

双频带波形选择性超表面吸收器

田文梁¹, 邢 瑞¹, 程用志^{1*}, 罗 辉¹, 李享成²

(1. 武汉科技大学电子信息学院, 湖北武汉 430081; 2. 武汉科技大学高温电磁材料与结构教育部重点实验室, 湖北武汉 430081)

摘要: 针对传统超表面吸收器(MetaSurface Absorber, MSA)单频带工作、难以区分脉冲波(Pulse Wave, PW)与连续波(Continuous Wave, CW)的局限,本文提出了一种基于全波整流非线性电路的双频带MSA设计方案,其基本单元由三层组成,具体包括顶部加载非线性电路的两个相同尺寸的金属方环谐振器、中间介质层以及底部金属接地面.通过创新性的电容/电感非线性电路组合,并引入额外并联电感调节谐振频点,构建了4种具有双频带波形选择性吸收效果的MSAs实现方法.这些MSAs可在两个独立频带内精准且独立地吸收特定波形(CW或PW).且仅需改变并联电感值即可灵活调整工作频带,显著提升了设计的MSAs的工作灵活性与适配性,有效解决了现有电磁吸波器件在复杂多频谱应用场景中的局限性.为使研究具有普遍性,本文以4种类型中的一种双频带MSA作为重点研究对象,即加载电感式非线性电路和加载并联额外电感的电容式非线性电路,重点研究其波形选择特性.首先,通过电磁-电路联合仿真深入探讨了该双频带MSA对不同功率CW与PW的选择性吸收性能,明确功率阈值(-5 dBm)对二极管整流功能及阻抗匹配的关键影响.其次,研究了双频带MSA在不同脉冲宽度下对PW选择性,验证其与电路时间常数的匹配关系.再次,本文对双频带MSA在斜入射横电(Transverse Electric, TE)极化波与横磁(Transverse Magnetic, TM)极化波的波形选择性吸收性能的影响进行了详细分析,证实该MSA具备宽角度稳定性.最后,本文系统地阐述了集总电路元件参数(R_c 、 C 、 R_l 、 L)对不同波形入射波选择性吸收性能的影响.本文提出的双频带波形选择性MSA,凭借其灵活的频带可调性、稳定的极化与角度适应性,为解决多频带通信中的“脉冲杂波滤除”“频段间干扰抑制”问题提供了有效的技术路径,在天线设计、无线通信信号优化及电磁兼容防护领域具有重要的理论价值与潜在应用前景.

关键词: 超表面吸收器(MSA);波形选择性;双频带;连续波(CW);脉冲波(PW)

基金项目: 国家自然科学基金(No.52304410);湖北省重大项目(No.2023BAA003)

中图分类号: TN711;TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)10-3504-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250520

Dual-Band Waveform-Selective Metasurface Absorber

TIAN Wen-liang¹, XING Rui¹, CHENG Yong-zhi^{1*}, LUO Hui¹, LI Xiang-cheng²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. Key Laboratory of High-Temperature Electromagnetic Materials and Structures,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: To address the limitations of traditional metasurface absorbers (MSAs), such as single-band operation and the inability to distinguish between pulse waves (PWs) and continuous waves (CWs), this paper proposes a design scheme for a dual-band MSA based on full-wave rectifier nonlinear circuits. The basic unit of the MSA structure consists of three layers, including two metal square ring resonators of the same size with nonlinear circuits loaded on the top layer, a middle dielectric layer, and a bottom metal ground plane. Through an innovative combination of capacitive/inductive nonlinear circuits and the introduction of an additional parallel inductor to adjust the resonant frequency, four implementation methods for MSAs with dual-band waveform-selective absorption performance are developed. These MSAs can accurately and independently absorb specific waveforms (CWs or PWs) within two different frequency bands. Moreover, the operating frequency bands can be flexibly adjusted simply by changing the value of the parallel inductor, which significantly enhances the operational flexibility and adaptability of the designed MSAs. This effectively overcomes the limitations of existing electromagnetic wave-absorbing devices in complex multi-spectrum application scenarios. To ensure the universality of the research, this paper takes one type of dual-band MSA among the four as the key research object, specifically the one loaded

with an inductive nonlinear circuit and a capacitive nonlinear circuit with an additional parallel inductor, and focuses on investigating its waveform selection characteristics. First, the selective absorption performance of this dual-band MSA for CWs and pulse waves PWs with different powers are thoroughly explored through electromagnetic-circuit co-simulation, clarifying the critical influence of the power threshold (-5 dBm) on the rectification function of the diode and impedance matching. Second, the selectivity of the dual-band MSA for pulse waves under different pulse widths is studied, verifying its matching relationship with the circuit time constant. Subsequently, a detailed analysis is conducted on the influence of oblique incidence of transverse electric (TE)-polarized waves and transverse magnetic (TM)-polarized waves on the waveform-selective absorption performance of the dual-band MSA, confirming that this MSA exhibits wide-angle stability. Finally, this paper systematically elaborates on the influence of lumped circuit component parameters (R_c , C , R_L , L) on the selective absorption performance of the MSA for incident waves with different waveforms. The dual-band waveform-selective MSA proposed in this paper, with its flexible frequency band tunability and stable polarization/angle adaptability, provides an effective technical approach to address the issues of “pulse clutter filtering” and “inter-band interference suppression” in multi-band communications. It holds significant theoretical value and potential application prospects in the fields of antenna design, wireless communication signal optimization, and electromagnetic compatibility (EMC) protection.

