

基于有源频率选择表面的多功能吸波器设计

朱 敏, 霍飞飞, 牛 犇

(金陵科技学院电子信息工程学院, 江苏 南京 211169)

摘 要:在微波电路和传输线理论的基础上,设计了一种多层结构的基于有源频率选择表面的多功能吸波器,其结构分为四层:上层由金属贴片和 PIN 二极管组成,第二层为介质板,中间层为金属板,最下层为微带馈电结构。该设计通过调节馈电方式来控制 PIN 二极管通断两种工作状态,从而改变上层金属贴片的组成结构,实现了双频段频率可调。仿真结果表明:所设计的多功能吸波器可调频段范围峰值为 8.95~15.32 GHz,且具有极化转换特性,实现了吸波频率的可调,为多功能吸波器的设计提供了新的思路。

关键词:有源频率选择表面;可重构;吸波器;频率可调

中图分类号:TN713

文献标识码:A

文章编号:1672-755X(2021)03-0028-06

Design of Multifunctional Microwave Absorber Based on Active Frequency Selective Surface

ZHU Min, HUO Fei-fei, NIU Ben

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Based on the theory of microwave circuit and transmission line, a multi-layer multifunctional microwave absorber based on active frequency selective surface is designed. The structure has four layers. The upper layer is composed of metal patch and PIN diode, the second layer is dielectric plate, the middle layer is metal plate, and the lowest layer is microstrip feed structure. The design controls the on-off two working states of PIN diode by adjusting the feeding mode, so as to change the composition structure of the upper metal patch and realize the dual band frequency adjustment. The simulation results show that the peak value of the adjustable frequency band of the designed multifunctional microwave absorber is 8.95~15.32 GHz, and it has the characteristics of polarization conversion. The adjustable absorption frequency is realized, which provides a new idea for the design of multifunctional microwave absorber.

Key words: active frequency selective surface; reconfiguration; absorber; frequency adjustable

频率选择表面是由分布在导电金属表面上的缝隙或者介质表面上的金属层构成的有源或者无源谐振单元按照一定排列方式组成的平面周期结构,一般具有带通或带阻特性。频率选择表面能够对不同频率、不同入射角度以及极化状态下的电磁波呈现出选择特性,因此通常认为频率选择表面是具有电磁波频率和极化双重滤波特性的空间滤波器。近几十年来,由频率选择表面构成的吸波器在微波通信领域(比如大尺寸目标的雷达散射截面设计^[1]、天线罩设计以及隐身系统设计^[2]等方面)应用十分广泛。

收稿日期:2021-04-23

基金项目:金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-201716,jit-b-201629,jit-b-201704)

作者简介:朱敏(1984—),女,安徽蚌埠人,讲师,博士,主要从事计算电磁学、电磁场与微波技术研究。

传统频率选择表面设计的无源吸波器具有结构及功能单一等缺点,无法适用于复杂的电磁环境,应用场合具有很大的局限性。因此,由频率选择表面设计的有源吸波器近年来成为广泛关注的研究热点。很多文献采用了频率选择表面与有源器件的结合来实现对系统电磁功能的调控。文献[3]在一个简单的频率选择表面上加载了可变电容和可变电阻构成了一种新型的可调谐吸波器。Yan 等设计了一款在局域网中含有双阻带频段的单元结构,具有良好的稳定性^[4]。Li 等通过控制加载在频率选择表面上的 PIN 二极管的工作状态来实现中心频率为 2.45 GHz 的信号传输和屏蔽功能^[5]。Wu 等在两层结构的频率选择表面上分别加载了变容二极管和 PIN 二极管,同时实现了吸波和调谐的功能^[6]。杨作成通过给出 3 种不同蝶形单元的结构验证了所提出的有源频率选择表面具有吸波的功能^[7]。朱敏^[8]、徐欧等^[9]设计了特定极化的双方环 FSS 电控吸波材料,该实验结果表明,当通过 PIN 管的电流变化时,其谐振频率也随之变化,具有良好的角度稳定性。针对多站雷达隐身问题,高祥提出了具有带内透射、外吸收特性的频率选择雷达吸波体的设计方法,具有低带内损耗、宽带吸收以及稳定性较好的特点^[10]。其他学者也针对实际问题分别对频率选择表面的设计和性能改善展开了大量的研究^[11-12]。然而,上述文献中大多为无源结构频率选择表面或者功能单一的有源结构频率选择表面,无法满足多功能的需求^[13-15]。

