特性,通过增强其与底层金属底板之间整个局部空间的磁场强度,在其中加入传统磁性吸波材料后,就能有效提升传统磁性吸波材料的吸波性能,进而使整体结构在其工作频段都具有较强的吸波性能。仿真实验结果表明:垂直入射时,所设计的吸波超材料可在0.9~2.2 GHz频段内实现高效吸收,入射角逐渐增大到60°时,90%的吸收带宽仍可以达到0.73~3.12 GHz。该设计方法在雷达隐身、电磁兼容和通信等领域都具有较大的潜在应用价值。

1 原理分析

图1为该等离子体吸波超材料的工作原理示意图。根据法拉第电磁感应定律,当电磁波入射到吸波超材料时,在上层金属线阵列的作用下,入射磁场将围绕金属短线形成环形磁场。由于下层金属背板的存在和磁场的无源闭合特性,磁场将被局域在金属线阵列层和金属背板之间,因此,该处的磁场强度将得到显著增强。在此空隙处引入磁性吸波材料,结合磁性吸波材料的高磁损耗,就会实现高效的电磁吸波性能。适当调节金属线阵列层的几何参数,就能在低频段实现宽带,宽角域的吸收效果。

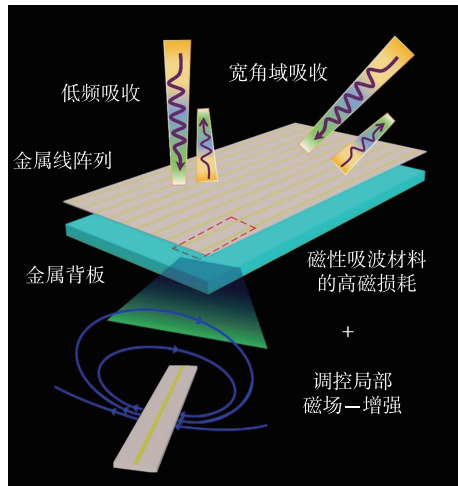


图1 原理示意图

2 等离子体吸波超材料的设计方法

2.1 传统磁性吸波材料的性能分析

图 2(a)为厚度 3.0 mm 的磁性吸波材料在 TM 极化波入射下,入射角为 60° 时的反射率曲线。图 2(b)为在 TM 极化波入射下,其入射角度从 0° 增加到 85° 时,该磁性吸波材料的反射率变化情况。在仿真时, x 轴和 y 轴方向设置为 unit cell,用来模拟仿真无限大尺寸的磁性吸波材料,同时,在 z 轴方向设置为 open add space。根据阻抗匹配原理,该磁性吸波材料的反射能量 $R(\omega)$ 和透射能量 $T(\omega)$ 可以由仿真所得的 S 参数得出:即 $R(\omega) = |S_{11}|^2$, $T(\omega) = |S_{21}|^2$,从而可以得到吸收能量的表达式为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 。因为底层金属背板的存在,透射能量 $T(\omega)$ 将在整个频段范围内等于 0,因此吸收能量的表达式可以简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$,本文通过仿真得到的 S_{11} 曲线分析该材料的吸波性能。由图 2(b)可知,只有在特定的角度范围($62^\circ \sim 73^\circ$)和很窄的频带范围(1.1~1.9 GHz)内,该磁性吸波材料的反射率才能达到 -9 dB。由此可以看出,单一的磁性吸波材料很难满足在实际应用中对吸收带宽、工作角域以及吸收效率的要求。

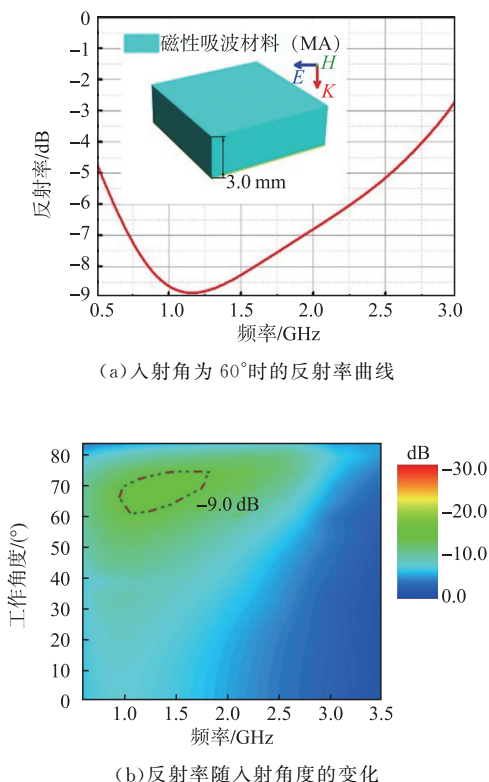


图 2 磁性吸波材料及其 TM 极化波入射时反射率和随入射角度变化情况

2.2 等离子体吸波超材料结构单元设计

根据第 2.1 节对磁性吸波材料的吸收性能的分析可以发现,在实际应用中,仅磁性吸波材料本身是很难满足吸收带宽、工作角域以及吸收效率的要求的。因此,本文利用超材料的设计理念,设计相应的亚波长结构,并结合磁性吸波材料自身固有性能,以提高整体结构的吸收效率、拓展整体结构的吸收带宽以及工作角域。

