

# 一种基于集总电阻加载的小型化超宽带超材料吸波体设计

吕世奇 高军\* 曹祥玉 兰俊祥 李思佳 张国雯

(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

**摘要:** 为提高吸波体吸波效率, 该文设计了一种基于集总电阻加载的小型化超宽带超材料吸波体结构, 该结构通过纵向级联的方式, 结合上下两层吸波体结构拓展了带宽。通过等效电路分析得到该吸波体在宽频带内具有良好的阻抗匹配, 并通过电流分析验证了吸波机理。整个吸波体的单元大小仅为 $0.089\lambda_L \times 0.089\lambda_L$  ( $\lambda_L$ 为该结构最低吸波频率所对应的波长)。厚度为 $0.078\lambda_L$ 。仿真结果表明: 在2.24~16.14 GHz吸波率始终大于90%, 相对带宽达151%。制备相应实物并进行测试, 实测结果与仿真结果基本吻合。

**关键词:** 超材料; 超宽带; 吸波体; 集总电阻

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)06-1330-06

DOI: 10.11999/JEIT180648

## A Design of Ultra-broad-band Miniaturized Metamaterial Absorber Based on Loading Lumped Resistances

LÜ Shiqi GAO Jun CAO Xiangyu LAN Junxiang

LI Sijia ZHANG Guowen

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

**Abstract:** A metamaterial absorber is designed, fabricated and experimentally demonstrated to realized ultra-wideband absorption based on loading lumped resistances to raise the efficiency of absorber. The proposed structure comprises of an upper absorber and an under absorber by longitudinal cascade to expand bandwidth. The analysis of equivalent circuit show that the absorber has good impedance matching in a wide frequency band and the mechanism of wave absorption is verified by current analysis. The size of the unit is only about  $0.089\lambda_L \times 0.089\lambda_L$ , where  $\lambda_L$  is the wavelength of the lowest frequency, and the total thickness of the absorber is only  $0.078\lambda_L$ . Simulated and experimental results show that the absorber exhibits absorptivity above 90% from 2.24 GHz to 16.14 GHz, and the relative absorption bandwidth is about 151%. Measurement results show good agreement with the numerically simulated results.

**Key words:** Metamaterial; Ultra-wideband; Absorber; Lumped resistances

### 1 引言

随着雷达技术和隐身技术的不断发展, 传统隐身方式(诸如采用涂覆吸波材料)因其许多缺点而无

法满足需求。超材料吸波体是由金属结构和介质基板构成的一类结构型吸波材料。相对于传统的吸波材料, 超材料吸波体具有厚度薄、质量轻、吸收强、频带宽以及材料电磁参数可设计等诸多优势, 在射频隐身领域具有重要的潜在应用价值。

2008年Landy等人<sup>[1]</sup>首次提出了一种利用超材料的电磁耦合特性的完美超材料吸波体(Metamaterial Absorber, MA), 引起了国内外学者的广泛关注并应用于天线上<sup>[2-5]</sup>。由于其存在吸收带宽窄的问题, 因此, 宽带超材料吸波体(WideBand Metamaterial Absorber, WBMA)也成为了研究热点。

为了拓展WBMA的吸波带宽, 近年来很多学者利用不同的方法在该方面进行了探索。平面上多近似结构的谐振级联技术<sup>[6-9]</sup>, 电阻、电容等有源器件加载技术<sup>[10,11]</sup>和磁性介质基板应用<sup>[12]</sup>等方案被

收稿日期: 2018-07-03; 改回日期: 2019-01-14; 网络出版: 2019-01-30

\*通信作者: 高军 gjgj9694@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61471389, 61501494, 61671464, 61701523), 陕西省自然科学基金(2017JM6025), 博士后创新人才支持计划(BX20180375), 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20170107)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471389, 61501494, 61671464, 61701523), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JM6025), The Postdoctoral Innovative Talents Support Program of China (BX20180375), The Young Talent fund of University Association for Science and Technology in Shaanxi, China (20170107)

