

文章编号: 2095-4980(2018)05-0864-04

## 低频段超薄微波吸波片带宽展宽研究

叶 璐, 窦文斌, 高 平

(东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 低频段厚度超薄的吸波片带宽很难展宽, 为此设计了一种加载集总电阻的三方环嵌套吸波器, 介质基板采用高介电常数的材料, 从而实现在低频段的带宽展宽, 并进行了理论分析与仿真。仿真结果表明, 该吸波器吸波峰在 1.33 GHz 左右, 在 1.3~1.35 GHz 有超过 90% 的吸收率, 且极化不敏感, 可实现宽入射角的吸波性能。最后, 对介质的厚度、介电常数对吸波器性能的影响做了简要分析。

**关键词:** 片状吸波器; 极化稳定; 宽频带; 集总电阻

**中图分类号:** TN713<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201805.0864

## Broadening bandwidth of microwave absorber in low frequency

YE Lu, DOU Wenbin, GAO Ping

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** The bandwidth of ultra-thin sheet absorber in low frequency is difficult to broaden; therefore, a thri-square loop nested absorber loaded with resistors is designed in this paper. The substrate with high dielectric is utilized to realize broadening the frequency bandwidth. The theoretical analysis and simulation verification is described. The absorption rate of the absorber between 1.3 GHz and 1.35 GHz is more than 90% and the peak of the absorption rate is about 1.33 GHz; the absorber is insensitive to polarization and achieves high absorption rate in wide incidence angle. The effect of thickness and dielectric constant of the substrate on the absorber performance is analyzed briefly.

**Keywords:** sheet absorber; polarization stability; broadband; lumped resistance

微波吸波器, 顾名思义, 是一种能够有效吸收电磁波的功能性材料, 当电磁波打到吸波器表面, 反射和透射都应非常小<sup>[1]</sup>。2008 年, Landy 等<sup>[2]</sup>根据超材料的电磁谐振特性制备出吸波性能接近 100% 的吸波器, 之后吸波器发展迅速, 随着研究不断深入, 相继提出各种极化稳定、宽入射角、宽频带和多频带的超材料吸波器, 并被应用于人体防护、信息安全、目标隐身及天线雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)缩减设计等<sup>[3]</sup>。但现阶段对工作频率在 1 GHz 左右的低频段吸波器研究较少, 虽然高频段的吸波器可以通过等比缩放到低频段, 但是厚度都特别厚。在吸波片厚度不超过 2 mm 的前提下, 要想实现较宽频带的吸波比较困难。

曹振新<sup>[4]</sup>设计的吸波器在 1 GHz 左右频率处实现了 100% 的吸收, 厚度仅为 1 mm, 但是频带非常窄, 只有 5 MHz 左右的吸波带宽。

为拓展吸波器带宽, 本文引入三方环嵌套结构, 并加载集总电阻, 采用高介电常数的介质基板增加结构谐振点, 以实现较宽的带宽。直接在吸波体结构中加入集总元件则可以方便地改变输入阻抗和损耗特性<sup>[5]</sup>。本文对原本较窄的吸波带宽进行展宽, 最终实现吸收率 90% 以上 50 MHz 的吸波频带。

### 1 吸波器的结构设计与仿真

#### 1.1 结构设计

吸波器是一种结构型吸波体, 由周期性吸波单元形成吸波阵列, 吸波器的吸收率计算公式一般为<sup>[3]</sup>:  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ , 如果第三层为金属面, 则没有波透过, 透射率为零, 此时上式为  $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。根据等

收稿日期: 2017-06-02; 修回日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471117)

效媒质理论，使得吸波器的等效阻抗与空间匹配，则可使  $R(\omega)$  为 0，则此时吸波率就可以为 1。而电磁波通过吸波器表面金属谐振损耗、介质谐振损耗、电阻损耗等被消耗<sup>[6-7]</sup>。

总的来说，电磁吸波材料研究的核心问题是如何调控吸波材料输入阻抗使其尽可能与自由空间的阻抗接近，二者达到匹配，从而获得低反射率，实现高吸收率<sup>[8-9]</sup>。