图 3 为设计的等离子体吸波超材料的单元结构示意图,可以看出,整体结构分为 4 层,其中,最上层为刻蚀在 FR-4 介质(相对介电常数 4.3,损耗角正切 0.025)上的金属线结构,最下层为金属背板,中间是空气间隙和磁性吸波材料层。优化之后的结构参数如下: $P_x = 32$ mm, $P_y = 2.5$ mm, $d_1 = 3$ mm, $d_2 = 6$ mm, $l = 30.8$ mm, $w = 0.4$ mm。

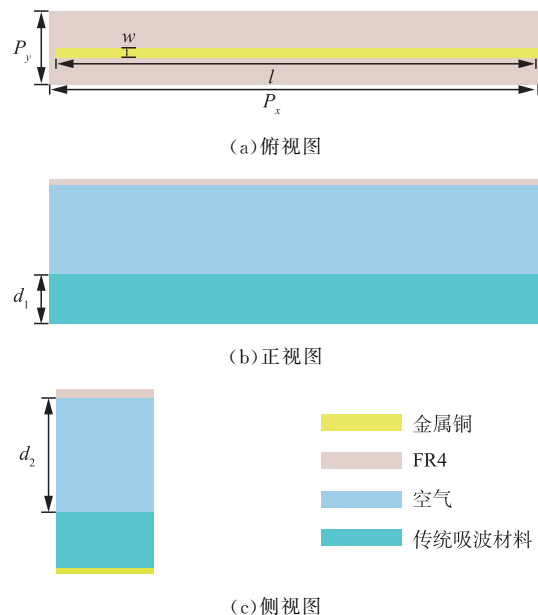


图 3 设计的等离子体吸波超材料的单元结构示意图

接下来使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2018 对该结构进行仿真。图 4(a)和图 4(b)分别为 TM 极化波入射下,垂直入射和入射角为 60° 时,磁性吸波材料与设计的吸波超材料的反射率曲线对比,其中蓝色虚线为磁性吸波材料的反射率曲线,红色实线为设计的吸波超材料的反射率曲线。通过对比可以看出,磁性吸波材料加载金属线结构之后,整体结构的吸收性能得到了很大程度的提升:当垂直入射时,反射率大于 -10 dB 的带宽拓展至 0.9~2.2 GHz;当入射角度为 60° 时,吸收率超过 90% 的带宽拓展至 0.73~3.12 GHz,此时在 1.9 GHz 时,甚至达到了 -38.3 dB。

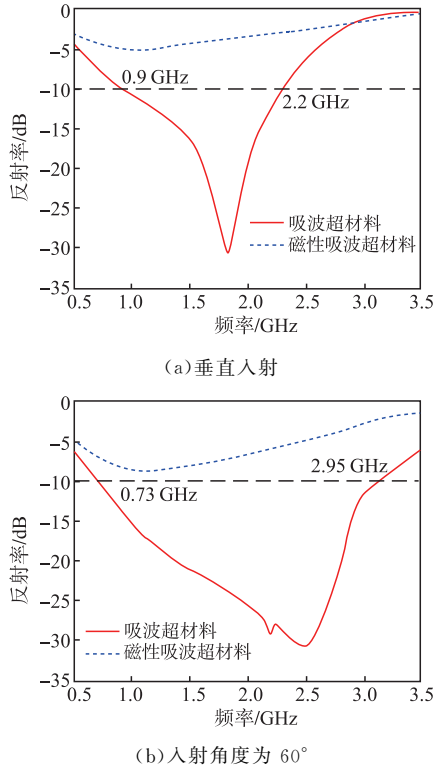


图4 TM极化波入射下,磁性吸波材料(MA)和等离子体吸波超材料(PMA)的反射率曲线对比

图5为设计的等离子体吸波超材料的反射率随入射角度增加而变化的仿真结果。相较于图2(b)的传统磁性吸波超材料的变化,等离子体吸波超材料的吸波效率明显增强,工作角域也得到大大拓展。

