



有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体

冯奎胜 李娜 李桐

Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid incorporation of active devices

Feng Kui-Sheng Li Na Li Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 034101 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211254

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211254>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种编码式低雷达散射截面超表面天线阵列设计

A coding metasurface antenna array with low radar cross section

物理学报. 2020, 69(24): 244101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200978>

电磁超构表面与天线结构一体化的低RCS阵列

A novel low-RCS antenna array based on integration of electromagnetic metasurface and conventional antenna

物理学报. 2021, 70(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210746>

基于声学超材料的低频可调吸收器

A kind of tunable acoustic metamaterial for low frequency absorption

物理学报. 2019, 68(3): 034301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181908>

基于半导体光纤环形腔激光器的全光广播式超宽带信号源

All-optical broadcast ultra-wideband signal source based on semiconductor fiber ring laser

物理学报. 2019, 68(14): 140401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182301>

基于电路模拟吸收体的宽带吸波型频率选择表面设计

A novel wideband absorptive frequency selective surface based on circuit analog absorber

物理学报. 2020, 69(19): 198101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200641>

基于方形开口环的超宽带线性极化转换器

Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring

物理学报. 2019, 68(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190267>

有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体*

冯奎胜¹⁾²⁾ 李娜¹⁾²⁾ 李桐^{2)†}

1) (阳光学院人工智能学院, 福州 350015)

2) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2021 年 7 月 5 日收到; 2021 年 9 月 27 日收到修改稿)

结构型雷达吸波材料不仅可以有效吸收雷达波, 还能同时承受载荷, 在雷达隐身领域具有重要应用. 基于超表面的结构型雷达吸波材料可以实现对雷达波近乎“完美”的吸收, 且具有结构轻薄的特点, 但其限制在于吸波带宽通常较窄. 针对该问题, 提出一种拓宽超表面吸波体工作带宽的新方法. 该方法利用可重构的思想, 通过在超表面中混合集成变容二极管和开关二极管, 将吸波频率的连续可调与离散搬移有机结合, 以此展宽吸波体的有效吸波带宽. 基于该方法, 设计了一款超宽带可调超表面吸波体, 并深入分析了其吸波机理, 通过开关二极管和变容二极管工作状态的调节与配合, 在 4.57—8.51 GHz 内实现了高效可调吸波. 实测结果验证了该吸波体的低雷达散射截面特性, 证实了设计方法的有效性. 所提出的宽带可调设计方法简单可行, 还可以拓展应用到其他类型的宽带微波器件设计.

关键词: 超表面吸波体, 宽带, 可调, 低雷达散射截面**PACS:** 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf**DOI:** 10.7498/aps.71.20211254

1 引言

电磁超表面是一种新兴的人工电磁结构, 它通过精心的微结构设计及特殊的空间序构排列, 可以突破常规材料的电磁特性, 实现对电磁波幅度、相位以及极化等性能的定制调控^[1–6]. 其中, 利用超表面的幅度调控特性可以实现对雷达波的强吸收, 进而减缩目标的雷达散射截面 (radar cross section, RCS)^[7–9], 实现目标对敌方探测雷达的隐身. 与经典涂覆型和传统结构型吸波材料相比, 超表面吸波体具有剖面低、重量轻、无表面损耗层、可用于辐射结构周围且能承受一定载荷等突出优点, 因此, 其在机身、天线等各类目标的雷达隐身领域具有非常广泛的用途. 2008 年, Landy 等^[10]首次设计了一种超表面完美吸波体, 在很窄的频带内以接近

100% 的吸收率实现了对雷达波的吸收. 自此, 关于超表面吸波体的研究迅速进入热潮, 大量优秀的研究成果不断涌现, 多频带、宽频带、不同频段的超表面吸波体相继被报道^[11–14].

值得关注的是, 吸波带宽、吸波率以及剖面厚度是超表面吸波体设计中需要重点考虑的 3 个关键因素, 三者密切相关且往往相互制约, 如何平衡好三者之间的关系是设计高性能吸波体的难点. 在无源超表面吸波体设计中, 基于多层级联结构^[15–17]、分形结构^[18–20]、集总元件加载^[21–23]及阻性材料^[14,24]的吸波体, 在提升吸波带宽方面卓有成效. 然而, 无源吸波体在低剖面结构下能够实现的工作带宽有限, 且一旦加工完成, 其工作性能也就随之固定. 另一方面, 可重构技术的出现为展宽吸波体的工作带宽提供了一种新思路^[25]. 通过在结构中加载可调元器件^[26–31], 吸波体的工作频段能够根据需要

* 国家自然科学基金 (批准号: 61701523, 61801508)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2020JM-350, 20210110, 20200108, 2020022)、博士后创新基金 (批准号: BX20180375, 2019M653960) 和大学生创新创业训练计划 (批准号: 202113468002, S202113468012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tongli8811@sina.com

实现动态可调, 因此无需增大剖面高度即可实现宽带工作, 并且在每个频点均能保证极高的吸波率. 基于该思路, 文献 [32] 在单元结构中加载 PIN 开关二极管, 通过控制二极管的通断, 实现了在两个吸波频段的高效吸波; 文献 [33] 则通过变容二极管的加载, 实现了吸波频率的连续可调. 总结以上研究现状可以看出, 目前实现可重构吸波性能的主要方法是加载单一类型有源器件, 实现的吸波带宽也较为有限. 能否将不同类型的有源器件混合集成于超表面单元, 以怎样的结构样式和工作模式才能进一步拓宽吸波频段非常值得研究.

