

2 结构与理论分析

设计的超材料单元结构如图 1 所示,由金属贴片、金属地板、介质基板组成。尺寸参数如下:周期 $P=10\text{ mm}$,金属贴边的外环内半径 $r_1=4.4\text{ mm}$,金属贴边的外环外半径 $r_2=3.8\text{ mm}$,金属贴边的内环内半径 $r_3=2.8\text{ mm}$,金属贴边的内环外半径 $r_4=1.9\text{ mm}$,介质厚度 $d=2\text{ mm}$,金属贴片厚度 $H=0.025\text{ mm}$,介质基板厚度 $h_1=0.5\text{ mm}$,金属地板与介质地板留有 $h_2=2.5\text{ mm}$ 的间隙,金属地板厚度 $h_3=0.025\text{ mm}$ 。仿真采用 CST 商业软件,电磁波沿着 Z 轴负方向垂直照射电磁超材料吸波体表面,边界设置为周期性边界,仿真结构单元分别沿 X 和 Y 方向无限延伸。其中,加载的集总电阻 $R=200\ \Omega$,加载电阻能增强电路消耗电能的性能;开口谐振环等效于集总电容,可增强电路储电能力。通过集总电阻值的变化来调节吸波体的吸收率和吸收带宽。

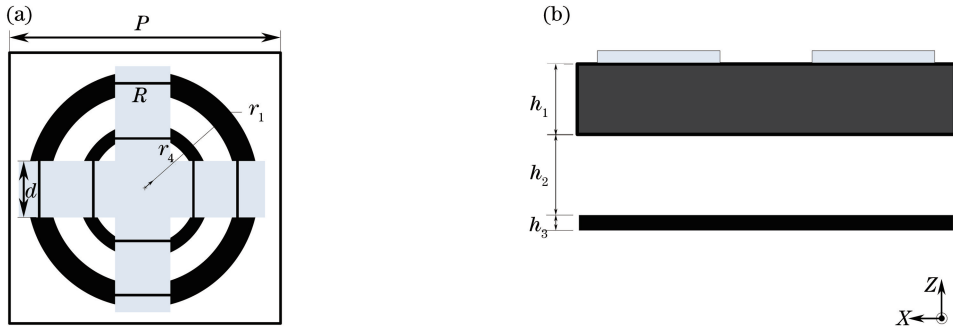


图 1 吸波体结构单元。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 1 Structural unit of absorber. (a) Top view; (b) side view

吸收率的定义为

$$A_\omega = 1 - R_\omega - T_\omega = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2, \quad (1)$$

式中 R_ω 为反射率, T_ω 为透射率, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为透射系数。地板为全金属地板,即无透射波 ($S_{21}=0$), S_{11} 由吸波体阻抗和自由空间阻抗决定。当二者达到完美匹配条件时,电磁波完全进入吸波体,无反射,并且入射波被完全吸收。

材料阻抗与反射率 R 的关系式为

$$R = \frac{Z_1 - \eta_0}{Z_1 + \eta_0}, \quad (2)$$

式中材料本征阻抗 $Z_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1}$, 自由空间波阻抗 $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, μ_1 、 ϵ_1 、 μ_0 、 ϵ_0 分别为相对磁导率、相对介电常数、真空磁导率、真空介电常数。

该吸波体具有电谐振和磁谐振特性,其中电谐振主要由集总电阻构成的电阻型频率选择表面(FSS)产生,采用等效电路法对其进行计算。电谐振和磁谐振的等效电路如图 2 所示,其中 L_m 为金属线电感, R_1 为磁谐振集总电阻, R_m 为金属线电阻, C_m 为金属线电容, L 为电路电感。