Key words: metasurface absorber (MSA); waveform selectivity; dual-band; continuous wave (CW); pulse wave (PW)

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52304410); Major Project of Hubei Province (No.2023BAA003)

1 引言

超表面作为超材料的一种准二维平面结构形式,因其卓越的电磁波调控能力及相对便捷的制备工艺,已成为设计多功能光电器件的理想材料/结构。此类器件涵盖滤波^[1,2]、吸收^[3-6]、波前调控^[7-10]、极化转换^[11,12]及超透镜^[13-15]等,其在无线通信、雷达探测、成像技术等领域呈现出广阔的应用前景。其中,超表面吸收器(MetaSurface Absorber, MSA)的研究尤为瞩目^[3-6,16],其卓越的电磁波吸收能力使其在电磁能量捕获、电磁隐身、电磁传感以及电磁屏蔽等多个领域得到了广泛应用。采用非线性电路可进一步拓展MSA功能多样性^[17]。针对这一方向,人们已开展系统而深入的研究,相继实现了具备多频带响应、宽频带覆盖、宽角度入射兼容性、极化不敏感特性、自适应调控能力等^[3-6,16-18]。然而,在日常生活场景中广泛存在的数字波、脉冲电磁信号及其他形式的电磁噪声,往往会对通信系统的正常运行产生显著干扰。目前,针对这些电磁噪声的有效抑制方法尚未得到充分重视和系统性研究。深入探究这些电磁波的吸收特性,对于确保通信信道在实际环境中的性能稳定性和可靠性具有重要的理论价值和工程意义。文献[17]研发了一种集成非线性电路的MSA,该设计能够在同一频率下对不同脉宽的微波信号实现选择性吸收。这种波形选择性吸收机制主要得益于非线性全波整流电路和频率转换机制的协同作用,为解决同频率下不同波形电磁信号引发的电磁干扰与污染问题提供了有效解决方案。

基于全波整流非线性电路的MSA不仅能够显著区分同频率的脉冲波(Pulse Wave, PW)与连续波(Continuous Wave, CW),还能有效识别表面波、自由空间波

等多种电磁波入射形式的不同波形^[17-21]。此类非线性MSA结构简洁、无需外加电源进行控制。然而,现有大多数全波整流非线性MSAs的研究主要集中于单频带工作模式,在应对日益复杂的微波频段多频谱应用需求时存在显著局限性。为了有效拓展和提升此类非线性MSA工作频带和性能,人们已经展开了深入的探索与研究。文献[4]提出了一种高阶模式电磁波激发的电感型和电容型双频段MSA,该设计能够在两个不同的工作频带内同时实现PW或者CW的高效选择性吸收。同时,文献[22]设计了一种基于相同谐振器结构并加载非线性电路和额外并联电容的双频带波形选择性MSA,该方案可在两个独立的频带内分别实现对PW和CW的选择性反射。紧接着,文献[23]提出了一种基于两种不同谐振器结构组合并加载非线性电路的MSA,这种设计同样展现了在两个不同频带内独立实现PW和CW选择性吸收的能力。然而,在波形选择性MSAs领域,仍存在诸多亟待深入探索的关键科学问题。具体而言,如何通过创新性的电路拓扑设计或新型结构配置实现性能的进一步提升和频带的拓展,以及如何建立系统的设计准则以确定最优结构形式从而满足特定性能指标要求,这些均是当前及未来研究工作中的重点攻关方向。

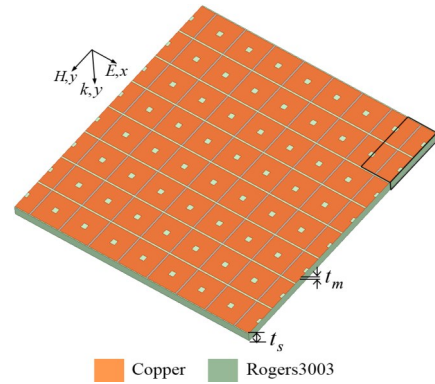
为此,本文提出了一种新型的基于全波整流非线性电路的双频带MSA设计方案,区别于现有波形选择超表面的设计,创新性地提出了并联额外电感来调节超表面单元谐振频点,该方案仅需调节并联电感值的大小即可改变谐振频点,继而轻松实现MSA在目标频带内的稳定工作。因此,本文提出的MSA设计方案较现有设计更具吸波灵活度。具体而言,本文设计的MSA通过电容/电感式非线性电路组合和并联额外电感,构

建了4种不同类型的双频带波形选择性MSAs,这些MSAs能够在两个独立频带内相互独立地实现对特定波形的选择性吸收,展现出优异的频率与波形选择性.不失一般性,本文重点关注一种电感-电容式MSA,在两个基本单元中,一个加载电感式非线性电路,另一个加载电容式非线性电路且并联额外电感.基于该非线性电路配置,本文重点研究了其双频带波形选择性.本文采用电磁-电路联合仿真技术,详细分析了不同入射功率和脉冲宽度对所设计MSA双频带内不同波形吸收性能的影响.此外,本文还从不同斜入射角度及集总元件参数两个维度,对所设计的双频带MSA的波形选择性吸收性能进行了全面评估,为后续多频带波形选择超表面的深入研究奠定了理论基础.

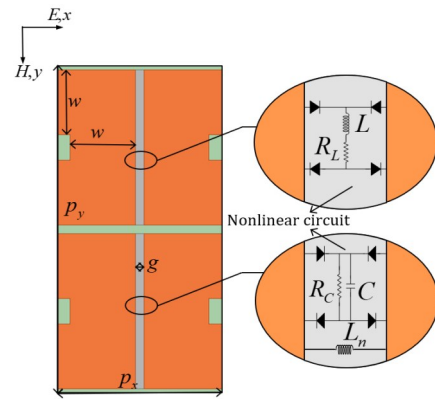
2 结构设计与仿真

本文设计的MSA周期性阵列结构如图1(a)所示,该结构的基本单元由三层组成,其中包括顶部加载非线性电路的两个相同尺寸的金属方环谐振器、中介质层以及底部金属接地面.介质层为低损耗的Rogers RO3003,其相对介电常数为3,损耗为0.0013,顶层金属结构和底层接地面为电导率 $\sigma=5.8 \times 10^7$ S/m的铜膜.如图1(b)所示,所设计的MSA基本单元结构具体如下:其中,一个谐振器结构上集成了电感式非线性电路,该电路由4个二极管组成全波整流电路,并串联电感与电阻以形成特定的电路拓扑;另一个谐振器结构则集成了电容式非线性电路,该电路同样由全波整流电路采用并联方式连接电容与电阻,并在此电路外部额外并联了1个贴片电感,以实现特定的非线性响应和频率调谐功能.