针对上述问题, 通过等效电路模型分析, 本文提出一种混合集成有源器件拓宽吸波体工作带宽的新方法. 该方法在单元结构中同时加载变容二极管和开关二极管, 将工作频率的连续可调与离散搬移结合起来, 利用组合工作的思想实现吸波频率的超宽带连续可调. 基于所提出的方法, 设计了一款超宽带可调超表面吸波体, 阐述了其吸波机理, 并通过实验验证了设计方法的有效性.

2 宽带可调设计方法

传统的无源超表面吸波体多为电磁谐振结构, 当吸波体的表面阻抗和自由空间匹配时, 结合适当的损耗即可实现电磁能量的高效吸收, 这一机理决定了其吸波带宽较窄. 本文从等效电路分析入手, 研究吸波体工作频率宽带可调的方法. 图 1(a) 和图 1(b) 为经典的方形超表面吸波单元, 其可等效为一个并联 RLC 谐振电路 [34], 如图 1(c) 所示. 其中 L_p 为上表面贴片的等效电感、 C_p 为贴片单元间的耦合电容、 R_s 为介质基板损耗电阻、 L_g 为下表面接地板的等效电感. 该结构的表面阻抗 Z 可以表示为

$$Z(\omega) = j\omega L_g // R_s // \left(j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} \right) \\ = \frac{j\omega L_g (1 - \omega^2 L_p C_p) R_s}{R_s [1 - \omega^2 (L_p + L_g) C_p] + j\omega L_g (1 - \omega^2 L_p C_p)}, \quad (1)$$

式中 $//$ 代表阻抗并联. 当该结构谐振时, 阻抗 Z 等效为纯电阻, 且阻值约等于自由空间波阻抗 (377Ω), 此时谐振工作频率为

$$f_0 = 1 / \sqrt{2\pi \sqrt{(L_p + L_g) C_p}}, \quad (2)$$

从 (2) 式可以看出, 通过改变单元结构的等效电感

或等效电容, 且电感和电容的变化足够大时, 可以有效调节吸波体的工作频率. 为此, 在单元结构中串联变容二极管, 如图 2 所示, 其中 C_v 为变容二极管的等效电容, 此时对应的谐振频率为

$$f_0 = 1 / \left[2\pi \sqrt{(L_p + L_g) C_p C_v / (C_p + C_v)} \right]. \quad (3)$$

由此可知, 改变变容二极管容值 C_v 的大小, 可以连续调节吸波体的工作频率. 但当吸波体结构固定后, 很难在很宽的频带内确保其和自由空间阻抗都匹配. 这导致集成变容二极管后连续可调的吸波带宽往往有限. 为了进一步拓展吸波带宽, 本文提出在结构中同时集成变容和开关二极管, 得到如图 3(a) 所示的结构. 开关二极管导通时近似等效为一个小电阻 R_d , 此时整个超表面吸波单元的等效电路如图 3(b) 所示. 从该电路图可以计算出导通状态下的谐振频率为

$$f_{on} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{p1} + L_{p2} + L_{p3} + L_g) C_p C_v / (C_p + C_v)}}. \quad (4)$$

另一方面, 当开关二极管断开时近似等效为一个电容 C_d , 此时超表面吸波单元的等效电路如图 3(c) 所示. 从该电路图可以计算出断开状态下的谐振频率

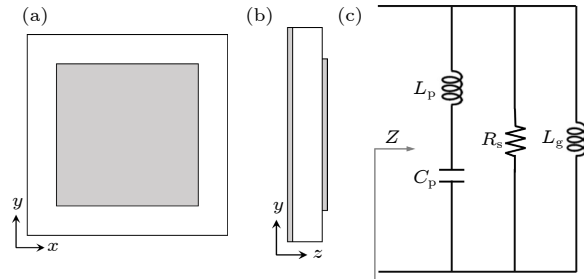


图 1 方形无源超表面单元 (a) 结构俯视图; (b) 结构侧视图; (c) 等效电路模型

Fig. 1. Square-shaped passive metasurface absorber: (a) Top view; (b) side view; (c) equivalent circuit model.