本文设计了一款双频段频率可调的一体化多功能有源吸波器,通过控制 PIN 二极管的工作通断来改变上层金属贴片的单元组成结构,从而实现频率转换、极化转换等功能。

1 多功能吸波器的结构设计

图 1 为多功能吸波器单元的侧面结构示意图。从图中可以看出本文提出的多功能吸波器分为四层,上层为加载在上层介质层上的金属贴片层,第二层为上层介质层,中间层为金属板,最下层微带馈线加载在底层介质层上。

该多功能吸波器底微带馈电结构如图 2 所示,单元结构如图 3 所示。当中间“十”字形金属片不连接电源,“十”字形金属片的左边和下边的金属片连接正电压,此时一部分 PIN 二极管由于电压差导通,另一部分 PIN 二极管则由于馈电没有连接电源而断开,整个上层金属贴片电路呈现简单的周期性“十”字结构;当中间“十”字金属片通过馈电连接电源负极,其他贴片连接馈电电源正电压,这时一部分 PIN 二极管导通,而另一部分 PIN 二极管由于没有电压差而断开,整个上层金属贴片呈现“耶路撒冷十”字与简单“十”字交替排列的结构。由此可见,馈电方式的改变造成上层金属片组成结构的变化,最终得到双频点吸波器。

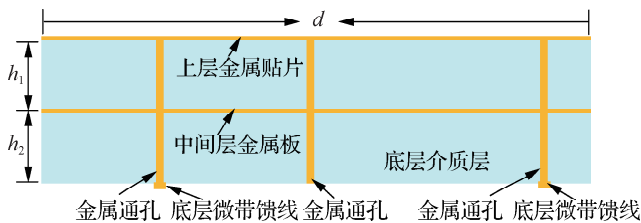


图1 多功能吸波器单元侧面结构

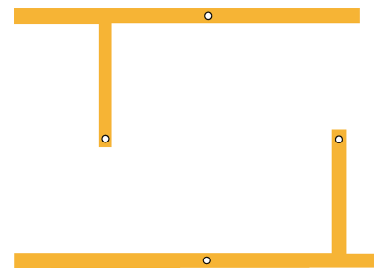


图2 多功能吸波器底微带馈电结构

2 多功能吸波器的等效电路分析

等效电路法(equivalent circuit method, ECM)可以快速分析简单频率选择表面结构,将频率选择表面等效为电感电容元件,通过公式可以求得元器件的阻值,再根据等效电路结合传输线原理得出结构的频响特性。该方法可以用来辅助设计优化吸波器结构,提高设计效率^[16-17]。

如图 3 所示,中间“十”字金属片等效为电感,“十”字金属片与上面“T”字金属片用 PIN 二极管连接,连接部分等效为二极管和电容并联,“T”字金属片等效为电感,“T”字金属片与上面的“一”字金属片等效为电感,中间连接部分等效为二极管和电容并联。等效电路如图 4 所示,当外加控制电源为正电压时,二极管 $D1$ 导通, $D2$ 截止,等效电路变为由 $L2$ 、 $C2$ 、 $L3$ 串联后与 $L1$ 并联构成的谐振电路,即“耶路撒冷十”

字结构的等效电路,吸波器结构应会产生 2 个谐振频点。当外加控制电源为负电压时,二极管 $D1$ 截止, $D2$ 导通,等效电路变为由 $L1$ 、 $C1$ 串联枝节和 $L2$ 、 $L3$ 串联枝节并联而成的谐振电路,即“十”字结构的等效电路,吸波器结构同样会产生 2 个谐振频点。