利用ANSYS Electronics Desktop 2020 R2商业软件对设计的MSA单元结构进行电磁-电路的联合仿真分析.首先,本文根据预设尺寸对MSA单元结构进行精准建模,并借助等效电路理论对其几何参数进行优化设计.通过优化后的单元结构参数为: $p_x=19$ mm, $p_y=38$ mm, $t_s=2$ mm, $t_m=0.017$ mm, $g=1$ mm, $w=7.5$ mm.为了提高仿真效率,首先采用了集总端口替代非线性电路的方法,从而显著减少了仿真时间.其次,将电磁与电路模块进行了有效整合连接并进行了电路仿真分析,将电磁模块中的Floquet端口分别设置为入射和反射端,同时将集总端口与非线性电路相连,用于模拟电磁与电路之间的交互^[23].再次,采用SPICE模型准确模拟商用肖特基二极管(HSMS-2863x系列)的性能,具体参数设置可参考文献[19, 23, 24].最后,电容式非线性电路中电阻 $R_c=50$ k Ω 、电容 $C=1$ nF,电感式非线性电路中电阻 $R_L=5.5$ Ω 、电感 $L=1$ mH.并联电感 L_n 用于调整工作频率.



(a) 设计的双频带波形选择性超表面吸收器二维周期阵列



(b) 基本单元结构俯视图与对应的电路配置

图1 设计的双频带波形选择性超表面吸收器示意图

3 结果与讨论

首先考虑单频带电容/电感式非线性电路MSA的波形选择吸收特性.如图2(a)和图2(c)所示,在3.1 GHz处,所设计的电容/电感式非线性电路MSA对-5 dBm输入功率下的PW和CW的吸收率分别为91.6%/8.61%和8.5%/79.5%.这表明该MSA具有显著的CW/PW选择性吸收特性.这主要是由于电容式MSA在输入波形为短PW时,金属片上感应出电荷经二极管桥全波整流后积蓄在电容器中,在下一脉冲到来之前,积蓄的电荷流入电阻中,导致能量被耗散^[19, 22].

图2(b)和图2(d)给出了电容/电感式非线性电路MSA在并联接入不同电感值 L_n 时,对入射的-5 dBm功率PW和CW信号吸收率.由图可知,无论电感值 L_n 如何变化,电容/电感式MSA对PW/CW吸收率普遍保持在约90%/80%的高水平,然而相比之下,CW/PW的吸收率维持在约10%的较低水平.此外,电容/电感式MSA工作频率随着 L_n 的增加而逐渐减小.由此可得,通过非线性电路MSA结构中引入并联电感,能够有效实现工作频率的调节,且不会对其波形选择吸收特性

产生显著影响. 因此,可以通过两个/多个相同谐振器结构组合加载非线性电路,同时并联不同的电感元件来构建双/多频带波形选择性 MSA. 如图3所示,通过电容/电感式非线性电路的组合,同时并联电感元件构建了4种不同类型的双频带波形选择性 MSAs,即电容-电

容式双频带 MSA、电容-电感式双频带 MSA、电感-电感式双频带 MSA 以及电感-电容式双频带 MSA. 图3(a)~图3(d)分别给出了4种不同非线性电路组合的双频带波形选择性 MSAs 在正入射-5 dBm 下的 PW 和 CW 吸收率,对应的工作频点分别为 3.6 GHz 和 5.3 GHz.