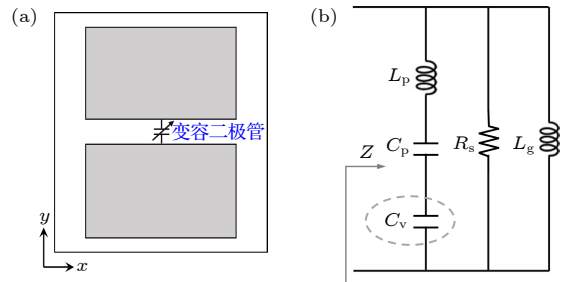


图 2 频率可调超表面单元 (a) 结构图; (b) 等效电路模型

Fig. 2. Frequency tunable metasurface absorber: (a) Configuration; (b) equivalent circuit model.

率为

$$f_{\text{off}} = \left[2\pi \sqrt{\frac{(L_{p1} + L_{p2} + L_g)C_p C_v C_d}{C_p C_v + C_v C_d + C_d C_p}} \right]^{-1}. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可知,通过控制开关二极管的通断,可以使吸波体工作在两种完全不同的状态,实现工作频率的大范围离散调控;而进一步控制变容二极管的电容值 C_v ,则可以在每种状态下实现工

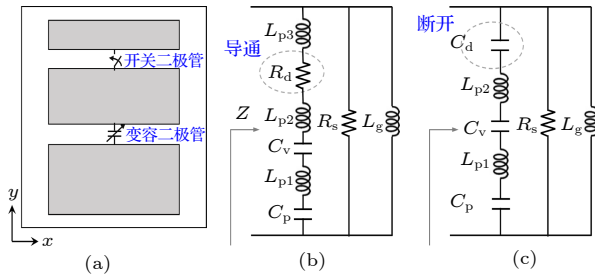


图3 超宽带可调超表面单元 (a) 结构图; (b) 开关导通及 (c) 断开时的等效电路模型

Fig. 3. Ultra-wideband active metasurface absorber (AMSA): (a) Configuration; (b), (c) equivalent circuit model of PIN diode at ON state (b) and OFF state (c).

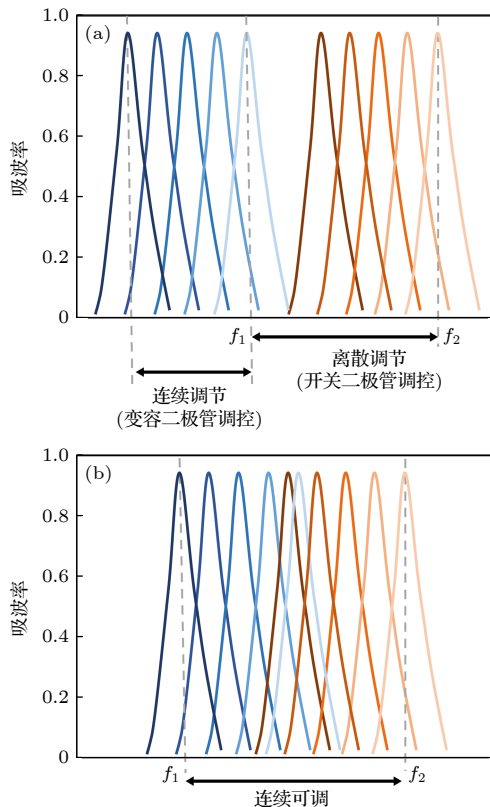


图4 宽带可调吸波示意图 (a) 分段可调吸波; (b) 超宽带可调吸波

Fig. 4. Design concept of the ultra-wideband tunability: (a) Separate tunable absorbing band; (b) ultra-wideband tunable absorbing band.

作频率的小范围连续可调,如图4(a)所示.若结构设计合理,通过开关二极管的通断调控和变容二极管的连续调节,有望将两段吸波频带连接在一起,从而实现超宽频带吸波,如图4(b)所示.

3 超宽带可调超表面吸波体仿真与分析

3.1 超宽带可调超表面吸波体设计

为了验证上述设计方法的有效性,结合C频段雷达隐身的应用需求,提出了如图5所示的超宽带可调超表面吸波体单元.介质基板采用高损耗FR4板材,相对介电常数为4.4,损耗角正切为0.02,厚度为0.5 mm.基板下表面为完整的金属地,上表面结构包含两个矩形金属贴片和1个梯形金属贴片,3个贴片之间用1个变容二极管和1个开关二极管串联.变容二极管近似集成在上表面贴片的中央电流最强处,以实现有效的频率调控.开关二极管集成在边缘一侧,以确保通/断时吸波频段连续可调.根据C频段的设计目标,结合全波数值仿真,优化后得到的单元结构参数 $p, h, w_1, w_2, w_3, l_1, l_2, l_3$ 分别为11 mm, 0.5 mm, 4 mm, 4 mm, 6 mm, 4 mm, 3.5 mm, 1.8 mm.此外,为了方便给二极管直流馈电,每个金属贴片都连接有宽度为0.15 mm的高阻抗偏置线,连接直流源后可以给二极管提供偏置电压.