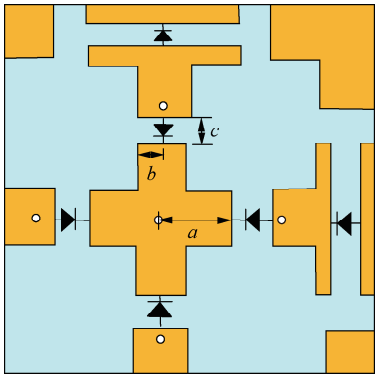


图 3 多功能吸波器单元结构的上层“十”字金属贴片

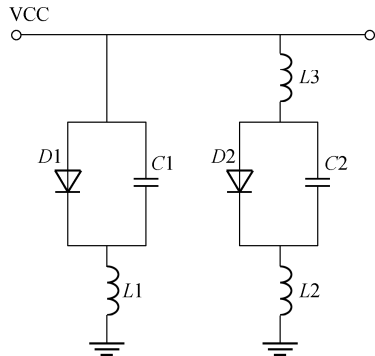


图 4 多功能吸波器单元结构的上层金属贴片等效电路

通过传输线理论推导等效电感的近似值 L_p 和电容的近似值 C_p 分别如下：

$$L_p \propto \mu_0 \frac{L}{2\pi} \left(\frac{1}{\sin(\omega\pi/2L)} \right) \tag{1}$$

$$C_p \propto \epsilon_0 (1 + \epsilon_r) \frac{L_{\text{slot}}}{\pi} \ln \left(\frac{1}{\sin(g\pi/2L_{\text{slot}})} \right) \tag{2}$$

其中, ϵ_0 和 μ_0 分别是自由空间的介电常数和磁导率; ϵ_r 是基板的相对介电常数; L 是“十”字金属片中一个枝节的长度($2a$)(图 3); ω 是“十”字金属片中一个枝节的宽度($2b$)(图 3); L_{slot} 是 2 个相邻“T”字金属片之间耦合缝隙的长度; g 是耦合缝隙的宽度。由式(1)可知等效电感值与 L 成正比,由式(2)可知等效电容值与 L_{slot} 成正比,与 g 成反比。根据等效电路理论,可以通过改变单元结构中金属带线与耦合缝隙的宽度来改变吸波器结构的工作频率,实现“耶路撒冷十”字形和简单“十”字形交替排列,简单“十”字结构在不同频段工作,由此获得双频段频率的可调吸波器。

经过优化后,本文所提出多功能吸波器的具体参数如表 1 所示,上层和底层介质层厚度均为 2 mm,单元结构为正方形且边长 w_1 为 25.6 mm,中间“十”字金属贴片的臂长 a 为 4.3 mm,臂宽 b 为 2.2 mm,“十”字形金属贴片两臂之间的间隔 c 为 2 mm,上层和底层介质层的材料均为 Teflon,相对介电常数 ϵ_r 为 2.1,损耗角正切 δ 为 0.002。对于吸波体来说,其整体吸收率为 A , $A=1-R-T$, R 为反射率且 $R=|S_{11}|^2$,其中 S_{11} 为反射系数, T 为传输率且 $T=|S_{21}|^2$,其中 S_{21} 为传输系数。而当透射率 $T=0$ 时,吸收效果较好,该结构由于中间层设置为金属地板,因此满足 $T=0$ 这一要求。多功能吸波器上层周期性结构如图 5 所示。

表 1 多功能吸波器单元结构参数

参数	数值
单元结构边长(w_1)/mm	25.6
上层介质层厚度(h_1)/mm	2
底层介质层厚度(h_2)/mm	2
中间“十”字金属贴片的臂长(a)/mm	4.3
中间“十”字金属贴片的臂宽(b)/mm	2.2
“十”字形金属贴片两臂之间的间隔(c)/mm	2
相对介电常数(ϵ_r)	2.1
损耗角正切(δ)	0.002