吸波片一般为 3 层结构，由顶层的金属图案、中间层的介质基板以及底层的金属短线或接地板组成<sup>[10-12]</sup>。本文设计的吸波片采用 3 层结构，单元结构如图 1 所示。上层为 3 个嵌套的金属方环，在方环的四边开缝加载集总电阻元件即为图中的  $R_1, R_2, R_3$ ，中间层为高介电常数的介质基板，最下层为连续金属板，吸波片单元边长为  $a$ ，表面金属图案最外面的金属环外围边长为  $b$ ，环宽  $W$ ，中间金属环外围边长为  $c$ ，环宽  $W_1$ ，最里面的环与中间环之间的缝隙为  $g_1$ ，内环宽  $W_2$ 。金属为铜，电阻率为  $5.8 \times 10^{-7} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ，铜的厚度为 0.02 mm。在 HFSS 中建模，所设计吸波片的中心工作频率为 1.33 GHz，根据以往低频段吸波器<sup>[2-4]</sup>的尺寸给出模型参量的初始值，且辅之以等效电路(如图 2 所示)对部分参数做估算，再在 HFSS 中对各参数进行优化仿真，观察各参数对吸波结果的影响。经过优化后单元结构参数具体为： $a=6 \text{ mm}$ ， $b=5.6 \text{ mm}$ ， $c=3.4 \text{ mm}$ ， $g_1=0.2 \text{ mm}$ ， $h=2 \text{ mm}$ ， $e=0.2 \text{ mm}$ ， $W=0.9 \text{ mm}$ ， $W_1=0.8 \text{ mm}$ ， $W_2=0.6 \text{ mm}$ ；电阻值由外向内依次为  $400 \Omega$ ， $350 \Omega$ ， $10 \Omega$ ；介质基板介电常数为 300，损耗角正切为 0.001。

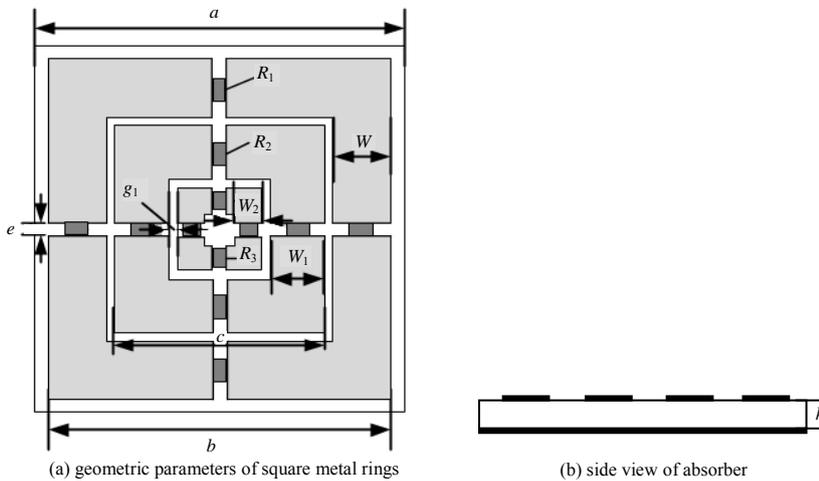


Fig.1 (a) geometric parameters of square metal rings, (b) side view of absorber  
图 1 (a) 金属方环几何参数, (b) 吸波片结构侧视图