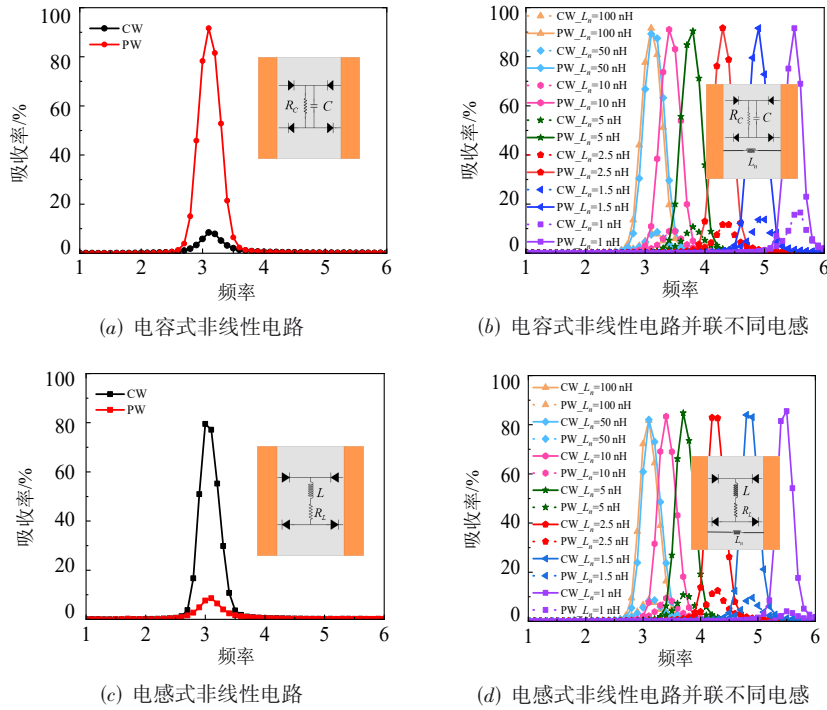


图2 加载不同非线性电路单频带 MSA 在入射功率为-5 dBm 时的 PW 和 CW 吸收率

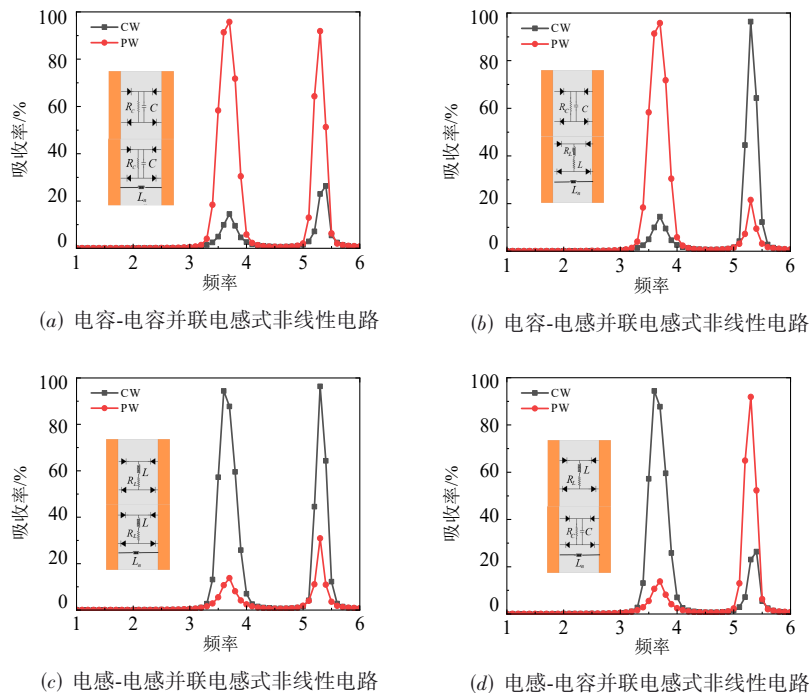


图3 加载4种不同非线性电路组合的双频带 MSA 在入射-5 dBm 功率 PW 和 CW 吸收率

如图3(a)所示,当电容-电容式MSA位于3.6 GHz和5.3 GHz处时,PW吸收率分别达到95.2%和91.8%,而对应的CW吸收率仅为10.5%和21.3%。如图3(b)所示,电容-电感式双频带MSA在3.6 GHz和5.3 GHz的处PW吸收率分别为94.5%和21.5%,对应的CW吸收率为11.2%和96.4%,显示出了显著的低频PW和高频CW选择性吸收性能。如图3(c)所示,电感-电感式MSA在上述两个频点处PW吸收率分别为10.7%和29.8%,而对应的CW吸收率达到94.4%和96.4%。如图3(d)所示,电感-电容式MSA在3.6 GHz和5.3 GHz处的PW吸收率分别为10.6%和91.8%,而对应的CW吸收率为94.4%和23%,显示出了显著的低频CW、高频PW选择性吸收性能。由此表明:所设计的4种不同类型的MSAs在3.6 GHz和5.3 GHz处显示出显著的双频带波形选择性吸收性能,被选择的波形吸收率达到90%以上,未被选择的波形吸收率小于30%。设计的4种不同类型的MSAs能够应对多种使用场景,例如,电容-电容并联电感式MSA能够在双频带上实现对PW的强吸收,同时反射绝大部分CW,在实际应用中,可针对性地吸收滤除通信过程中的“脉冲杂波”,解决“频段间干扰”和“信号反射损耗”问题,该款MSA可作为保障通信质量的关键组件。

不失一般性,本文将重点研究电感-电容式非线性电路MSA在不同情形下的双频带波形选择性吸收性能。图4(a)和图4(b)分别给出了电感-电容式MSA在输入不同功率情况下CW和PW的吸收特性。由图可知,随

着输入功率的增加,电感-电容式MSA在低频3.6 GHz处CW吸收率先增大后减小,且相对应的吸收带宽逐渐增大,而PW吸收率基本维持在约30%。在高频5.3 GHz附近,电感-电容式MSA对PW的吸收率随着输入功率的增加先增大后减小,相对应的吸收率带宽略有增大,而CW吸收率基本维持在约30%。由图4(c)和图4(d)可知,在-20 dBm的低功率下,在3.6 GHz处的CW和PW吸收率分别为9.9%和10.1%;在5.3 GHz处CW和PW吸收率分别为34.5%和30.0%。此时电磁波在金属谐振器表面产生的感应电压小于二极管阈值电压,二极管无法进行信号整流。因此,在两个频率下CW和PW的吸收率都相对较低。当功率增大到-5 dBm时,在3.6 GHz的处CW和PW吸收率分别为94.4%和10.6%;在5.3 GHz处的CW和PW吸收率分别为23.1%和91.8%,入射的电磁波在金属谐振器表面产生的感应电荷在间隙两旁的感应电压高于二极管阈值电压,二极管整流电路导通。此时MSA的阻抗与自由空间阻抗匹配,阻抗匹配对于在有限的功率范围内保证波形选择性效果至关重要。当功率增大到5 dBm时,在3.6 GHz处的CW和PW吸收率分别为80.3%和14.6%;在5.3 GHz处的CW和PW吸收率分别为18.6%和53.1%,此时在MSA结构中生成的感应电压逐渐超出二极管的最佳工作电压值,并在热效应以及非线性失真等多重因素下二极管的工作效率被削弱,继而致使由二极管构成的全波整流电路的整流功能出现一定程度的衰减。