相继提出，这些方法都不同程度拓展了WBMA吸波带宽。本文基于纵向级联与加载集总电阻的方法，将两种不同频段的吸波体组合，极大地拓展吸波体带宽，实现了相对带宽达到151%的超宽带吸波。上层吸波体结构通过梯形金属贴片之间的电容耦合，增加了等效电容值，降低了谐振频率，并在中层添加矩形金属环和集总电阻的形式拓展了带宽。通过空气层与介质层组合的方式，实现了在低频段的高吸波率。加载集总电阻有效地改善了单元的阻抗匹配特性，实现了吸波体的电磁隐身特性。并且其单元大小仅为 $0.089\lambda_L \times 0.089\lambda_L$ ，厚度仅为 $0.078\lambda_L$ 。

## 2 复合结构设计

### 2.1 复合结构

本文设计的吸波体是一个复合结构，为了扩展吸波率吸波体的吸波频带，试图将两种吸波体，通过级联的方式实现超宽带的吸波效果。最终选择引入矩形金属环结构取代梯型金属贴片结构的金属地板，实现在带宽上的级联。

图1为本文所设计的超宽带吸波体单元结构示意图。图1(a)为WBMA<sub>1</sub>结构为加载集总电阻的梯形金属贴片，其中梯型贴片与中间方形贴片是金属铜，电导率 $\sigma=5.8 \times 10^7$  s/m，矩形是集总电阻 $R_1$ ，电阻值为82  $\Omega$ 。其中， $c$ 表示相邻梯形金属贴片边缘之间的距离， $f$ 表示中间方形金属贴片的边长， $e$ 为梯形金属与方形金属之间的空隙大小。图1(b)为WBMA<sub>2</sub>单元结构示意图，结构是加载了集总电阻的矩形金属环，金属材质为铜，电导率 $\sigma=5.8 \times 10^7$  s/m，加载的集总电阻 $R_2$ ，电阻值为140  $\Omega$ 。

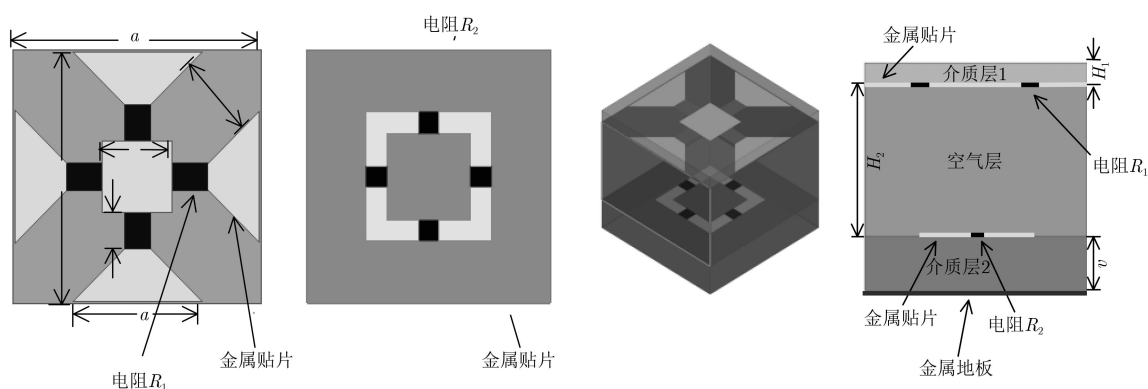


图1 超宽带吸波体单元示意图

表1 复合结构参数数值

参数	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$H_1$	$H_2$	$r$	$s$	$t$	$u$	$v$
尺寸(mm)	12.0	11.8	3.9	6.2	1.7	3.4	7.0	1.0	4.1	1.0	6.1	12.0	2.5

$r$ 为矩形金属环内边长， $t$ 为矩形金属环外边长， $u$ 为介质板边长， $v$ 为介质板厚度。

图1(d)中 $H_1$ 为WBMA<sub>1</sub>单元结构厚度，介质层1是介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ ，损耗角正切 $\tan \delta_r = 0.001$ 的聚四氟乙烯玻璃布板， $H_2$ 为空气层厚度， $v$ 为下层WBMA<sub>2</sub>单元结构厚度，介质层2是介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切 $\tan \delta_r = 0.02$ 的FR4介质板。最底层为金属地板。采用基于有限元法的商业软件Ansoft HFSS14.0进行仿真，得到最优解时各参数数值如表1所示。