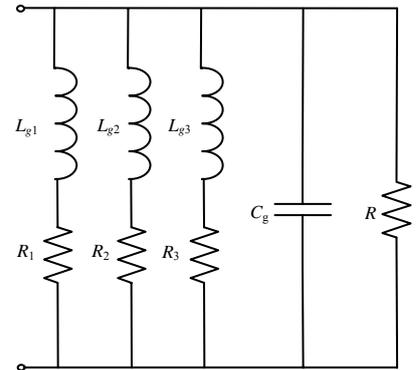


Fig.2 Equivalent circuit of metamaterial absorber  
图 2 超材料吸波器的等效电路

### 1.2 HFSS 仿真结果及分析

用上述结构及参数，在 HFSS 中进行仿真求解，采用主从边界条件模拟单元周期性结构，采用 Floquet 激励，最终的仿真结果如图 3(a)所示，在 1.3~1.35 GHz 实现 0.9 以上的吸收率。改变入射角度观察吸收效果，在 60° 以内的斜入射可以实现较好的吸收效果，且在垂直入射时改变入射波的电场方向，吸波率无明显变化，所以该吸波片在 1.33 GHz 附近实现 50 MHz 的吸收效果，且极化不敏感，入射角不敏感。在设计仿真时，先对双方环图案的周期表面结构进行仿真与优化，然后再尝试三方环图案的周期表面结构，发现三环的吸收效果比双环的吸收效果略好一点。因为方环间的缝隙(图 1 中的  $g_1$ )可等效为电容，且加一环多了等效电感  $L_{g3}$  和加载的电阻  $R_3$ ，可调节的参数变多，使吸波片等效阻抗与自由空间更加匹配。

对无集总元件的结构进行仿真，金属方环尺寸不变，此时的吸波效果如图 4(a)所示，可见吸收效果不好，电阻元件对吸波效果有贡献。采用高介电常数，是因为先前仅对介质基板和底层连续金属板进行仿真时，当介电常数超过 100 时，在低频处会有较强的吸波峰存在。对仅有介电常数为 300 的基板和底层金属板的结构进行仿真，适当调节介质的损耗角正切，在损耗角正切为 0.1 时，仿真结果如图 4(b)所示，在低频有吸波率接近 100% 的吸波峰，此时的吸波峰在 2.4 GHz 左右，因为此时介质表面没有金属结构，表面周期金属结构影响吸波片的工作频率。如图 5(a)所示，仅改变所设计吸波器介质基板的介电常数，可见随着介电常数的升高，吸波频率向低频偏移，而吸波带宽变窄，所以高介电常数的介质基板能实现低频段超薄吸波器，但考虑到吸波带宽，并不是介质基板的介电常数越高越好。如图 5(b)所示，仅改变介质基板的厚度，可见随着厚度的增加，吸波频率向低频偏移且带宽不变，所以增加厚度可以实现低频段吸波器带宽的展宽，但本文所设计的是超薄吸波片，所以设计时厚度有一定的限制。

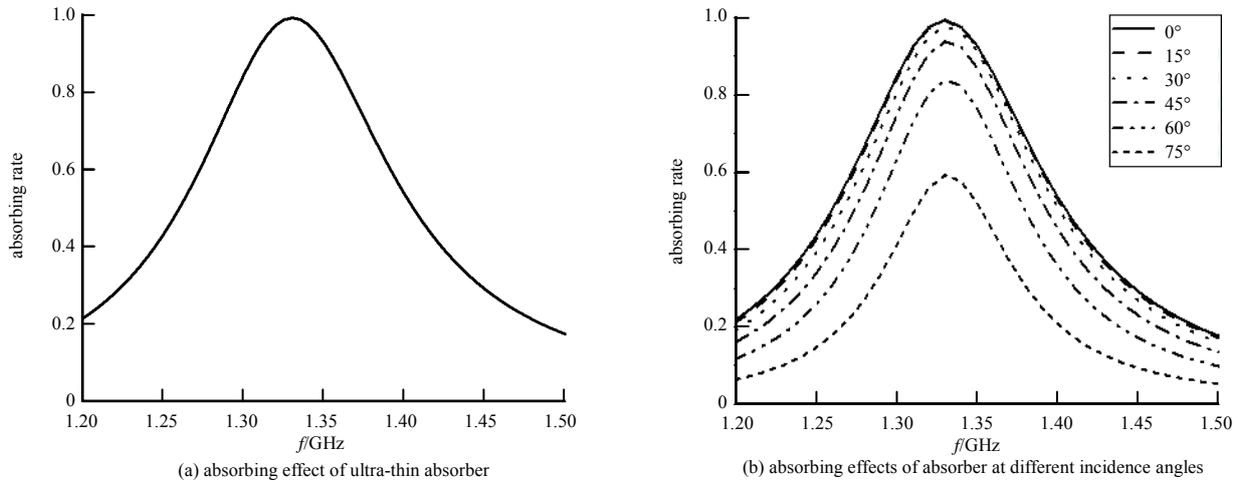


Fig.3 (a) absorbing effect of ultra-thin absorber; (b) absorbing effects of absorber at different incidence angles  
图 3 (a) 超薄吸波片吸波效果图; (b) 不同入射角时的吸波片吸波效果图