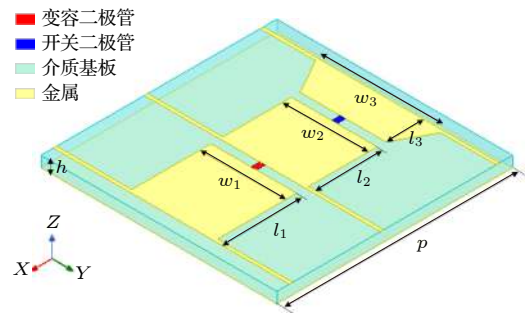


图5 宽带可调吸波超表面单元

Fig. 5. Unit cell of the proposed ultra-wideband AMSA.

利用高频电磁仿真软件HFSS中的周期边界条件,仿真得到了该结构在两种二极管处于不同工作状态下的吸波率,结果如图6所示.从图6(a)可以看出,当开关二极管断开时,梯形贴片几乎不参与谐振,此时将变容二极管容值从0.71 pF增大到10.23 pF时,吸波峰值对应的频率从8.51 GHz连

续下降到 5.85 GHz; 而当开关二极管导通时, 整个单元的金属贴片结构均参与工作, 此时通过调节变容二极管的容值, 吸波峰值对应的频率调节范围下移到 4.57—6.05 GHz. 综合开关二极管通/断两种状态下的吸波性能, 所设计的超表面吸波体在 4.57—8.51 GHz 的范围内实现了连续可调吸波, 吸波率大于 80% 的带宽达到 60%. 图 6(b) 展示了雷达波从不同角度入射时的吸波率曲线, 可以看出, 当入射角小于 60° 时, 吸波率几乎不受影响. 这些结果表明: 所设计的超表面吸波体不仅实现了超宽带高效吸波, 且吸波性能在宽入射角内都有良好稳定性.

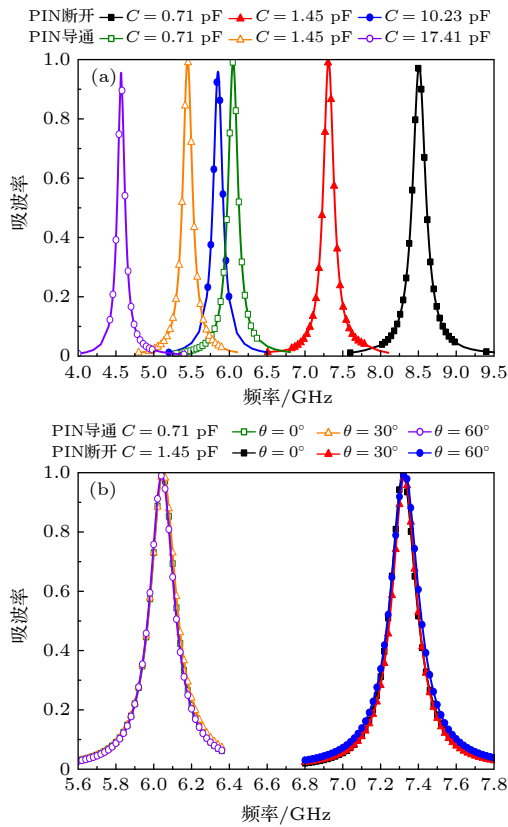


图 6 开关二极管不同工作状态下吸波率随变容管容值的变化 (a) 垂直入射; (b) 斜入射
Fig. 6. Simulated absorptivity vs. varactor capacitance values for different diode states: (a) Under normal incidence; (b) under oblique incidence.

3.2 吸波机理分析

无表面损耗层的超表面吸波体实现对雷达波的强吸收需要满足两个条件: 一是能量无反射/透射, 所有能量都被集中束缚在介质基板内部; 二是介质基板有损耗, 被束缚的能量能够被有效转化为热能损耗掉. 根据反射率的计算公式:

$$R = \frac{(\operatorname{Re}(Z) - \eta_0)^2 + (\operatorname{Im}(Z))^2}{(\operatorname{Re}(Z) + \eta_0)^2 + (\operatorname{Im}(Z))^2}, \quad (6)$$

可知, 当吸波体阻抗的实部等于自由空间波阻抗 η_0 , 且虚部为 0 时, 反射率 $R = 0$, 而超表面的下表面为金属底板时, 雷达波无法透射, 此时所有能量都将被束缚在介质板内部, 并转化为热能损耗掉, 即实现了对电磁波的完美吸收.