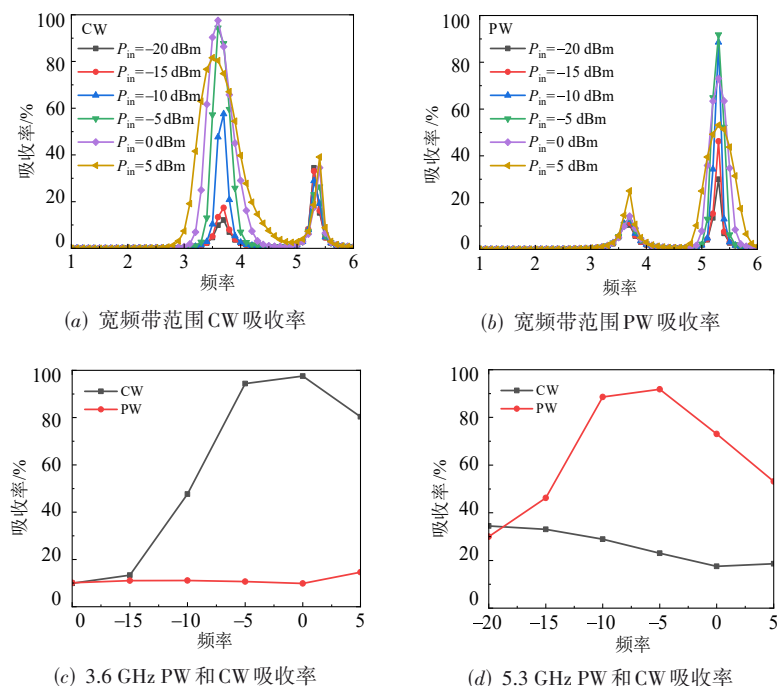


图4 电感-电容式双频带MSA在正入射不同功率和波形下的吸收率

进一步研究电感-电容式 MSA 对不同脉冲宽度 PW 的吸收性能. 由图 5 可知, 电感-电容式 MSA 在 PW 和 CW 之间存在明显的转换. 当脉冲宽度为 50 ns 时, 电感-电容式 MSA 在 3.6 GHz 和 5.3 GHz 处的吸收率分别为 10.6% 和 91.8%. 随着脉冲宽度的逐步增加, 吸收曲线呈现饱和趋势. 当脉冲宽度增至 50 μ s 时, 电感-电容式 MSA 在 3.6 GHz 和 5.3 GHz 处的吸收率为 93.1% 和 34.6%. 当脉冲宽度达到 100 μ s 时, 吸收曲线近乎饱和, 该现象与电容式时间常数 $R_c \cdot C$ 和电感式时间常数 L/R_L 呈现的变化规律相契合. 这一结果进一步印证了设计的双频带 MSA 针对特定 PW 形所具备的选择性吸收特性^[6,21].

在实际应用中, 通常要考虑 MSA 对斜入射电磁波吸收性能的影响. 为此, 我们研究了电感-电容式双频带 MSA 在 TE 和 TM 两种极化模式下不同斜入射角度功率为 -5 dBm 的 CW 和 PW 吸收率, 结果如图 6 所示.

如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 当 TE 模斜入射 (小于 40°) 时, 设计的电感-电容式双频带 MSA 在 3.6 GHz 处的 PW/CW 的吸收率基本维持在约 30% 和 90%, 而 5.3 GHz 处的 PW/CW 的吸收率基本维持在约 90% 和 30%. 如

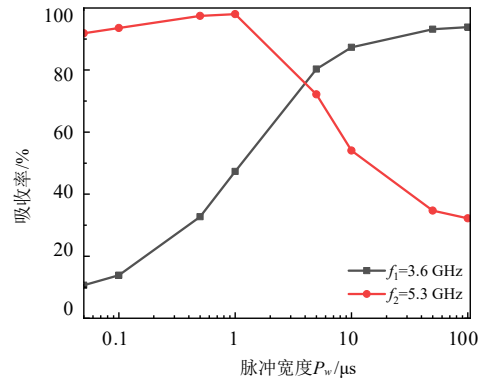


图 5 电感-电容式双频带 MSA 在输入功率为 -5 dBm 时不同脉冲宽度下 3.6 GHz 和 5.3 GHz 处吸收率

图 6(c) 和图 6(d) 所示, 电感-电容式双频带 MSA 对 TM 模斜入射时的吸收率与 TE 模斜入射时的结果基本一致. 由此可知, 所设计的电感-电容式双频带 MSA 在较宽的斜入射角度范围内具有良好的波形选择性效果.

接下来, 本文研究了所设计的电感-电容式双频带 MSA 中不同的集总参数 (R_c, C, R_L, L) 对 PW 和 CW 吸收特性的影响. 在仿真过程中, 入射波功率设置为 -5 dBm,