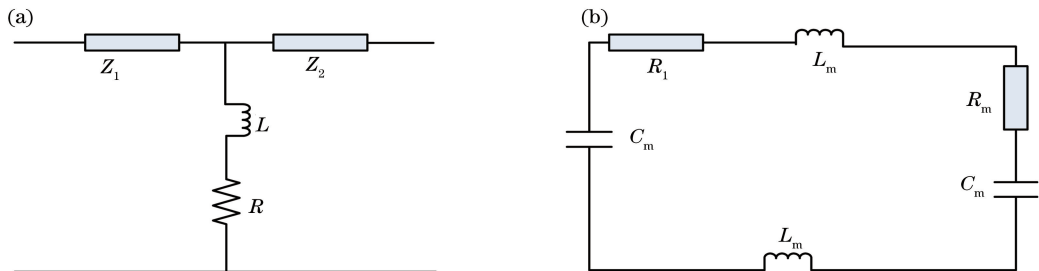


图 2 (a)电谐振器和(b)磁谐振器的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagrams of (a) electrical resonator and (b) magnetic resonator

吸波体材料的电谐振阻抗 Z_e 为

$$Z_e = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_{\text{FSS}}}{(Z_1 + Z_2)Z_{\text{FSS}} + Z_1 \cdot Z_2}, \quad (3)$$

式中 FSS 阻抗 $Z_{\text{FSS}} = R + j\omega L + 1/j\omega C$, C 为电路电容。介质阻抗 Z 与介质厚度 d 之间满足:

$$Z = j\sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \tan(kd), \quad (4)$$

式中 k 为电磁波在介质中的传播系数, μ_r, ϵ_r 分别为材料的磁导率和材料的介电常数。吸波体材料的磁谐振阻抗为

$$Z_E = R_1 + R_m + j\left(2\omega_c L_m - \frac{2}{\omega_c C_m}\right), \quad (5)$$

式中磁谐振频率 $\omega_c = 1/L_m C_m \approx c_0/\pi r_4 \sqrt{(\epsilon_r \omega/d) \ln(\omega/d)}$, c_0 为光传播速度大小, ω 为角频率。计算发现, 当电路参数取合适值时, 可使吸波结构阻抗为 377Ω , 满足与自由空间阻抗匹配的条件, 达到完美吸波。

3 分析与讨论

定义入射电磁波沿 $-Z$ 轴方向, XOY 和 YOZ 平面采用主从边界的处理方法, 为了更准确、更简单地计算吸波体的吸收率, 在结构底侧若干距离处放置金属板, 使 $S_{21} = 0$, 得到 S_{11} 参数, 并计算出有无集总原件情况下的吸波体吸收率, 结果如图 3 所示。

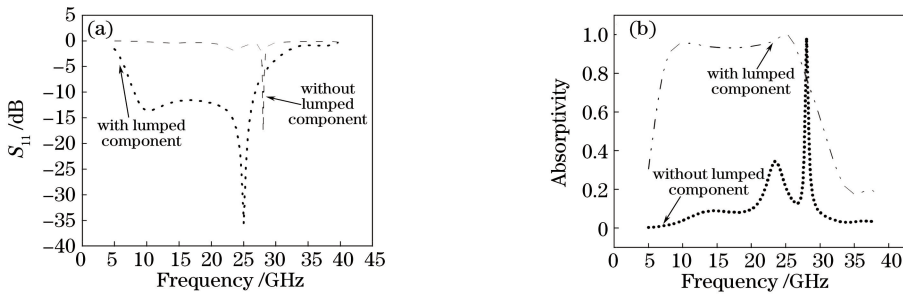


图 3 吸波体的(a)反射系数与(b)吸收率曲线

Fig. 3 (a) Reflection coefficient and (b) absorptivity curves of absorber

由图 3 可知, 未加载集总元件时, 28.04 GHz 频段处的吸收率达到 98%, S_{11} 达到 -17.67 dB, 但是其反射系数在 -10 dB 以下的吸波频段过于狭窄, 吸收率大于 90% 的相对带宽仅为 2%; 加载集总元件时, 结构吸波体的 S_{11} 在 25.5 GHz 处达到 -35.68 dB, 在 8.16~26.63 GHz 之间, S_{11} 均为 -10 dB 以下, 且吸收率大于 90%, 吸波频宽达到 18.47 GHz。为验证仿真结果的准确性, 运用时域有限差分(FDTD)算法进行吸波结构的吸收率对比, 如图 4 所示, 故结果是正确的。