为了证实上述理论, 仿真了吸波体性能随介质基板厚度和损耗角正切的变化, 如图 7 和图 8 所示. 由图 7(a) 可知, 介质基板的损耗不变时, 基板厚度的变化由于会显著影响超表面结构自身的等

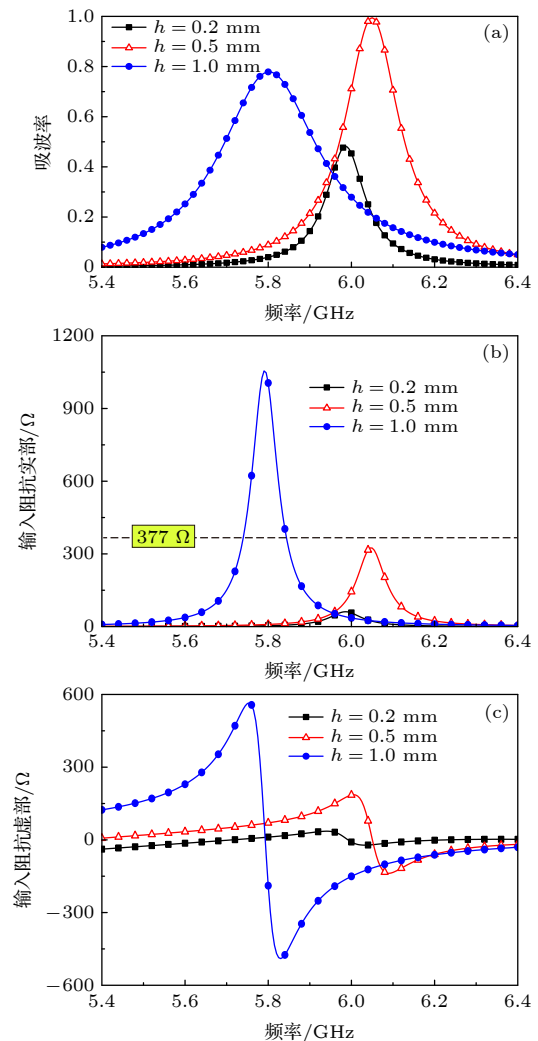


图 7 吸波体性能随介质基板厚度的变化 (PIN 导通, $C = 0.71$ pF, $\tan\delta = 0.02$) (a) 吸波率; (b) 表面阻抗实部; (c) 表面阻抗虚部

Fig. 7. Simulated performance of the proposed ultra-wideband AMSA with different substrate thicknesses (PIN diode at ON state, $C = 0.71$ pF, $\tan\delta = 0.02$): (a) Absorptivity; (b) real part of surface impedance; (c) imaginary part of surface impedance.

效 L_g , C_p , 导致吸波频率和吸波峰值都发生了明显变化. 进一步地, 图 7(b) 和图 7(c) 给出了图 7(a) 对应的表面阻抗, 可以看出当基板厚度 $h = 0.5$ mm 时, 在谐振频点 6.05 GHz 处, 吸波体的输入阻抗实部约等于自由空间波阻抗 377Ω , 虚部约等于 0, 实现了能量无反射/透射, 此时计算出来的吸波率为 99%, 实现了对入射雷达波的完美吸收; 而当厚度大于或者小于 0.5 mm 时, 阻抗都会出现不同程度的失配, 部分能量被反射, 引起吸波率的下降. 因此, 想要实现高吸波率, 首先要确保吸波体的表面阻抗和自由空间波阻抗匹配. 另一方面, 被束缚的能量要依靠有耗介质基板才能被损耗, 因此基板的损耗对吸波率也有至关重要的影响. 图 8(a) 给出了介质基板不同损耗角正切下的吸波率曲线, 可以明显看出, 损耗角正切越大, 吸波率也越大, 而当损耗角正切减小时, 吸波率峰值快速下降. 从图 8(b) 中的功率损耗密度也能看出, 损耗角越大, 能量消耗越多, 吸波率也越高.

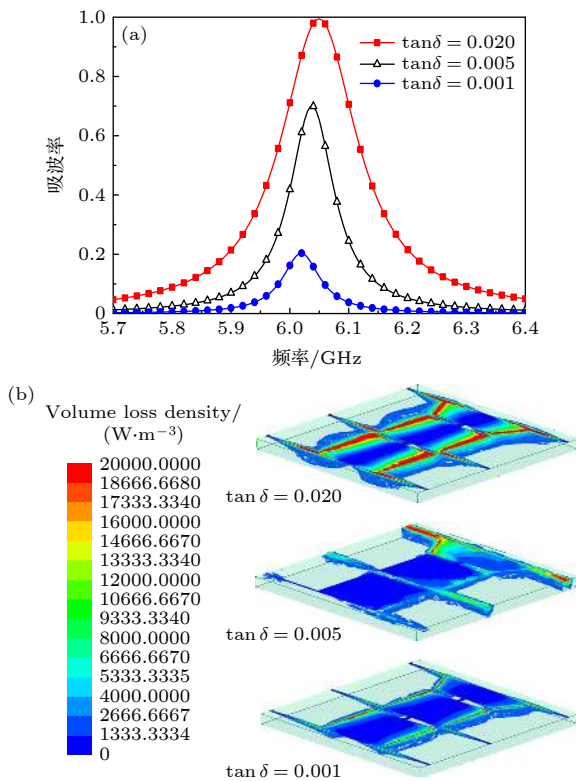


图 8 吸波体性能随介质基板损耗角正切的变化 (PIN 导通, $C = 0.71$ pF, $h = 0.5$ mm) (a) 吸波率; (b) 吸波峰值处的体功率损耗密度

Fig. 8. Simulated performance of the proposed ultra-wideband AMSA with different substrate losses (PIN diode at ON state, $C = 0.71$ pF, $h = 0.5$ mm): (a) Absorptivity; (b) volume loss density at absorption peak.