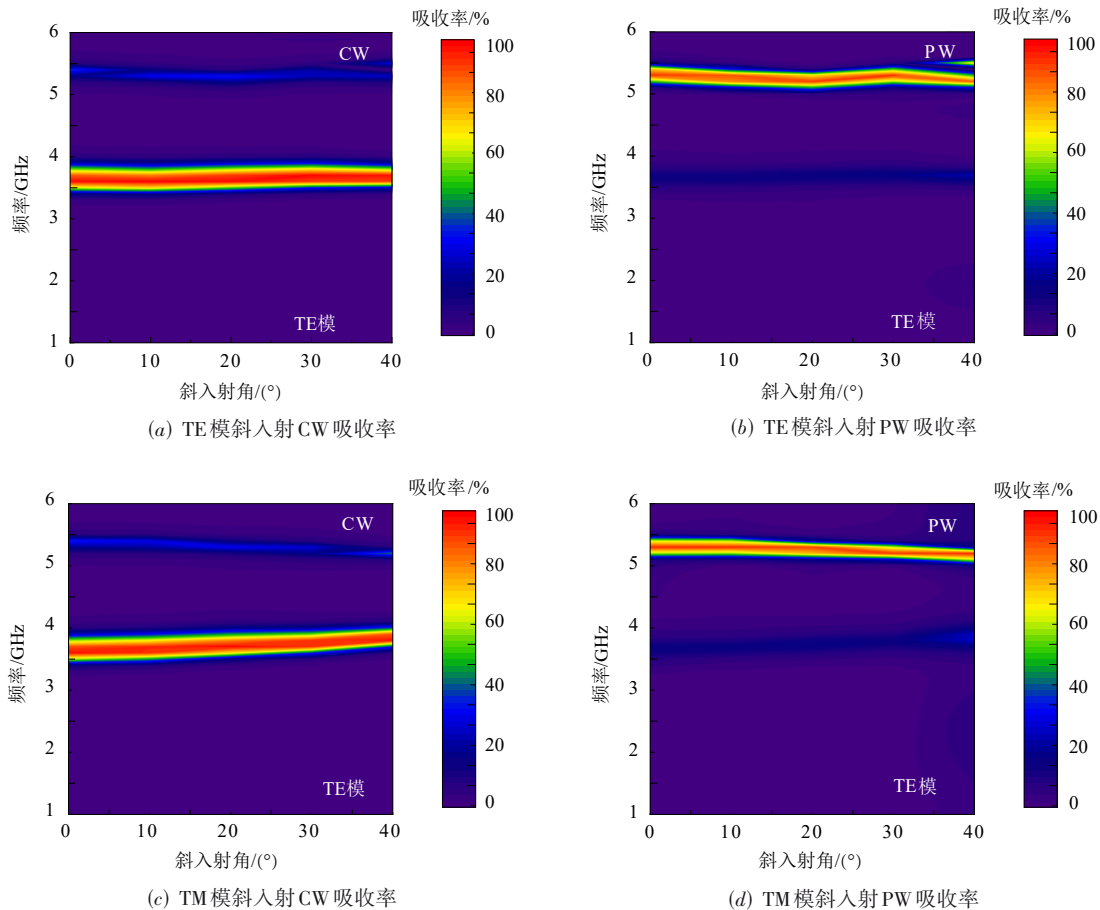


图 6 设计的电感-电容式双频带 MSA 在输入功率为 -5 dBm 时不同波形不同斜入射角下的吸收率

对应的仿真结果如图7和图8所示. 由图可知, 无论如何改变 R_c 和 C 值, 在低频3.6 GHz处CW和PW的吸收率维持在和94.4%和10.6%不变. 而当改变 R_L 和 L 值时, 在高频5.3 GHz处CW和PW的吸收率维持在23%

和91.8%不变. 这是由于低频CW选择性吸收性能由电感式非线性电路决定, 而高频PW选择性吸收主要由电容式非线性电路主导. 因此, 改变 R_c 和 C 值以及 R_L 和 L 值分别仅影响高频和低频的波形选择性吸收性能.

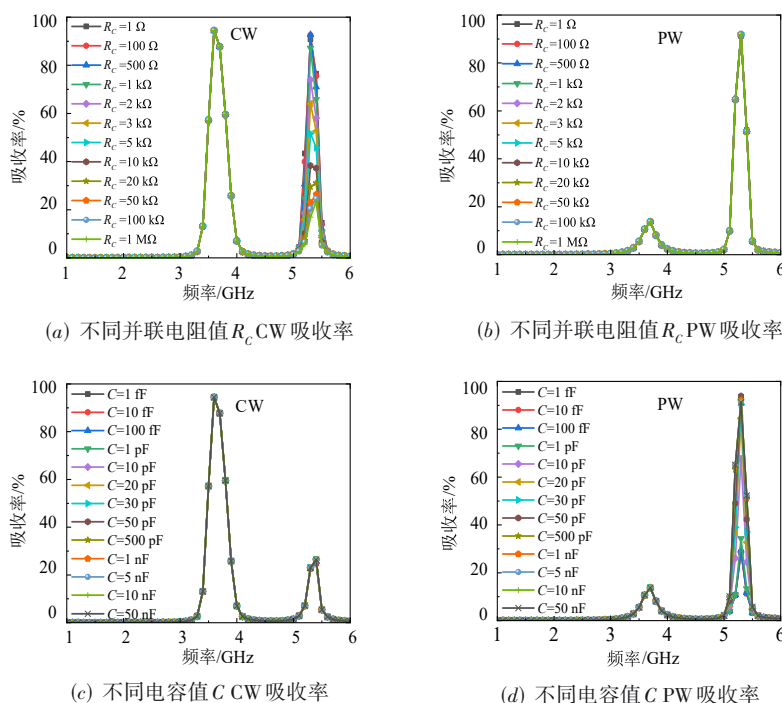


图7 所设计的电感-电容式双频带MSA在输入功率为-5 dBm时不同波形电容式非线性电路不同集总参数(R_c , C)下的吸收率

由图7(a)和图7(b)可知, 改变电阻 R_c 对高频PW吸收率几乎没有影响, 峰值保持在91.8%. 这是由于MSA对入射的PW吸收率很大程度上由其脉冲宽度以及非线性电路时间常数决定, 具体而言, 对于电容型非线性电路来说, 可简化成由二极管内部寄生电阻等效的电阻 R_d 与电容电阻并联而成的电路串联组成, 通过公式推导后可得时间常数 $\tau_c = CR_c R_d / (R_c + R_d)$ ^[20], 由于二极管寄生电阻很小(即 R_d 很小), 因此 R_c 仅需达到一个较小的阈值即可使上式等效为 $\tau_c \approx CR_d$, 二极管进行全波整流使得PW转化为静电场, 随后由二极管内部电阻消耗, 电阻 R_c 在此过程并未发挥决定性作用. 此外, 随着电阻 R_c 增大, MSA对CW的吸收逐渐减小. 这是由于感应电流进入整流电路后, 在 R_c 值较小时, 能量通过电阻 R_c 得以耗散. 当 R_c 值较大时, 电阻对电流的通过形成阻碍, 导致电荷在电容上积聚, 形成电势差, 进而阻止电流继续流入整流电路. 由图7(c)和图7(d)可知, 改变电容值 C 对高频CW的吸收率几乎没有影响, CW吸收率峰值保持在26.3%. 这是因为当CW入射时, 电荷积蓄在电容上形成电势差, 阻碍电流流入整流电路, 电能无法通过电阻 R_c 有效地耗散. 此外, 当PW入射时, 随着电容值 C 增大, 非线性电路时间常数 τ_c 显著

变大, 电容的储能效率在时域得到了极大提升, 使得电容有充足的时间在下一段PW到来前储存当前PW能量, 并由并联电阻 R_c 耗散, 因此如图7(d)所示, 随着电容值 C 的增大对PW的吸收性能增加.