加载集总元件时, 能在很宽的频带内激发磁谐振从而出现感性电流, 电流一部分直接被集总电阻衰减, 另一部分存储在电容中。加载电阻使电磁谐振转化成电路谐振, 形成稳定的宽频带吸波。当介电常数为负、

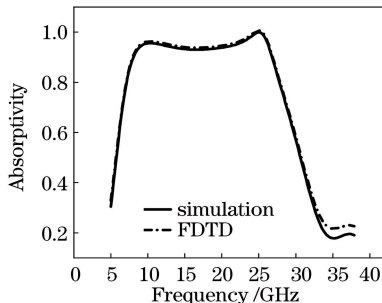


图 4 仿真与 FDTD 算法结果对比

Fig. 4 Comparison of results from simulation and FDTD algorithm

磁导率实部为正时,吸波体具有较强的电谐振特性;当磁导率实部为负、介电常数为正时,吸波体具有较强的磁谐振特性。吸波体结构的等效磁导率与等效介电常数如图 5 所示,可以看到,此吸波体具有宽频高吸波特性。

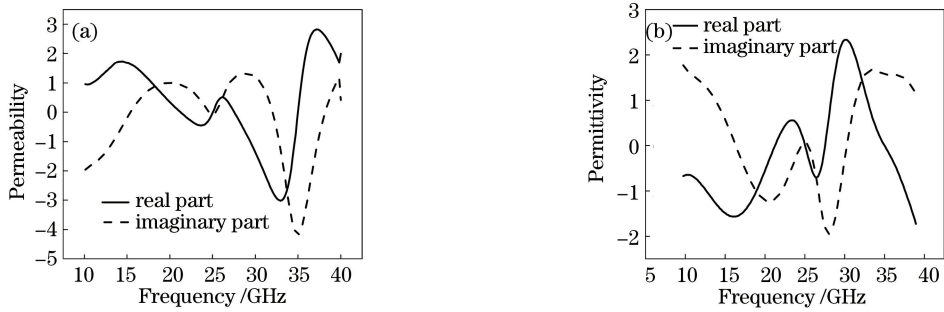


图 5 吸波体的等效(a)磁导率与(b)介电常数

Fig. 5 Equivalent (a) permeability and (b) permittivity of absorber

为了更准确地分析集总元件对吸波体吸波特性的影响,通过改变集总电阻数值进行区别分析,并进行了仿真计算,结果如图 6 所示。当 $R=100\ \Omega$ 时,吸波特性较差,最高吸收率随着阻值的增加而增加,但吸收率为 90% 以上的吸波带宽减小,中心频率基本不变。通过仿真优化得到的最佳电阻值,可使吸波体的吸收率和吸波带宽达到最佳。

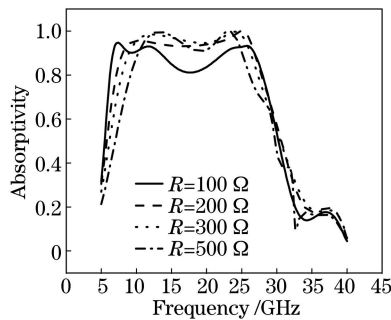


图 6 不同集总电阻下的吸波体吸收率

Fig. 6 Absorptivity of absorber with different lumped resistances

为准确地研究该吸波体的吸波特性,给出工作频率为 25 GHz 时,吸波结构单元表面的电场分布图,如图 7 所示。可以看出,沿 X 轴平行方向的表面电流极少,而 Y 轴方向上聚集了大量感应电流,并出现方向相反的平行电流。开口圆环与背板之间同样存在电流,结构表面显现出较强的磁谐振特性。金属圆环上的电流密度不均匀,这是由于表面形成了电偶极子,产生了强电谐振。通过电场分布图看出,电场主要聚集在集总元件处,更好地验证了集总元件可通过电路中电阻和电容进行能量的衰减和储存,从而大幅度提高吸波体的吸波性能。