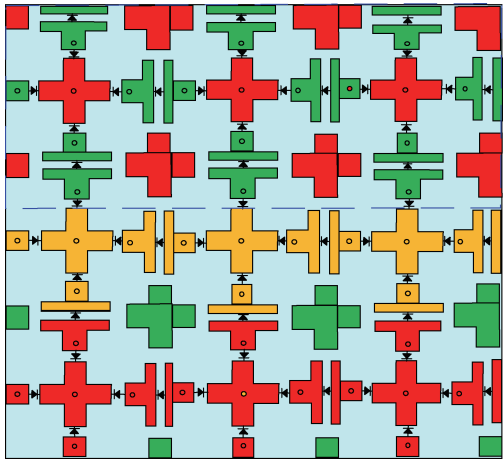


图 5 多功能吸波器上层周期性结构

3 多功能吸波器的仿真结果与分析

3.1 TE 极化波下仿真分析

通过 CST Studio Suite 2020 仿真软件得到垂直入射时 TE 极化波下“耶路撒冷十”字与简单“十”字交替排列结构吸波器的反射系数,结果如图 6 所示。吸波器工作时的连接方式参见图 3 和图 5,中间“十”字形金属片通过底层微带馈电连接电源负极,上下左右 4 个金属贴片通过底层微带馈电连接正电压,由于二极管具有单向导电性,因此与中间“十”字金属片的 4 个臂连接的 PIN 二极管处于导通状态,而其他二极管处于断开状态,从而得到上层金属片的组成结构为“耶路撒冷十”字与简单“十”字交替排列组合。从图 6 中可以看出,吸波频点分别为 8.95 GHz 和 15.32 GHz,反射系数 S_{11} 分别约为 -6 dB 和 -12 dB,由此可见高频点的吸波能力较强。由上述结果可以看出,该结构的这种连接方式可以得到工作在 TE 极化波下双频段的吸波器。

垂直入射为 TE 极化波下的简单“十”字结构吸波器,组成方式为中间“十”字形金属片不连接电源,右下金属贴片通过馈电接地,左上金属贴片通过馈电接正电压,则与中间“十”字形金属片 4 个臂连接的 PIN 二极管处于断开状态,其他二极管处于导通状态,上层金属片组成的结构为简单“十”字形(图 3,图 7)。图 7 为 TE 极化波下简单“十”字结构的吸波器双频段反射系数曲线,从图中仿真结果可以看出,吸波频点为 9.12 GHz 和 14.28 GHz, S_{11} 分别约为 -12 dB 和 -7.96 dB,可见低频点 9.12 GHz 的吸波能力较强。由此可得,在 TE 极化波入射时,通过调节底层微带馈电来控制二极管的工作状态,实现上层金属贴片组成结构的改变,双频段频率的可调。

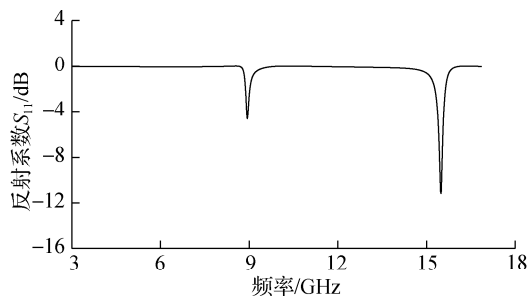


图 6 TE 极化波下“耶路撒冷十”字形和简单“十”字形交替排列结构的吸波器双频段反射系数曲线

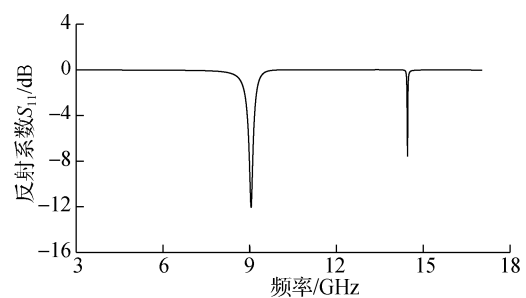


图 7 TE 极化波下简单“十”字结构的吸波器双频段反射系数曲线

3.2 TM 极化波下仿真分析

从图 8 的反射系数曲线可以看出,吸波频点为 8.98 GHz 和 15.18 GHz, S_{11} 分别约为 -6.3 dB 和 -12.2 dB,由此可见,高频点的吸波能力比低频点强。根据传输线理论和等效电路理论可知,减小“十”字结构中金属片的长度,相应的等效电感则会减小,增大相邻“T”字金属片间缝隙的宽度,相应的等效耦合电容会减小,吸波器结构的吸波频点会增加。反之,如果减小“十”字结构中金属片的宽度,减小相邻“T”字金属片间缝隙的宽度,则相应的等效电感与等效耦合电容会增大,吸波器结构的吸波频点会降低。