由图8(a)和图8(b)可知, 当增大电感-电容式双频带MSA的电阻值 R_L 时, 低频3.6 GHz处的CW吸收率逐渐减小, 而PW吸收率维持在约10%的较低水平. 这是因为电阻 R_L 的增大不仅阻碍了流经电感后小部分电流的耗散, 还导致了MSA的等效阻抗严重失配, 进而导致了CW吸收性能下降. 当PW入射时, 与上述电容电路类似, 电感型非线性电路可简化成由电感 R_L 、二极管内部寄生电阻 R_d 与电感电阻 R_L 的串联结构, 根据电路理论推导得出的时间常数 $\tau_L = L / (R_L + R_d)$ ^[20], 可知在理论上时间常数 τ_L 与 R_L 成反比关系, 结合反向电动势 $E = L \times \Delta I / \Delta t$, 反向电动势的幅值直接取决于电流变化率. 具体来说, 当 R_L 取极小值时, τ_L 显著增大, 在50 ns的电流变化频率下, 电流需在极短时间内完成升、降过程, 其电流变化率始终处于较大值, 即反向电动势会反复产生以阻碍脉冲电流流入电阻进行能量耗散, 因此图8(b)中MSA的低频吸收率始终处于较低水平. 相反地, 当增大 R_L 时(如 $R_L = 100$ K Ω), 经过计算 $\tau_L \approx 0.01$ s, 该值仍远远大于

50 ns 的 PW 脉冲宽度,与上述同理可知,即使 R_L 进一步增加至 1 M Ω , τ_L 与 PW 脉冲宽度的数量级差异仍未改变,反向电动势的阻碍作用依然显著. 因此,如图 8(b)所示,无论 R_L 如何调整,所设计的 MSA 在低频谐振点对 PW 的吸收率始终维持在极低水平. 由图 8(c)和图 8(d)可知,改变电感值 L 对 CW 的吸收率几乎没有影响,吸收峰值基本保持在 94.4%. 这一现象的本质在于:无论电感时间常数如何变化,入射 CW 感应生成的电流最终都会趋于稳定,电感的反向电动势 $E=L \times \Delta I/\Delta t$ 最终会消失,能量可通过电阻完全耗散. 此外,随着电感 L 增

大, PW 吸收率逐渐减小,由式 $\tau_L=L/(R_L+R_d)$ 可知,电感值 L 是决定时间常数 τ_L 的关键参数;当电感值 L 取极小值时(如 $L=1$ nH),时间常数 τ_L 小于入射 PW 脉冲宽度(50 ns),此时入射 PW 能够在 τ_L 时间内使电流达到稳定,即“抵消”反向电动势,能量可通过电阻高效转化为热能. 因此,如图 8(d)所示,当 L 取极小值时,所设计的 MSA 在低频谐振点对 PW 吸收率处于较高水平,且随电感 L 增大而逐渐降低. 综合以上结果可知,选择合适的电子元件参数对所设计的 MSA 波形选择性能起到决定性作用.

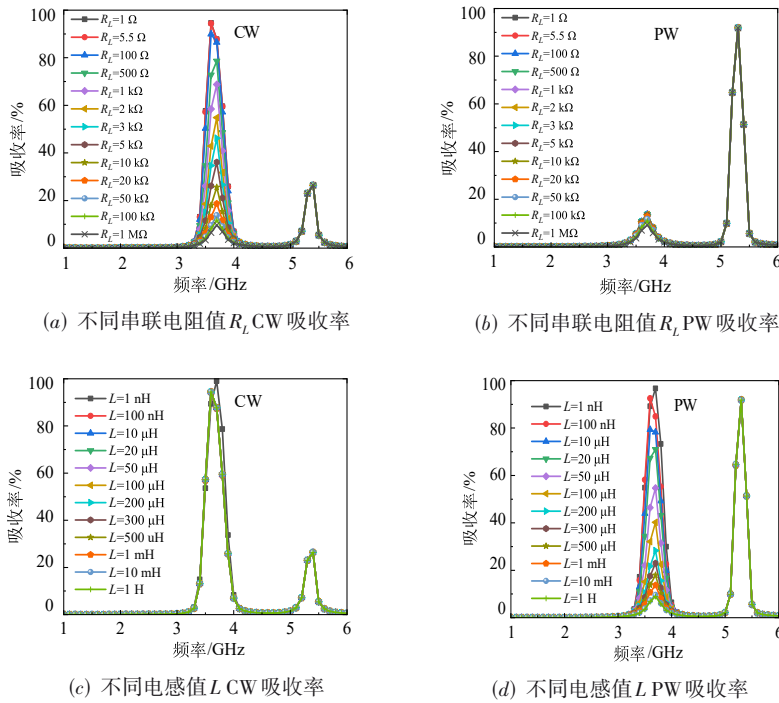


图 8 设计的电感电容式双频带 MSA 在输入功率为 -5 dBm 时不同波形电感式非线性电路不同集总参数 (R_L, L) 下的吸收率

4 结论

本文提出了一种通过将电感/电容式非线性电路与额外并联电感相结合的 MSA 设计方案,成功实现了高效双频带波形选择性吸收. 首先,利用非线性电路组合构建了 4 种不同类型的双频带波形选择性 MSAs,通过电磁-电路联合仿真分析表明:所设计的 4 种双频带 MSAs 能够在两个不同的谐振频点实现对选定波形的吸收率超过 90%,而对未被选定波形的吸收率维持在约 30% 的较低水平. 为了不失一般性,本文重点研究了电感-电容式双频带 MSA 的波形选择性吸收性能. 仿真结果表明:所设计的电感-电容式双频带 MSA 在 -5 dBm 功率下,低频 3.6 GHz 处 PW 与 CW 的吸收率为 10.6% 和 94.4%,高频 5.3 GHz 处的 PW 与 CW 吸收率为 91.8% 和

23%,表明其具有显著的低频 CW 和 高频 PW 选择性吸收效果. 在 -20~5 dBm 功率范围内,该电感-电容式双频带 MSA 对低频 CW 和 高频 PW 的吸收率随功率的增大先升高后降低,而对低频 PW 和 高频 CW 的吸收率基本维持在 30% 左右的较低水平. 本文分析了不同极化模式下改变斜入射角度对电感-电容式双频带 MSA 吸收率的影响,结果表明其具有宽入射角度波形选择性吸收性能. 进一步研究了该 MSA 的电路参数对 CW 和 PW 吸收性能的影响,仿真结果表明:增大电阻 R_C/R_L 值会导致高频/低频处 CW 吸收率下降;增大电容 C /电感 L 值使得高频处 PW 吸收率提高、低频处 PW 吸收率下降. 集总元件参数的选择对电感-电容式双频带 MSA 的波形选择性吸收性能起着关键作用. 本文设计的双频带 MSA 能够根据不同波形(脉冲宽度)独立地控制两个

同频率下的波形选择性吸收特性,在通信和天线领域具有广泛应用前景^[24].