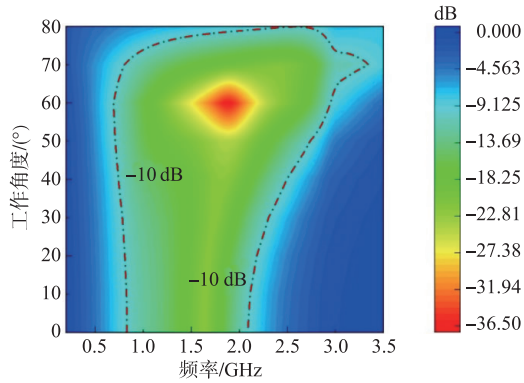


图5 设计的等离子体吸波超材料反射率随角度增加而变化的仿真结果

此外,针对TE极化下的吸波性能做简要分析。图6(a)和图6(b)分别是TE极化波入射下,垂直入射和入射角为 60° 时,磁性吸波材料与设计的吸波超材料的反射率曲线对比,其中蓝色虚线为磁性吸波材料的反射率曲线,红色实线为设计的吸波超材料的反射率曲线。可以看出,当TE极化波入射时,入射电场方向与上层金属线垂直,由于在该方向,金属线的几何尺寸过小,不能有效激发表面电流,因此两者的吸波性能几乎相同。

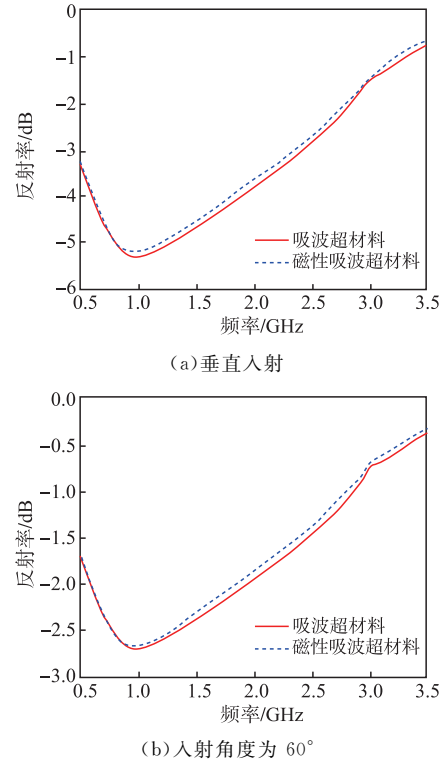


图6 TE极化波入射下,等离子体吸波超材料(PMA)和磁性吸波材料(MA)的反射率曲线对比

2.3 等离子体吸波超材料仿真结果分析

由上述分析可知,虽然磁性吸波材料本身有一定程度的损耗,但受到材料厚度、重量等限制,仅仅使用单一磁性吸波材料,其吸收性能并不能达到理想的效果。而对于损耗介质,其对电磁波的吸收可以表示为:

$$P_{\text{total}} = P_E + P_M = (1/2)\omega\epsilon''|E|^2 + (1/2)\omega\mu''|H|^2 \quad (1)$$

式中: ω 为角频率; E 为总的电场强度; H 为总的磁场强度; ϵ'' 为介电常数的虚部, μ'' 为磁导率的虚部。由式(1)可以看出,当材料本身已经确定时,提高其所处位置的电场强度或者磁场强度,可以进一步提高其吸收效率。本文使用的磁性吸波材料,其损耗主要是源于对电磁波的磁损耗,所以利用超材料结构单元调控甚至增强吸波材料所处位置的磁场强度,就可以进一步提高整体结构的吸收性能。

当电磁波垂直入射到所设计的等离子体吸波超材料上时,电场沿着金属线方向,将会激发沿着金属线方向的表面电流,磁场则垂直于金属线方向。由于磁场是一个有源场,因此在金属线的调控下,将围绕金属线形成环形磁场。同时,由于金属背板的存在,将会把磁场局域在金属线结构和金属背板之间,从而增强此处的磁场强度。为了验证以上的设计理念,通过使用CST仿真软件,分别监视了0.5 GHz和1.5 GHz处的表面电流分布和磁场分布,结果如图7所示。可以很明显地看出,由于入射的电场沿着金属线