图 9 为垂直入射时 TM 极化波下简单“十”字形结构吸波器双频段的反射系数,组成结构与 TE 极化波时相同。从图 9 可以看出,吸波频点为 9 GHz 和 14.36 GHz, S_{11} 分别约为 -12.3 dB 和 -8 dB,由此可见,低频点的吸波能力比高频点强。通过调整最下层微带线的馈电方式,来控制二极管的通断,改变上层金属贴片的组成结构,最终实现双频段频率的可调吸波器。与交替排列结构相似,减小“十”字结构中金属片的长度,或者增加金属片的宽度,增大相邻“T”字金属片间缝隙的宽度,相应的等效电感则会减小,同时相邻“十”字结构间的等效耦合电容会减少,吸波器结构的吸波频点会增加。反之,如果增大“十”字结构中金属片的长度,或者减小金属片的宽度,减少相邻“T”字金属片间缝隙的宽度,相应的等效电感和等效电容会增大,吸波器的吸波频点会降低。

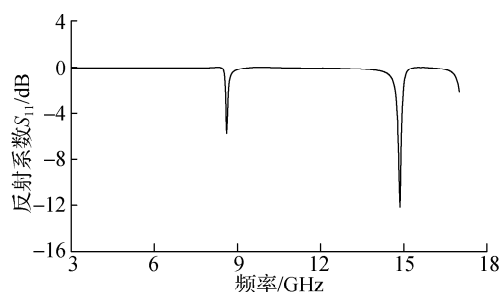


图 8 TM 极化波下“耶路撒冷十”字形和简单“十”字形交替排列结构的吸波器双频段反射系数曲线

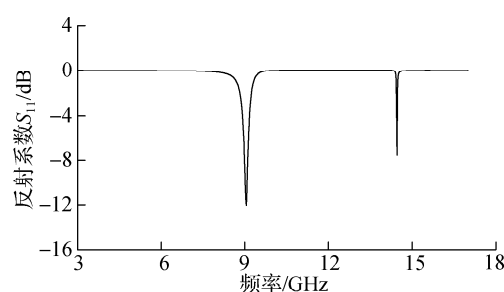


图 9 TM 极化波下简单“十”字形结构的吸波器双频段反射系数曲线

由上述的 TE 和 TM 极化波入射的结果可以看出,虽然极化方式不同但得到的 2 个频点的谐振频段和规律基本一致,极化的转换对工作状态带来的影响几乎可以忽略,因此可以得出该可重构有源频率选择表面的设计结构对极化方式不敏感,可同时满足双极化工作条件要求。

3.3 表面电流分布

图 10 中间的“十”字金属贴片与周围的“T”字金属片构成了“耶路撒冷十”字,以中间“十”字金属片与上方和右方的“T”字金属片的电流分布为例来说明。从图 10 可以看出,中间“十”字金属片与上方“T”字金属片的二极管连接处呈现红色,可见电流值较大且电流密度约为 $1.37 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,可以判断为二者为导通状态;中间“十”字金属片与右方“T”字金属片颜色相似,可见电流呈现流动性,二极管处于导通的状态;而右方的“T”字金属片电流分布较小与右边电流分布较大的“T”字金属片可以判断为断开的状态;右上角半个“十”字金属片电流密度较大可判断为导通状态,其他分析类似。因此可以推出上层金属片的连接方式为“耶路撒冷十”字和简单“十”字交替排列结构,电流密度分布范围为 $0 \sim 1.37 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。同理可分析图 11 中上层金属片的电流分布,得出该组成结构为简单“十”字排列与实际结果一致,电流密度的分布范围为 $0 \sim 2.12 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