4 实验验证

吸波率测试多采用波导法, 即将有限个单元放置在波导腔内进行测试. 该方法的特点是: 精度高、受空间环境影响小, 但要求单元周期和波导口的尺寸要匹配. 受上述吸波单元尺寸的限制, 这里采用一种间接验证吸波率的方法, 即通过空间波法测试 RCS 减缩效果^[35], 验证仿真设计的正确性. 将上述设计的吸波体单元排列成 10×10 的阵面并进行加工, 加工样件如图 9(a) 所示, 整体尺寸

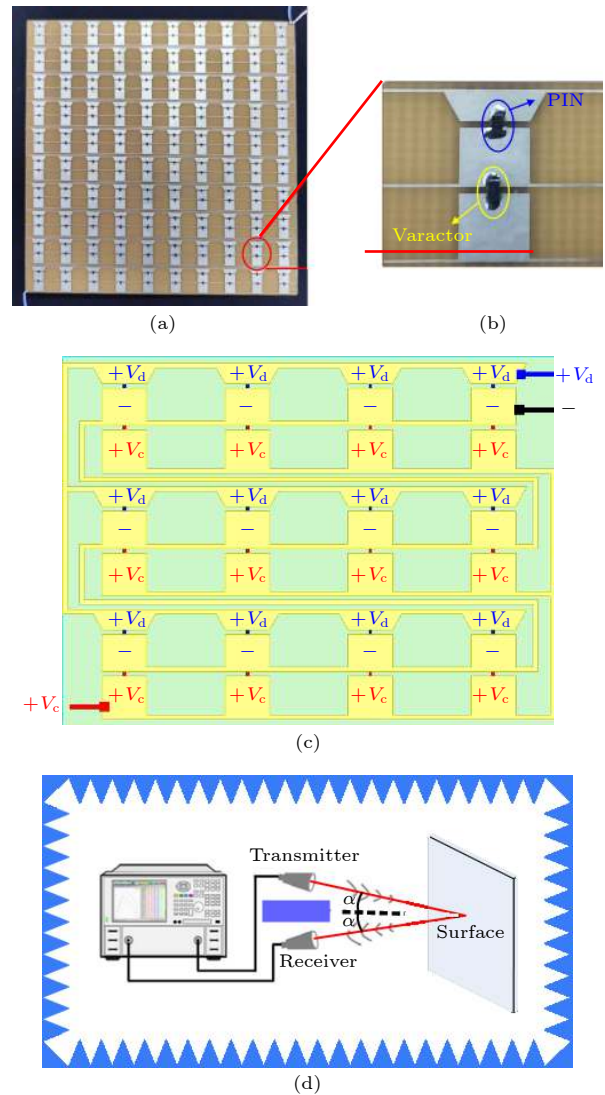


图 9 宽带可调超表面吸波体实物及测试装置 (a) 10×10 阵面照片; (b) 单元结构放大图; (c) 直流馈电电路示意图; (d) 测试装置

Fig. 9. Fabricated ultra-wideband AMSA and the measurement setup: (a) Photo of 10×10 sample; (b) magnified picture of the unit cell; (c) schematic diagram of the biasing circuit; (d) measurement setup.

为 $110\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$. 图 9(b) 为单元放大图, 每个单元上焊接有一个变容二极管和一个开关二极管. 变容二极管型号为 SMV1265-040LF, 可调节容值范围为 $0.71\text{—}22.47\text{ pF}$, 开关二极管型号为 Infineon BAR50-02. 图 9(c) 为超表面样件的直流馈电电路示意图, 为了给变容二极管施加反向偏置电压 V_c , 每个单元结构中最下方的矩形贴片由高阻抗偏置线连接到一起, 并接在电压源的正极, 而中间矩形贴片由高阻抗偏置线连接到电压源的负极. 单元结构中的梯形贴片由高阻抗偏置线连接到电压源的另一个正极, 给 PIN 二极管提供导通/截止电压 V_d .

在暗室中利用空间波法对超表面样件进行测试^[35], 测试装置见图 9(d). 为了提高测试的准确性, 在收发天线之间放置一块吸波材料, 以减小天线之间的耦合, 同时在矢网上应用时域门技术抑制多径散射. 图 10 与表 1 给出了所设计的超表面吸波体样件较同等大小的参考金属板的 RCS 减缩结果. 为方便分析, 图中同时给出了仿真结果. 实测结果表明, 当 PIN 二极管两端不施加电压 ($V_d = 0$) 时, 二极管断开, 此时将变容二极管两端的反偏电压 V_c 从 0.5 V 逐渐增大到 30 V , RCS 减缩峰值频率可以在 $5.82\text{—}8.34\text{ GHz}$ 的频段内连续可调; 而给 PIN 二极管两端施加正向导通电压时 ($V_d = 0.95\text{ V}$), 可调频率范围向低频移动至 $4.48\text{—}6.16\text{ GHz}$. 可以看出, 通过调节开关二极管和变容二极管的状态, 吸波超表面样件在 $4\text{—}9.5\text{ GHz}$ 的频段内能够实现不同程度的 RCS 减缩, 且每种状态下的最大减缩频点对应周期结构的吸波频点.