### 2.2 数值仿真

利用Ansoft HFSS14.0对一个周期单元进行仿真，在垂直入射电磁波激励下仿真得到了相关吸波率的曲线。

通过仿真得到WBMA<sub>1</sub>未加载电阻与加载电阻时的吸波率，根据定义反射率 $R = |S_{11}|^2$ ，透射率 $T = |S_{21}|^2$ ，可以得到吸波率的定义式<sup>[13]</sup>

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - R - T \quad (1)$$

因为吸波体的底面为金属板，所以式(1)中 $T=0$ ，故吸波率为

$$A = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - R \quad (2)$$

由此可以得出吸波率特性曲线，如图2可以看出吸波率在2.24~16.14 GHz频段，吸波率大于90%。

如图3所示，未加载电阻时WBMA<sub>1</sub>吸波率均在0.07以下；加载电阻后，吸波率得以提升，而WBMA<sub>2</sub>未加载电阻时，由于电磁谐振使其在16.8 GHz存在一个吸收峰，加载电阻之后，其吸波带宽得到了拓展，吸波率也得到了提升，充分说明了加载电阻是改善吸波特性的有效方法。并且图3中可以看出加

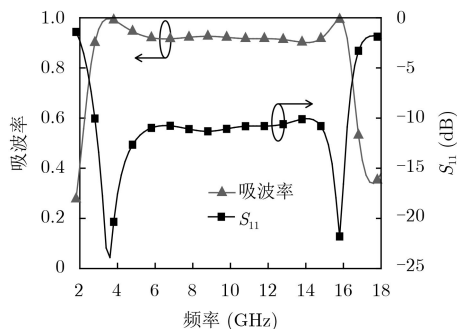
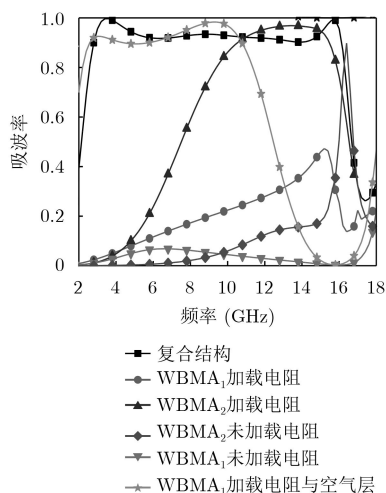
图2 复合结构 $S_{11}$ 与吸波率曲线

图3 吸波特性对比曲线

载电阻的WBMA<sub>1</sub>单元, 添加空气层之后, 吸波率得到了大幅提升并且吸波频段向低频移动, 说明加载空气层可以有效地改善吸波特性。

由图3可以看出经过型金属吸波结构与矩形金属环吸波结构进行级联之后, 形成的复合型吸波结构在2.24~16.14 GHz吸波率始终大于90%, 相对带宽达151%。说明级联是一种有效拓展带宽的方法。

### 3 结构分析

#### 3.1 等效电路分析

根据等效电路理论<sup>[14-19]</sup>, 可知复合结构的等效电路如图4所示,  $L_1$ 为WBMA<sub>1</sub>等效的电感,  $C_1$ 为WBMA<sub>1</sub>的等效电容,  $R_0$ 为上层超材料的特性阻抗,  $R_1$ 为上层所加载的集总电阻, 介质层的损耗等效成 $R$ 。通过单元之间的梯形金属贴片, 增强了单元之间的电容耦合, 从而增加了等效电容 $C$ 的容值, 进而实现了单元设计的小型化。 $L_2$ 为WBMA<sub>2</sub>的电感,  $C_2$ 代表WBMA<sub>2</sub>的等效电容,  $R_3$ 为下层超材料的特性阻抗,  $R_2$ 为下层所加载的集总电阻, 介质层的损耗等效成 $R_4$ , 接地板等效为电感 $L_1$ 。集总电阻对电磁波的吸收起主要作用, 通过优化阻值 $R$ 与 $R_3$ 以达到最优的吸波特性, 实现低频宽带吸波。

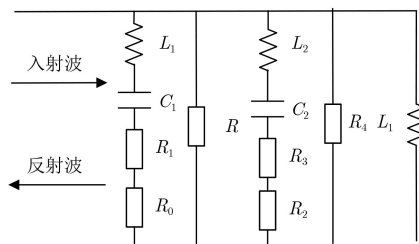


图4 等效电路图

对于垂直入射的平面波, 吸波体的表面反射系数为

$$R = \frac{Z_{\text{eff}}(\omega) - \eta_0}{Z_{\text{eff}}(\omega) + \eta_0} \quad (3)$$