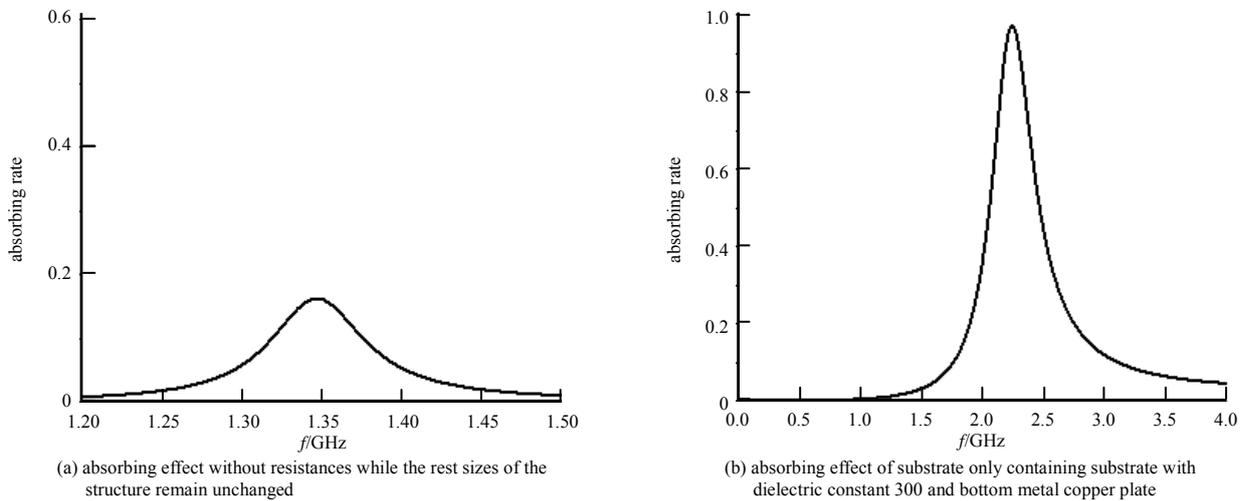


Fig.4 (a) absorbing effect without resistances while the rest sizes of the structure remain unchanged; (b) absorbing effect of substrate only containing substrate with dielectric constant 300 and bottom metal copper plate  
图 4 (a) 无电阻其余结构尺寸保持不变时的吸波效果图; (b) 仅有介电常数 300 的介质基板及底层金属铜板时的吸波效果图

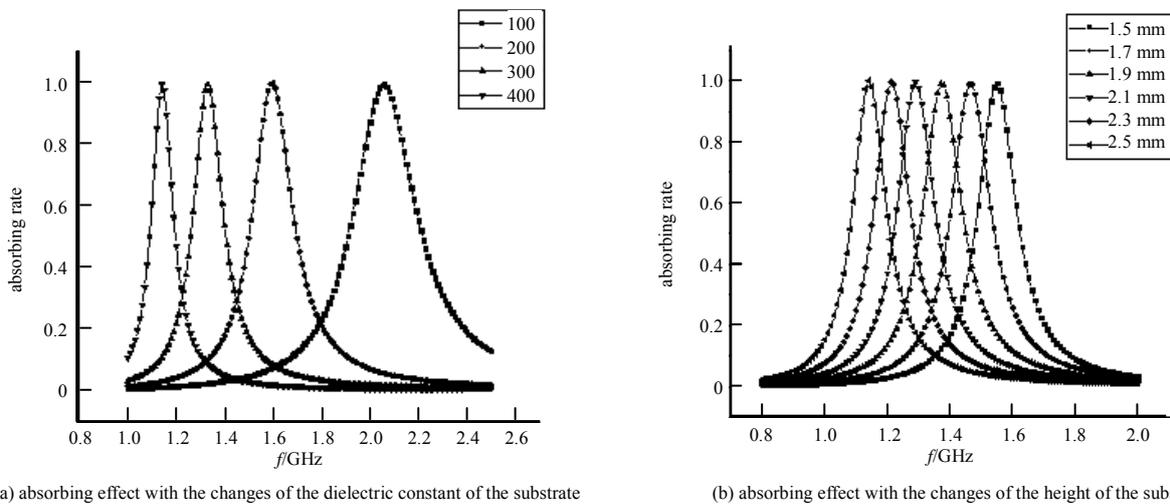


Fig.5 (a) absorbing effect with the changes of the dielectric constant of the substrate; (b) absorbing effect with the changes of the height of the substrate  
图 5 (a) 介质基板介电常数变化时吸波片吸波效果变化图, (b) 介质基板厚度变化时吸波片吸波效果变化图