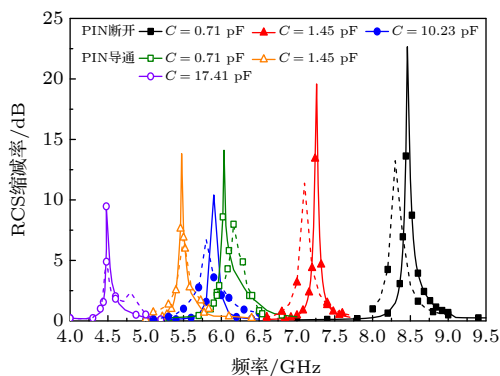


图 10 仿真与实测的单站 RCS 减缩曲线 (实线, 仿真结果; 虚线, 实测结果)

Fig. 10. Simulated and measured monostatic RCS reduction. Solid lines, simulated results; dashed lines, measured results.

表 1 超宽带可调超表面吸波体仿真与实测性能
Table 1. Simulated and measured performance of ultra wideband adjustable surface absorber.

偏置电压/V		C/pF	吸波峰值 频率/GHz	RCS减缩峰值 频率/GHz	
V_d	V_c		仿真	仿真	实测
0.95	0.5	17.41	4.57	4.50	4.48
	9.0	1.45	5.45	5.47	5.52
	30.0	0.71	6.05	6.03	6.16
0	0.5	10.23	5.85	5.90	5.82
	9.0	1.45	7.31	7.26	7.10
	30.0	0.71	8.51	8.46	8.34

此外, 从图 10 也可以看出, 测试结果和仿真结果之间存在一定的差距, 包括频率偏移、减缩量大小以及减缩带宽. 产生这些差距的原因主要是由于开关二极管和变容二极管并不是理想器件, 存在分布阻抗、封装电感和器件的不一致性等, 这些都影响谐振频率以及自由空间的阻抗匹配程度. 另外, 基板参数偏差和加工误差也会引起频率偏移. 但总体上看, 实测的 RCS 减缩频率变化趋势与仿真结果吻合良好, 表明所设计的超表面吸波体可以在宽带范围内实现吸波频率的连续可调, 同时也证实了所提出设计方法的有效性.

5 结 论

本文针对谐振式超表面吸波体吸波带宽较窄的问题, 提出了一种拓宽吸波体工作带宽的新方法. 该方法从等效电路模型的分析而来, 通过在单元结构中混合加载变容二极管和开关二极管, 将工作频率的连续可调与离散搬移结合起来, 实现吸波频率在超宽带范围内的连续动态调节, 以此展宽吸波体的工作带宽. 基于该方法, 优化设计了一款宽带可调超表面吸波体, 并深入分析了其宽带吸波机理. 最后, 对样件进行了加工测试, 从实验角度进一步证实了设计方法的有效性. 值得指出的是, 通过合理设计单元结构和器件组合方式, 有望实现多工作频段组合, 进一步展宽工作带宽, 实现超宽频带内的动态隐身. 并且所提出的宽带可调设计思路还可以拓展应用到其他类型的宽带微波器件设计.

参考文献

- [1] Li T, Yang H, Li Q, Zhang C, Han J, Cong L, Cao X, Gao J 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 1161