其中,  $\eta_0$ 为自由空间波阻抗,  $Z_{\text{eff}}$ 为WBMA单元的等效阻抗。对于厚度为 $h$ 的吸波体单元, 根据等效媒质理论可知, 其等效阻抗为

$$Z_{\text{eff}}(\omega) = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (4)$$

从图5可以看出复合结构在3.48 GHz, 8.88 GHz以及15.80 GHz处出现3个吸收峰, 吸波率分别为99.84%, 93.64%以及99.05%, 其等效阻抗实部接近377  $\Omega$ , 虚部接近于0, 与理论分析一致。

等效电容主要由于上层梯形金属片之间的距离决定, 因此 $c$ 的大小决定了相邻单元之间的等效电容值, 由图6(a)可以看出当 $c$ 取3.92 mm时, 各个吸收峰得以良好衔接, 有效地拓展了吸波带宽, 并且保持了吸波率在频带内的稳定。因此, 选择 $c$ 值取3.92 mm。可以看出 $c$ 越小, 电容耦合越强。随着 $c$ 的减小, 吸波频段向低频移动, 但在低频段的吸波率逐渐减小, 在高频段的吸波率逐渐增大。同理, 矩形金属环边长 $t$ 也可以决定电容大小, 由图6(b)可以看出当 $t$ 取6.14 mm时, 该结构可以保持良好的吸波特性, 相较于频段向低频移动, 吸波率的平缓均匀变化更为重要, 因此选择 $t$ 值取6.14 mm。空气层的厚度也影响了吸波体的带宽, 由图6(c)可以看出随着空气层厚度的增加, 吸波曲线向低频偏

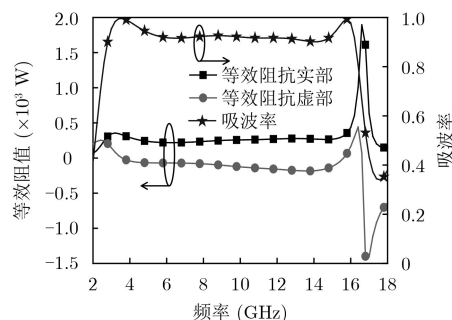


图5 等效阻抗与吸波率曲线

移，而吸波率略有恶化，出于吸波率与吸波带宽的双重考虑，选择空气层高度 $H_2$ 为7.00 mm。

### 3.2 表面电流分析

图7分别给出了复合结构在TM极化下的3.48 GHz, 8.88 GHz以及15.80 GHz的电磁波照射下，上下两层吸波体的表面电流分布图，箭头越大代表了电流越强。从图中可以看出，在频率为3.48 GHz时，梯型金属贴片之间的电阻表面电流幅度很大，吸波明显。下层矩形金属环之间的电阻基本没有吸波；在频率为8.88 GHz时，上下两层吸波体的电阻表面电流幅度较大，说明在该频点两层吸波体确实都起到了吸波作用；而在频率为15.80 GHz下层矩形金属

环之间电阻电流幅度较大，而上层梯型金属贴片之间的电阻上的电流幅度则非常微弱。

通过分析再一次说明了在低频段主要由上层吸波体起作用，而在高频段主要由下层吸波体起到吸波作用，中间频段则由两者共同吸波，肯定了级联法的作用，证实了该方法可以通过结合上下两层结构有效地拓宽频带。

从图8中可以看出，上层梯型金属结构电阻为70  $\Omega$ 与100  $\Omega$ 时，两个吸收峰相距较远，而电阻值为85  $\Omega$ 时，两个吸波峰靠拢在一起，可以在频段内有效地实现了吸波带宽的扩展，并且吸波曲线更为平缓均匀，所以选取85  $\Omega$ 。