参考文献

- [1] 罗宇轩,程用志,陈浮,等.基于沙漏形人工表面等离子体和交指电容结构的双频滤波器设计[J].物理学报,2023,72(4):71-79.
LUO Y X, CHENG Y Z, CHEN F, et al. Dual-band filter design based on hourglass-shaped spoof surface plasmon polaritons and interdigital capacitor structure[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(4): 71-79. (in Chinese)
- [2] SUN S P, CHENG Y Z, LUO H, et al. Notched-wideband bandpass filter based on spoof surface plasmon polaritons loaded with resonator structure[J]. Plasmonics, 2023, 18(1): 165-174.
- [3] LUO H, XIONG Y, CHENG Y Z, et al. Optical transparent metamaterial structure for microwave-infrared-compatible camouflage based on indium tin oxide[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(10): 2850-2861.
- [4] CHENG Y Z, QIAN Y J, HOMMA H, et al. Waveform-selective metasurface absorber with a single-patch structure and lumped nonlinear circuit for a higher-order mode[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(11): 8677-8691.
- [5] 邢瑞,程用志,罗辉,等.基于线性电路的伪波形选择性超表面吸收器[J].激光与光电子学进展,2024,61(17):1723002.
XING R, CHENG Y Z, LUO H, et al. Pseudo-waveform-selective metasurface absorber based on linear circuits[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 1723002. (in Chinese)
- [6] 钱莹洁,刘海宏,程用志,等.基于非线性电路的双频带脉冲波选择性超表面吸收器设计[J].电子学报,2024,52(6):2067-2073.
QIAN Y J, LIU H H, CHENG Y Z, et al. Design of a dual-band pulse wave selective metasurface absorber based on nonlinear circuits[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(6): 2067-2073. (in Chinese)
- [7] JU Z Z, WEN J, SHI L N, et al. Ultra-broadband high-efficiency airy optical beams generated with all-silicon metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9: 2001284.
- [8] YOU X L, FUMEAUX C, WITHAYACHUMNANKUL W. Tutorial on broadband transmissive metasurfaces for wavefront and polarization control of terahertz waves[J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131(6): 061101.
- [9] 王焜,董元旦.基于混合电磁超材料的宽角扫描相控阵天线[J].电子学报,2023,51(2):267-274.
WANG Z, DONG Y D. A hybrid metamaterial-based wide-angle beam-scanning phased array antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(2): 267-274. (in Chinese)
- [10] 涂建军,马丁.基于粒子群结构寻优的电磁隐身微网格超表面[J].电子学报,2023,51(11):3262-3270.
TU J J, MA D. Electromagnetic stealth micro-grid metasurface based on particle swarm structure optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(11): 3262-3270. (in Chinese)
- [11] ZHAO J C, LI N, CHENG Y Z. Ultrabroadband chiral metasurface for linear polarization conversion and asymmetric transmission based on enhanced interference theory[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(11): 113602.
- [12] YOU X L, AKO R T, BHASKARAN M, et al. Mechanically tunable terahertz circular polarizer with versatile functions[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(4): 2200305.
- [13] HUANG Z R, ZHENG Y Q, LI J H, et al. High-resolution metalens imaging polarimetry[J]. Nano Letters, 2023, 23(23): 10991-10997.
- [14] LI J H, LIU W W, XU H F, et al. An RGB-achromatic aplanatic metalens[J]. Laser & Photonics Reviews, 2024, 18(4): 2300729.
- [15] DENG M, KANWAL S, WANG Z C, et al. Dielectric metasurfaces for broadband phase-contrast relief-like imaging[J]. Nano Letters, 2024, 24(46): 14641-14647.
- [16] 王彦朝,许河秀,王朝辉,等.电磁超材料吸波体的研究进展[J].物理学报,2020,69(13):39-51.
WANG Y Z, XU H X, WANG C H, et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(13): 39-51. (in Chinese)
- [17] WAKATSUCHI H, KIM S, RUSHTON J J, et al. Waveform-dependent absorbing metasurfaces[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(24): 245501.
- [18] WAKATSUCHI H, ANZAI D, RUSHTON J J, et al. Waveform selectivity at the same frequency[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9639.
- [19] WAKATSUCHI H. Waveform-selective metasurfaces with free-space wave pulses at the same frequency[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(16): 164904.
- [20] ASANO K, NAKASHA T, WAKATSUCHI H. Simplified equivalent circuit approach for designing time-domain responses of waveform-selective metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(17): 171603.
- [21] 程用志,钱莹洁,李志仁,等.基于环形谐振器集成非线性

性电路的脉冲波超表面吸收器设计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(10): 3812-3820.

CHENG Y Z, QIAN Y J, LI Z R, et al. The design of metasurface absorber based on the ring-shaped resonator lumped with nonlinear circuit for a pulse wave[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(10): 3812-3820. (in Chinese)

- [22] TAKESHITA H, NITA D, CHENG Y Z, et al. Dual-band waveform-selective metasurfaces for reflection suppression[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(19): 191703.
- [23] QIAN Y J, CHENG Y Z, LUO H, et al. Design of a dual-band waveform-selective metasurface absorber based on the combination of two resonator structures loaded with nonlinear circuits[J]. Advanced Theory and Simulations, 2024, 7(4): 2300590.
- [24] IMAI S, HOMMA H, TAKIMOTO K, et al. Design and analysis for the SPICE parameters of waveform-selective metasurfaces varying with the incident pulse width at a constant oscillation frequency[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 7202.

作者简介



田文梁 男, 2001年1月出生于江苏省扬州市. 现为武汉科技大学电子信息专业研究生. 主要研究方向为电磁超表面.
E-mail: 13952707751@163.com



程用志 男, 1984年5月出生于湖北省咸宁市. 2015年6月毕业于华中科技大学并获得微电子学与固体电学博士学位. 现为武汉科技大学电子信息学院教授/博士生导师. 主要研究方向为光学与电磁超材料理论、设计及其应用.
E-mail: chengyz@wust.edu.cn