方向,不论是在工作频带外(0.5 GHz)还是在工作频带内(1.5 GHz),都会激发沿着金属线方向的表面电流,只是在工作频段外即 0.5 GHz 时,所激发的表面电流较弱,与之相对应,图 7(a)和图 7(c)分别为 0.5 GHz 时的表面电流和磁场分布,可以看出,此时磁场在整个空间内呈现比较均匀的分布,即此时金属线几乎没有起到对磁场的调控作用;如图 7(b)和图 7(d)分别为 1.5 GHz 时的表面电流和磁场分布,可以看出,在工作频带内,入射的电磁场在金属线表面激发了较强的表面电流,而且由于金属线和金属背板的存在,使得磁力线被局域到了两者之间,使得此处的磁场强度得到了明显的增强,与我们的设计理念相符合。

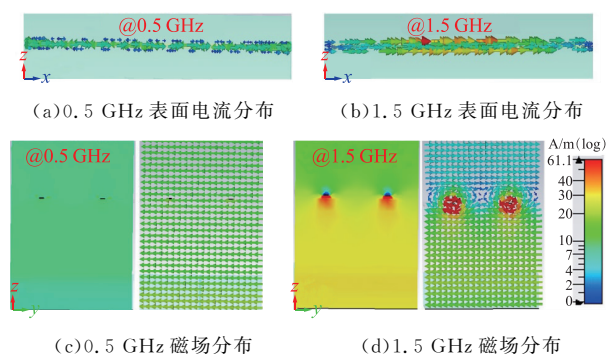


图7 设计的等离子体超材料表面电流和磁场分布

3 实验验证

为验证设计的等离子体吸波超材料的吸收性能,利用印刷电路板工艺,加工制备了尺寸为 $640\text{ mm} \times 640\text{ mm}^2$ 实验样品,如图 8 所示,样品从上到下依次是:刻蚀有金属线的 FR4 介质、厚度为 6.0 mm 的 PMI 泡沫层,厚度为 3.0 mm 的磁性吸波材料层以及金属背板,并在微波暗室里对其进行测试。受限于标准增益喇叭天线的工作频带,起始测试频率为 1.0 GHz。垂直入射和斜入射 60° 时的测试结果与仿真结果的对比图 9 所示。其中黑色曲线代表仿真结果,红色曲线代表测试结果,显然,仿真结果和测试结果的趋势比较吻合,但由于加工、测试等不确定性因素的影响,仿真和测试的结果略微有点差异,但误差是在可以接受范围内的,同时,这也验证了我们设计方法的正确性。

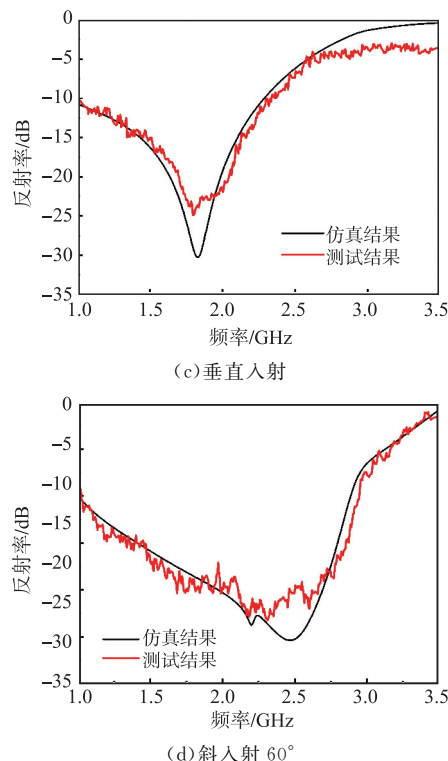
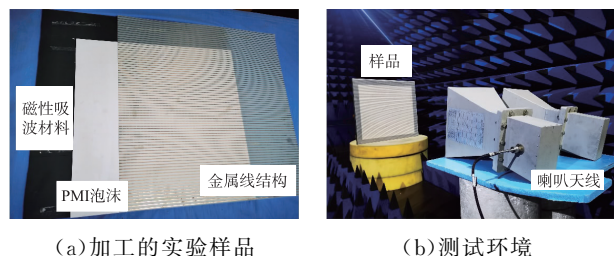


图8 不同角度反射率仿真及测试结果对比

4 结语

本文提出了基于等离子体超材料调控传统磁性吸波材料内部磁场的方法,利用金属短线调控磁场分布的特性,通过增强其与底层金属底板之间整个局部空间的磁场强度,在其中加入传统磁性吸波材料后,就能有效提升传统磁性吸波材料的吸波性能,进而使整体结构在其工作频段都具有较强的吸波性能。仿真和实验结果表明,垂直入射时,所设计的吸波超材料可在 0.9~2.2 GHz 频段内实现高效吸收,入射角逐渐增大到 60° 时,90% 的吸收带宽仍可以达到 0.73~3.12 GHz。该设计方法在雷达隐身、电磁兼容和通信等领域都具有较大的潜在应用。