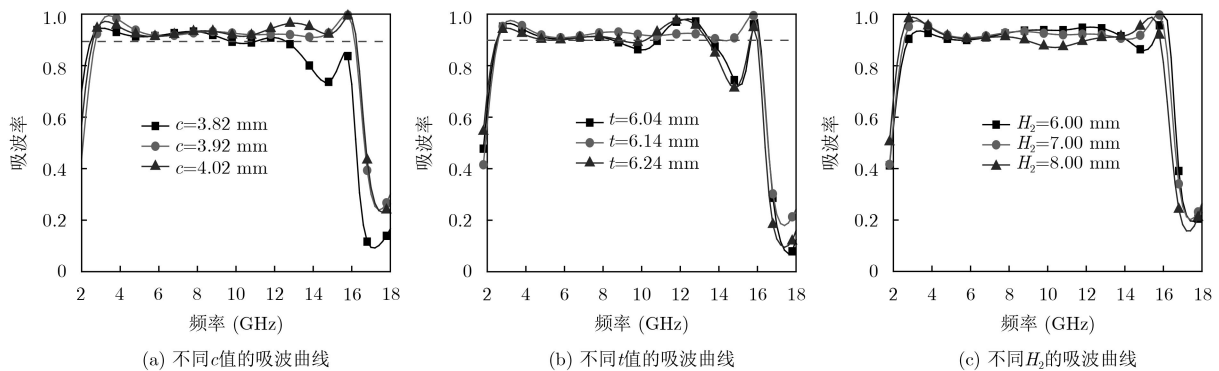


图6 参数分析

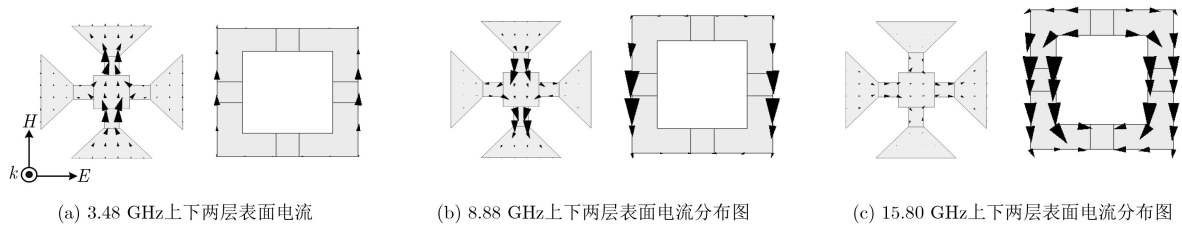


图7 表面电流分布图

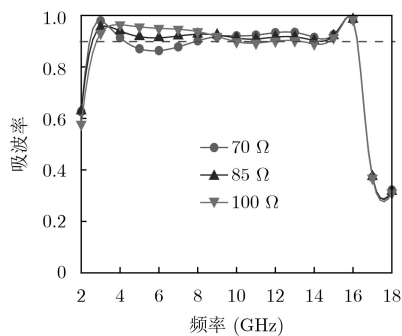


图8 不同的 $R_1$ 值的吸波曲线

### 3.3 不同入射角下吸波率分析

图9为复合结构分别在TE极化、TM极化下不同入射角的吸波特性曲线。随着角度的增大，吸波特性逐渐变差，在垂直入射时，吸波特性最佳。TE

极化下，随着入射角角度的增大，较宽的频带内吸波率逐渐减小，并且频带略向低频移动；TM极化下，角度的增加使吸波频段略向高频移动，仍能在低频频段内保持较高的吸波率，但是由于吸波体厚度过大，所以在高频区域内，吸波率发生了恶化，从而导致了TM极化下入射角较大时吸波体无法在高频区域内保持良好稳定的吸波特性。

## 4 加工实测

为了进一步验证仿真结果的正确性，加工了相应的实物。采用PCB印制电路板方法，在介质基板上镀敷金属铜，介质层1是介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ ，损耗角正切 $\tan \delta_r = 0.001$ 的聚四氟乙烯玻璃布板，介质层2是介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切 $\tan \delta_r = 0.02$ 的FR4介质板。最底层为金属地板。之后再將阻值