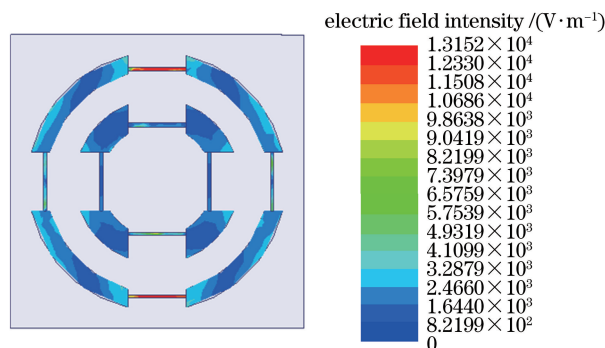


图 7 频率为 25 GHz 时结构单元的电场分布

Fig. 7 Electric field distribution of structural unit with a frequency of 25 GHz

4 结 论

基于超材料设计了一种新型开口圆环结构的宽频带超材料吸波体,并分析了其吸波特性和机理。该吸波体的最高吸收率接近 100%,达到完全吸波,并且吸收率为 90% 以上的吸收频宽为 18.5 GHz。研究表明,通过合理优化电阻阻值,可以改善吸波体与自由空间之间的阻抗匹配,减小入射波的反射率,提高吸波体的吸波性能。

参 考 文 献

- [1] Pang Jianfeng, Ma Xijun, Xie Xingyong. Research progress of electromagnetic absorbing materials [J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(2): 7-12, 16.
庞建峰, 马喜君, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展 [J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(2): 7-12, 16.
- [2] Liu Danli, Liu Ping'an, Yang Qingsong, *et al.* Research status and development trend of absorbing materials [J]. *Materials Review*, 2013, 27(9): 74-78.
刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及其发展趋势 [J]. *材料导报*, 2013, 27(9): 74-78.
- [3] Jing Hongxia. Studies on preparation and electromagnetic properties of microwave absorption composite in low frequency [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
景红霞. 低频段复合吸波材料的制备及电磁性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [4] Shi Minxian, Huang Zhixiong. Research progress in novel absorbing material [J]. *Materials Review*, 2007, 21(3): 36-39.
石敏先, 黄志雄. 新型吸波材料的研究进展 [J]. *材料导报*, 2007, 21(3): 36-39.
- [5] Wang Chen, Gu Jialin, Kang Feiyu. Research progress on theoretical design of microwave absorbing materials [J]. *Materials Review*, 2009, 23(3): 5-8.
王晨, 顾家琳, 康飞宇. 吸波材料理论设计的研究进展 [J]. *材料导报*, 2009, 23(3): 5-8.
- [6] Zhang Jian, Zhang Wenyan, Xi Zhengping. Research progress of stealth absorbing materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(S4): 504-508.
张健, 张文彦, 奚正平. 隐身吸波材料的研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(S4): 504-508.
- [7] Yang Huanhuan, Cao Xiangyu, Gao Jun, *et al.* An ultra-thin absorbing material and its application in slot antenna [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2790-2794.
杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 一种超薄吸波材料及其在缝隙天线中的应用 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(11): 2790-2794.
- [8] Qi Meiqing. Regulation and application of ultra-material lens and super-surface electromagnetic wave [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
齐美清. 超材料透镜和超表面对电磁波的调控及应用 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [9] Wang Beiyin. Study on electromagnetic metamaterials absorber and polarization transformer [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
王贝胤. 电磁超材料吸波器及极化调控器研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [10] Shang Kai, Cao Xiangyu, Yang Huanhuan, *et al.* Design of a microstrip antenna based on fractal metamaterial absorber [J]. *Telecommunications Technology*, 2013, 53(7): 938-943.
商楷, 曹祥玉, 杨欢欢, 等. 基于分形超材料吸波体的微带天线设计 [J]. *电讯技术*, 2013, 53(7): 938-943.
- [11] Gu Chao, Qu Shaobo, Pei Zhibin, *et al.* Design of a wide-band metamaterial absorber based on loaded magnetic resonators [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 087801.
顾超, 屈绍波, 裴志斌, 等. 基于磁谐振器加载的宽频带超材料吸波体的设计 [J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 087801.