参考文献

- [1] LIU Z F, BAI G, HUANG Y, et al. Reflection and Absorption Contributions to the Electromagnetic Interference Shielding of Single-Walled Carbon Nanotube/Polyurethane Composites [J]. Carbon, 2007, 45(4): 821-827.
- [2] IWASZCZUK K, STRIKWERDA A C, FAN K B, et al. Flexible Metamaterial Absorbers for Stealth Applications at Terahertz Frequencies [J]. Optics Express, 2012, 20(1): 635-643.
- [3] LIU T, CAO X Y, GAO J, et al. RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna with Metamaterial Absorber [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propaga-

- tion, 2013, 61(3): 1479-1484.
- [4] HAO J M, WANG J, LIU X L, et al. High Performance Optical Absorber Based on a Plasmonic Metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(25): 251104.
 - [5] REINHARD B, SCHMITT K M, WOLLRAB V, et al. Metamaterial Near-Field Sensor for Deep-Sub-wavelength Thickness Measurements and Sensitive Refractometry in the Terahertz Frequency Range [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(22): 221101.
 - [6] YONG Z D, ZHANG S L, GONG C S, et al. Narrow Band Perfect Absorber for Maximum Localized Magnetic and Electric Field Enhancement and Sensing Applications [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24063.
 - [7] WU C, NEUNER B, JOHN J, et al. Metamaterial-Based Integrated Plasmonic Absorber/Emitter for Solar Thermo-Photovoltaic Systems [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(2): 024005.
 - [8] SHREKENHAMER D, XU W R, VENKATESH S, et al. Experimental Realization of a Metamaterial Detector Focal Plane Array [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(17): 177401.
 - [9] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
 - [10] CHEN H S, WU B I, ZHANG B L, et al. Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(6): 063903.
 - [11] SEDDON N, BEARPARK T. Observation of the Inverse Doppler Effect [J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1537-1540.
 - [12] FANG N, ZHANG X. Imaging Properties of a Metamaterial Superlens [C]//*Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Nanotechnology*. Washington D C: IEEE, 2002: 225-228.
 - [13] MA H F, CUI T J. Three-Dimensional Broadband Ground-Plane Cloak Made of Metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 21.
 - [14] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
 - [15] IWASZCZUK K, STRIKWERDA A C, FAN K B, et al. Flexible Metamaterial Absorbers for Stealth Applications at Terahertz Frequencies [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 635-643.
 - [16] HUNT J, GOLLUB J, DRISCOLL T, et al. Metamaterial Microwave Holographic Imaging System [J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2014, 31(10): 2109-2119.
 - [17] MASON J A, SMITH S, WASSERMAN D. Strong Absorption and Selective Thermal Emission from a Midinfrared Metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(24): 241105.
 - [18] LI H, YUAN L H, ZHOU B, et al. Ultrathin Multiband Gigahertz Metamaterial Absorbers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 14909.
 - [19] WEN D E, YANG H L, YE Q W, et al. Broadband Metamaterial Absorber Based on a Multi-Layer Structure [J]. *Physica Scripta*, 2013, 88(1): 015402.
 - [20] SHEN Y, ZHANG J Q, MENG Y Y, et al. Merging Absorption Bands of Plasmonic Structures via Dispersion Engineering [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(25): 254103.
 - [21] SHEN Y, ZHANG J Q, WANG W J, et al. Integrating Absorber with Non-Planar Plasmonic Structure for k-Vector Matching Absorption Enhancement [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(22): 225101.
 - [22] SHEN Y, PANG Y Q, WANG J F, et al. Origami-Inspired Metamaterial Absorbers for Improving the Larger-Incident Angle Absorption [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2015, 48(44): 445008.
 - [23] LI W, WU T L, WANG W, et al. Integrating Non-Planar Metamaterials with Magnetic Absorbing Materials to Yield Ultra-Broadband Microwave Hybrid Absorbers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(2): 022903.
 - [24] 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.
 - [25] XIE J W, QUADER S, XIAO F J, et al. Truly All-Dielectric Ultrabroadband Metamaterial Absorber: Water-Based and Ground-Free [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(3): 536-540.
 - [26] SHEN Y, PANG Y Q, WANG J F, et al. Origami-Inspired Metamaterial Absorbers for Improving the Larger-Incident Angle Absorption [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2015, 48(44): 445008.
 - [27] SHI T, JIN L, HAN L, et al. Dispersion-Engineered, Broadband, Wide-Angle, Polarization-Independent Microwave Metamaterial Absorber [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 229-238.

(编辑:徐楠楠)