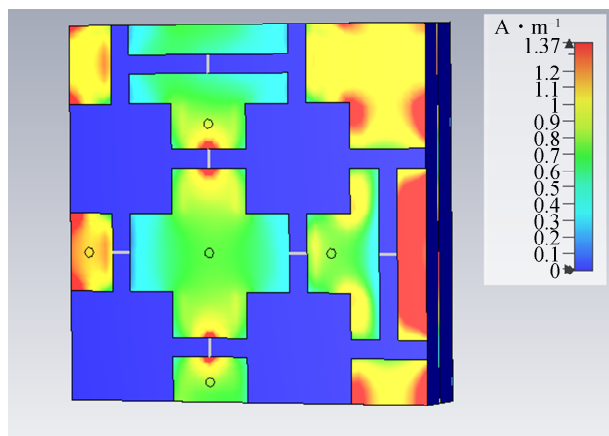


图 10 “耶路撒冷十”字和简单“十”字交替排列结构的吸波器的表面电流分布

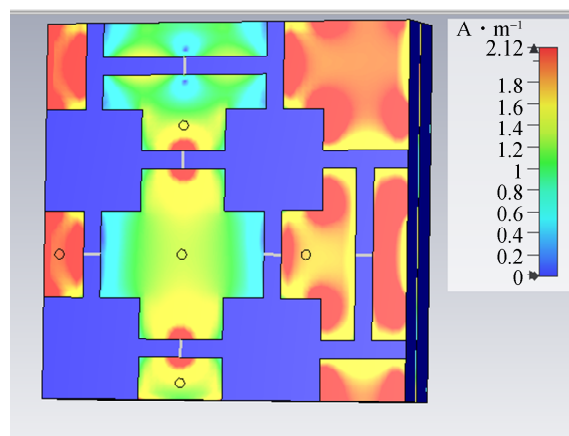


图 11 简单“十”字结构的吸波器的表面电流分布

4 结 语

本文设计了一种多层结构的基于有源频率选择表面的多功能吸波器,通过改变底部微带馈电方式来控制二极管的工作状态,使得上层金属贴片组成形状发生变化,分别为“耶路撒冷十”字与简单“十”字交替排列和简单“十”字结构,工作频段均在 9 GHz 和 15 GHz 附近,带宽满足吸波器的设计要求,且这两种结构均具有双频段可调谐及极化转换等特性。与现有结构相比,本文设计的多功能吸波器能够通过简易操

作来控制二极管的通断,从而实现可重构多功能的切换效果,为吸波器用于复杂电磁环境和一体化设计提供了良好的技术方案和应用前景。

参考文献:

- [1] FALLAHI A, YAHAGHI A, BENEDICKTER H, et al. Thin wideband radar absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 58(12): 4051 – 4058
- [2] LIU J C, LIU C Y, KUEI C P, et al. Design and analysis of broadband microwave absorber utilizing FSS screen constructed with circular fractal configurations[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2006, 48(3): 449 – 453
- [3] KONG P, YU X, LIU Z. A novel tunable frequency selective surface absorber with dual-DOF for broadband applications[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 30217 – 30224
- [4] YAN M, QU S, WANG J, et al. A miniaturized dual-band FSS with stable resonance frequencies of 2.4GHz/5GHz for WLAN applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 895 – 898
- [5] LI H Y, CAO Q S, WANG Y. A novel 2-B multifunctional active frequency selective surface for LTE-2.1 GHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6): 134 – 140
- [6] WU X, HU C, WANG Y, et al. Active microwave absorber with the dual-ability of dividable modulation in absorbing intensity and frequency[J]. AIP Advances, 2013, 3(2): 022114-1 – 022114-8
- [7] 杨作成. 基于有源 FSS 结构的单层可调微波吸收体[D]. 西安: 西北工业大学, 2007
- [8] 朱敏. 可电控 FSS 透波与吸波特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2008
- [9] 徐欧, 朱敏. 双层方环可电控 FSS 吸波材料设计和实验研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(5): 837 – 843
- [10] 高祥. 基于频率选择表面的吸波结构设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
- [11] 强宇. 有源频率选择吸收表面的研究与实现[D]. 郑州: 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学, 2020
- [12] 魏永安. 基于 PIN 管和电感的可切换频率选择表面设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019
- [13] 邢文家, 王毅, 唐守柱, 等. 一种 S 波段宽带透波的吸透一体超材料[J]. 现代雷达, 2020, 42(11): 54 – 60
- [14] 王健. 基于可重构 FSS 的天线罩研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020
- [15] 周仕浩, 房欣宇, 李猛猛, 等. S/X 双频带吸波实时可调的吸波器[J]. 物理学报, 2020, 69(20): 226 – 234
- [16] 郑光明, 王雪纯, 汪岩. 小型化宽阻带多层宽带频率选择表面研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 57 – 60
- [17] 祁雪峰, 张涛, 王焱, 等. 基于十字单元新型有源频率选择表面的研究[J]. 飞机设计, 2020, 40(3): 50 – 52

(责任编辑: 谭彩霞)