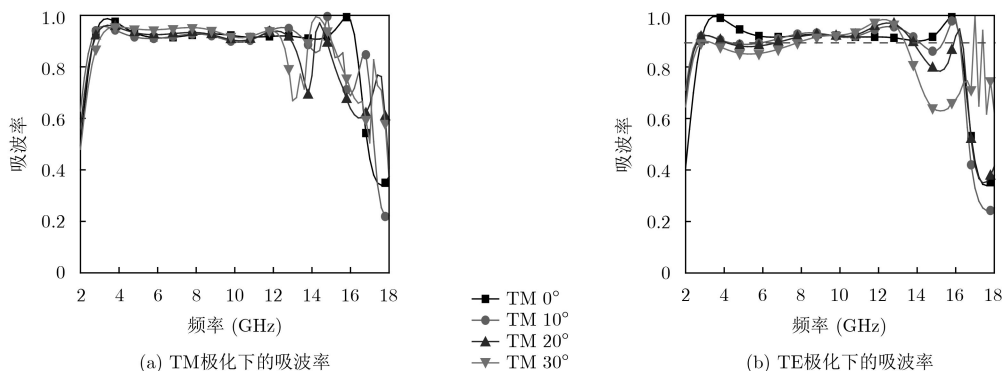


图9 不同入射角下的吸波率

为 $82\ \Omega$ 贴片电阻以及 $160\ \Omega$ 的贴片电阻分别焊接在上下层金属贴片上, 为了更加精确的调节复合结构吸波体的空气层高度以及减小固定件对实物性能的影响, 选用尼龙螺丝, 在吸波体四周边角处进行固定。制备了由 $18\times 18$ 个WBMA单元组成的WBMA单元阵。

在微波暗室中, 通过两个宽带单脊喇叭(1~18 GHz)与Agilent N5230C矢量网络分析仪连接,

在待测样品与喇叭天线保持水平, 并且保证满足远场条件的情况下进行了测试。首先对单元阵的反射率进行了实际测试, 得到复合结构吸波体的反射率曲线与仿真曲线的比对如图10(a)所示, 再通过计算得到吸波率的实测与仿真结果, 如图10(b)所示, 表明该吸波体在较宽频带内实现了较高的吸波率。实测与仿真之间存在的误差主要是由加工误差、焊接误差和测试环境造成的。

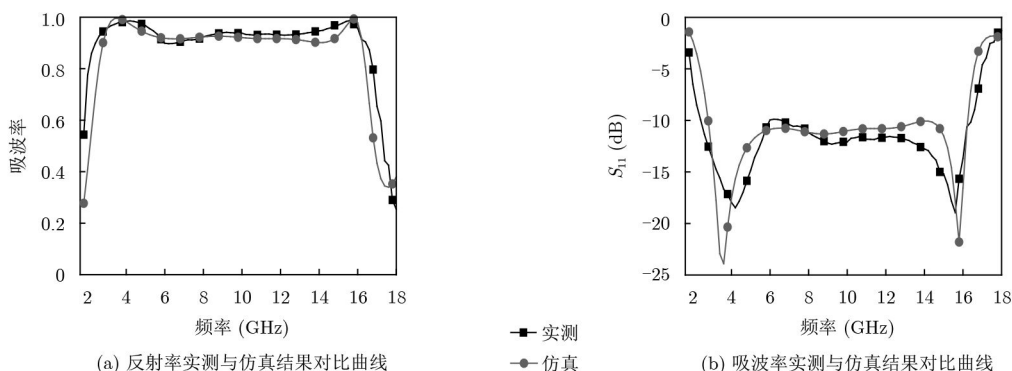


图10 实测与仿真结果对比

## 5 结束语

本文设计并制作了一种基于加载集总电阻的小型化宽带超材料吸波体结构, 通过梯形金属贴片之间的单元耦合, 以及加载下层金属矩形环并使用介质层与空气层组合利用的方式, 实现了吸波体的小型化。通过仿真验证了该吸波体可实现超宽带吸波, 并通过理论分析, 验证了级联的方式可以有效拓展带宽以及加载集总电阻可以提升吸波特性。最终得到的实测结果与仿真结果相近, 表明了该吸波体具有良好的吸波特性。本文的研究对未来隐身领域装备的研发有一定的借鉴作用。

### 参考文献

- [1] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402. doi: 10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [2] FU Qiang, FAN Chengli, LI Sijia, *et al.* Ultra-broad band radar cross section reduction of waveguide slot antenna with metamaterials[J]. *Radioengineering*, 2016, 25(2): 241–246. doi: 10.13164/re.2016.0241.
- [3] LIU Ying, LI Kun, JIA Yongtao, *et al.* Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 326–331. doi: 10.1109/TAP.2015.2497352.
- [4] LI Sijia, CAO Xiangyu, LIU Tao, *et al.* Double-layer perfect metamaterial absorber and its application for RCS reduction of antenna[J]. *Radioengineering*, 2014, 23(1): 222–228.
- [5] MISHRA N and CHAUDHARY R K. A miniaturized ZOR antenna with enhanced bandwidth for WiMAX applications[J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2016, 58(1): 71–75. doi: 10.1002/mop.29494.