## 2 结论

本文设计了一种在 1.3~1.35 GHz 可实现 50 MHz 吸收效果的厚度为 2 mm 的超薄吸波片，且在中心频点处吸波效果接近 100%，极化稳定，入射角不敏感。对无集总元件的吸波结构进行仿真，仿真效果变差，电阻在这里可以调节吸波器等效阻抗，使之与自由空间匹配。而当介质介电常数较高时，介质本身对吸波效果有一定的贡献，所以引入集总元件且用高介电常数的介质基板可以对展宽低频带宽有一定帮助。

### 参考文献：

- [1] 庞永强. 电磁吸波超材料理论与设计研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013. (PANG Yongqiang. The theory and design of metamaterial absorbers[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2013.)
- [2] LANDY N I,SAJUJIGBE S,MOCK J J,et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008,100(20): 207402-1-207402-6.
- [3] 李文慧,张介秋,屈绍波,等. 基于宽带吸波体的微带天线雷达散射截面缩减设计[J]. 物理学报, 2015,64(8):084101-1-084101-7. (LI Wenhui,ZHANG Jieqiu,QU Shaobo,et al. Radar cross section of microstrip antenna based on wide-band metamaterial absorber[J]. Acta Physica Sinica, 2015,64(8):084101-1-084101-7.)
- [4] CAO Z X,YUAN F G,LI L H. A super-compact metamaterial absorber cell in L-band[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(18):184904-1-184904-6.
- [5] 赵碧辉,文岐业,谢云松,等. 电磁超材料吸收器的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2011,30(11):82-86. (ZHAO Bihui, WEN Qiye,XIE Yunsong,et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorber[J]. Electronic Components & Materials, 2011,30(11):82-86.)
- [6] 杨阳. 电磁超材料吸波结构的研究及优化[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012. (YANG Yang. Study on metamaterial absorbers and optimization[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2012.)
- [7] 杨曙辉,陈迎潮,王文松,等. 一种基于超材料的极化无关超宽带吸波器[J]. 电波科学学报, 2015,30(5):834-841. (YANG Shuhui,CHEN Yingchao,WANG Wensong,et al. A metamaterial-based ultra wideband absorber with polarization independent[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015,30(5):834-841.)
- [8] 王莹,程用志,聂彦,等. 基于集总元件的低频宽带超材料吸波体设计与实验研究[J]. 物理学报, 2013,62(7):202-206. (WANG Ying,CHENG Yongzhi,NIE Yan,et al. Design and experiments of low-frequency broadband metamaterial absorber based on lumped elements[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(7):202-206.)
- [9] 姚博锋. 基于 Metamaterials 薄型吸波结构的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (YAO Bofeng. Study of thin absorbing structures using metamaterials[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [10] 王国栋. 电磁超材料的设计及其吸波性能的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014. (WANG Guodong. The design of electromagnetic metamaterials and its absorption characteristics[D]. Wuhan,China:Huazhong University of Science and Technology, 2014.)
- [11] 刘凌云,张政军,刘力鑫. 基于集总电阻的宽频带超材料吸波器研究[J]. 微波学报, 2016,32(5):50-54. (LIU Lingyun, ZHANG Zhengjun,LIU Lixin. Research on broadband metamaterial absorber based on lumped resistance[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(5):50-54.)
- [12] YANG Juan,SHEN Zhongxiang. A thin and broadband absorber using double-square loops[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007(6):388-391.

### 作者简介：



叶 璐(1993-), 女, 江苏省泰兴市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术,email:13913020716@163.com.

窦文斌(1954-), 男, 云南省曲靖市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波理论技术、准光技术、毫米波与亚毫米波焦面阵成像等.

高 平(1989-), 男, 江苏省高邮市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.