- [2] Yang H, Li T, Xu L, Cao X, Jidi L, Guo Z, Li P, Gao J 2021 *IEEE T. Antenn. Propag.* **69** 1239
- [3] Li T, Yang H, Li Q, Zhu X, Cao X, Gao J, Wu Z 2019 *IET Microw. Antenna. P.* **13** 185
- [4] Cui T J, Wu H T, Liu S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 158101 (in Chinese) [崔铁军, 吴浩天, 刘硕 2020 物理学报 **69** 158101]
- [5] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e218
- [6] Jia Y, Liu Y, Guo Y J, Li K, Gong S X 2015 *IEEE T. Antenn. Propag.* **64** 179
- [7] Liu T, Cao X, Gao J, Zheng Q, Li W, Yang H 2013 *IEEE T. Antenn. Propag.* **61** 1479
- [8] Liu Y, Zhao X 2014 *IEEE Antenn. Wirel.* **13** 1473
- [9] Ren J, Gong S, Jiang W 2018 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **17** 102
- [10] Landy N, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [11] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, Ma H F, Jiang W X, Li H 2011 *Opt. Express* **19** 9401
- [12] Mei P, Zhang S, Lin X Q, Pedersen G F 2019 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **18** 521
- [13] Zhang H B, Zhou P H, Lu H P, Xu Y Q, Liang D F, Deng L J 2012 *IEEE T. Antenn. Propag.* **61** 976
- [14] Costa F, Monorchio A, Manara G 2010 *IEEE T. Antenn. Propag.* **58** 1551
- [15] Lim D, Lim S 2019 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **18** 1887
- [16] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Li S J, Zhao Y, Yuan Z D, Zhang H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214101 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 李思佳, 赵一, 袁子东 2013 物理学报 **62** 214101]
- [17] Lu X, Chen J, Peng Z, Wu Z, Anxue Z 2019 *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)* Taiyuan, China, July 18–21, 2019 p1
- [18] Panwar R, Puthucheri S, Agarwala V, Singh D 2015 *IEEE T. Microw. Theory Techn.* **63** 2438
- [19] Zhao B, Huang C, Yang J, Song J, Guan C, Luo X 2020 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **19** 982
- [20] Ghosh S K, Yadav V S, Das S, Bhattacharyya S 2020 *IEEE T. Electromagn. C.* **62** 346
- [21] Shang Y, Shen Z, Xiao S 2013 *IEEE T. Antenn. Propag.* **61** 6022
- [22] Zhang B, Jin C, Shen Z 2020 *IEEE T. Microw. Theory Techn.* **68** 835
- [23] Han Y, Che W 2017 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **16** 74
- [24] Chen J, Hu Z, Wang G, Huang X, Wang S, Hu X, Liu M 2015 *IEEE T. Antenn. Propag.* **63** 4367
- [25] Ynag H H, Cao X Y, Gao J, Li T, Li S J, Cong L L, Zhao X 2021 *J. Radars* **10** 206 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 李桐, 李思佳, 丛丽丽, 赵霞 2021 雷达学报 **10** 206]
- [26] Hu N, Zhang J, Zha S, Liu C, Liu H, Liu P 2019 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **18** 373
- [27] Kim S, Li A, Lee J, Sievenpiper D F 2021 *IEEE T. Antenn. Propag.* **69** 2759
- [28] Li A, Kim S, Luo Y, Li Y, Long J, Sievenpiper D F 2017 *IEEE T. Microw. Theory Techn.* **65** 2810
- [29] Zhang Y, Cao Z, Huang Z, Miao L, Bie S, Jiang J 2021 *IEEE T. Antenn. Propag.* **69** 1204
- [30] Costa F, Monorchio A, Vastante G P 2011 *IEEE Antenn. Wirel. PP* **10** 11
- [31] Xu W, Sonkusale S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 031902
- [32] Yuan H, Li H, Fang X, Wang Y, Cao Q 2021 *IEEE Antenn. Wirel. PR* **63** 11
- [33] Xu W H, He Y, Kong P, Li J L, Xu H B, Miao L, Bie S W, Jiang J J 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 184903
- [34] Raad H R, Abbosh A I, Al-Rizzo H M, Rucker D G 2013 *IEEE T. Antenn. Propag.* **61** 524
- [35] Yang H, Cao X, Yang F, Gao J, Xu S, Li M, Chen X, Zhao Y, Zheng Y, Li S 2016 *Sci. Rep.* **6** 35692

Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid incorporation of active devices^{*}

Feng Kui-Sheng¹⁾²⁾ Li Na¹⁾²⁾ Li Tong^{2)†}

1) (*College of Artificial Intelligence, Yango University, Fuzhou 350015, China*)

2) (*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

(Received 5 July 2021; revised manuscript received 27 September 2021)

Abstract

Structural radar absorber has important application in stealth field for its ability to effectively absorb incoming radar wave and to bear the load at the same time. Metasurface absorbers can achieve nearly-perfect absorption of radar wave, and have characteristics of light weight and thin structure, but their bandwidth are usually narrow. To solve this problem, a new method of broadening the bandwidth of metasurface absorber is proposed in this work. With varactor and PIN diode integrated in a hybrid manner, the continuous tuning and discrete switching are combined together to broaden the effective absorption bandwidth of the absorber. Using this method, an ultra-wideband tunable metasurface absorber is designed and the absorbing mechanism is analyzed in depth. By changing the bias voltages of PIN diodes and varactors, the absorbing frequency can be continuously tuned within a wide band from 4.57 GHz to 8.51 GHz. Measured results verify the low radar cross section characteristics of the absorber and the effectiveness of the design method. The proposed method is simple and feasible, and can be extended to other broadband structure design.

Keywords: electromagnetic metasurface absorber, ultra-wideband, tunable, low radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf

DOI: [10.7498/aps.71.20211254](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211254)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61701523, 61801508), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2020JM-350, 20210110, 20200108, 2020022), the Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (Grant Nos. BX20180375, 2019M653960), and the College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program, China (Grant Nos. 202113468002, S202113468012).

[†] Corresponding author. E-mail: tongli8811@sina.com