- [6] BHATTACHARYYA S, GHOSH S, CHAURASIYA D, *et al.* Wide-angle broadband microwave metamaterial absorber with octave bandwidth[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(11): 1160–1166. doi: [10.1049/iet-map.2014.0632](https://doi.org/10.1049/iet-map.2014.0632).
- [7] GHOSH S, BHATTACHARYYA S, CHAURASIYA D, *et al.* An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1172–1175. doi: [10.1109/LAWP.2015.2396302](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2396302).
- [8] BHATTACHARYYA S and SRIVASTAVA K V. Triple band polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(6): 064508. doi: [10.1063/1.4865273](https://doi.org/10.1063/1.4865273).
- [9] LEE J and LIM S. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(1): 8–9. doi: [10.1049/el.2010.2770](https://doi.org/10.1049/el.2010.2770).
- [10] WAKATSUCHI H, PAUL J, and CHRISTOPOULOS C. Performance of customizable cut-wire-based metamaterial absorbers: Absorbing mechanism and experimental demonstration[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(12): 5743–5752. doi: [10.1109/TAP.2012.2210180](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2210180).
- [11] TUONG P V, PARK J W, RHEE J Y, *et al.* Polarization-insensitive and polarization-controlled dual-band absorption in metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 081122. doi: [10.1063/1.4794173](https://doi.org/10.1063/1.4794173).
- [12] CHENG Yongzhi, NIE Yan, and GONG Rongzhou. A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 415–421.
- [13] LI Sijia, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* Wideband, thin, and polarization-insensitive perfect absorber based the double octagonal rings metamaterials and lumped resistances[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(4): 043710. doi: [10.1063/1.4891716](https://doi.org/10.1063/1.4891716).
- [14] PAN Wu, YU Xuan, ZHANG Jun, *et al.* A novel design of broadband terahertz metamaterial absorber based on nested circle rings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2335–2338. doi: [10.1109/LPT.2016.2593699](https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2593699).
- [15] JAMES J R, KINANY S J A, PEEL P D, *et al.* Leaky-wave multiple dichroic beamformers[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(18): 1209–1211. doi: [10.1049/el:19890811](https://doi.org/10.1049/el:19890811).
- [16] ZUO Weiqing, YANG Yang, HE Xiaoxiang, *et al.* A miniaturized metamaterial absorber for ultrahigh-frequency RFID system[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 329–332. doi: [10.1109/LAWP.2016.2574885](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2574885).
- [17] LI Long and LÜ Zhiyong. Ultra-wideband polarization-insensitive and wide-angle thin absorber based on resistive metasurfaces with three resonant modes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(5): 055104. doi: [10.1063/1.4997468](https://doi.org/10.1063/1.4997468).
- [18] ZUO Weiqing, YANG Yang, HE Xiaoxiang, *et al.* An ultrawideband miniaturized metamaterial absorber in the ultrahigh-frequency range[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 928–931. doi: [10.1109/LAWP.2016.2614703](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2614703).
- [19] LEE J, YOO M, and LIM S. A study of ultra-thin single layer frequency selective surface microwave absorbers with three different bandwidths using double resonance[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(1): 221–230. doi: [10.1109/TAP.2014.2365826](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2365826).

吕世奇：男，1995年生，博士生，研究方向为微带天线、人工电磁材料等。

高 军：男，1962年生，教授，硕士生导师，研究方向为电磁散射理论、电磁超材料、天线设计等。

曹祥玉：女，1964年生，教授，博士生导师，研究方向为天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等。

兰俊祥：男，1994年生，博士生，研究方向为微带天线、磁电偶极子天线、电磁散射理论等。

李思佳：男，1987年生，副教授，硕士生导师，研究方向为人工电磁超材料及其在天线RCS减缩中的应用。

张国雯：男，1995年生，博士生，研究方向为空间电磁兼容、人工电磁材料等。