

基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计

惠忆聪 王春齐 黄小忠

Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS

Hui Yi-Cong Wang Chun-Qi Huang Xiao-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 218102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.218102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.218102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于开口椭圆环的高效超宽带极化旋转超表面

High-efficiency ultra-wideband polarization conversion metasurfaces based on split elliptical ring resonators

物理学报.2015, 64(17): 178101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178101>

基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究

A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies

物理学报.2015, 64(15): 158101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.158101>

基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计

Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials

物理学报.2014, 63(17): 178103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.178103>

基于科赫分形的新型超材料双频吸收器

Study on a novel dual-band metamaterial absorber by using fractal Koch curves

物理学报.2014, 63(11): 118102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118102>

宽带透射吸收极化无关超材料吸波体

A broadband transmission absorption polarization-independent metamaterial absorber

物理学报.2014, 63(2): 028103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028103>

基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计*

惠忆聪¹⁾ 王春齐²⁾ 黄小忠^{2)†}

1)(中南大学物理与电子学院, 长沙 410073)

2)(中南大学航空航天学院, 长沙 410073)

(2015年5月18日收到; 2015年6月25日收到修改稿)

将多边开缝式电阻型频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 与传统的磁性吸波材料 (radar absorption materials, RAM) 复合, 提出了一种新型吸波体模型. 在分析该模型材料结构和拓扑结构的基础上, 得到等效电路模型; 基于传输线理论获得该模型的反射率及输入阻抗. 采用 CST 仿真软件对电阻型 FSS 与无电阻型 FSS 进行对比仿真, 通过分析吸波效率, 结果表明电阻型 FSS 在 8.7 GHz 附近具有更加优良的吸波性能, 实物测试结果与仿真结果一致. 同时 FSS 复合传统的磁性吸波材料 RAM 产生了拓频效果, 在 8—15 GHz 范围内起到全频段吸收.

关键词: 电阻, 频率选择表面, 磁性材料

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.64.218102

1 引言

电磁超材料是指具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合材料, 对材料结构的关键物理尺度上的有序设计可以突破某些自然规律的限制, 获得超出自然界固有性质的超常功能^[1]. 超材料的运用实现了超棱镜、隐身罩、小型化天线以及负折射率等反常物理现象^[2]. 2008年, Landy 等通过电介质基板、电谐振器和金属微带线构成的电磁耦合结构吸波体, 实现了对电磁波的“完美吸收”^[3]. 基于集总电阻元件以及电阻膜的超材料吸波体利用接地基体与单元阵列产生的多谐振特性, 可获得宽带吸波性能^[4]. 2013年, 程用志等提出了基于集总电阻的具有低频吸收和高频透射的超材料吸波体, 以达到调节吸收频带的目的^[5]. Wasif Niaz 等通过设计 2 个同轴分形结构加载集总电阻的超材料吸波体, 获得了超大吸收带宽的效果^[6].

基于电阻型频率选择表面的超材料吸波体可以实现宽频带吸收, 调整超材料的结构参数, 可以大范围地影响超材料的频率响应特性^[7].

本文在前人研究的基础上, 基于电阻型频率选择表面的电路谐振特性提出了一种新型结构吸波体. 该吸波体对电磁波具有宽频带, 多频带吸收特性, 成本较低, 加工简单.

2 理论研究

以不同碳纤维含量的磁性吸波材料 RAM1, 及 RAM2 与底层 FSS 复合构建三层吸波体模型 (图 1 (a)), 表层 RAM 与空气的自然阻抗有效匹配, 提高模型的吸波效率, 并给出该模型的等效电路 (图 1 (b)). 根据传输线理论, 磁性吸波材料 RAM 的反射率 Γ 为

$$\Gamma = \frac{Z_{in(i)} - Z_0}{Z_{in(i)} + Z_0}, \quad (1)$$

* 国防预研究基金 (批准号: 51312040302) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) (批准号: 2014AA7024034, 2014AA7060403) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 13974837493@139.com

其中 $Z_{in(i)}$ 为磁性吸波材料RAM单层输入阻抗, Z_0 为空气匹配阻抗, 根据多层叠加的等效电路(图1(b))得出其输入阻抗等式为

$$Z_{in(i)} = Z_i \frac{Z_{in(i-1)} + jZ_i \tan(k_i d_i)}{Z_i + jZ_{in(i-1)} \tan(k_i d_i)}, \quad (2)$$

$Z_i = \sqrt{\mu_i/\epsilon_i}$ 等式中的介电常数以及磁导率参数由材料RAM的特性决定, k 为相位常数. FSS的主要阻抗取决于其自身的结构, 以及共振频率, 根据图1(b)中的等效电路, 其阻抗 Z_{FSS} 可以表示为

$$Z_{FSS} = R_D + \frac{(1 - \omega^2 LC)}{(j\omega C)}. \quad (3)$$

因此调节底部FSS的形状结构, 几何尺寸, 电阻值可以单独控制每一个吸收峰的峰值从而优化吸波模型的吸波效率以及吸波带宽.

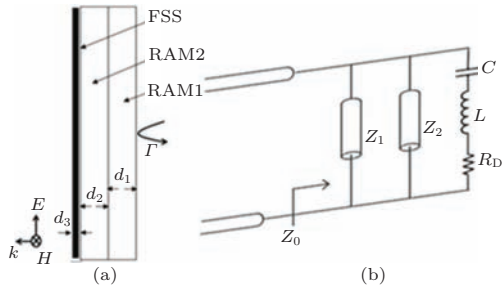


图1 (a) 材料结构; (b) 等效电路图

Fig. 1. (a) Structure diagram of the composite material; (b) equivalent model with resonant circuit parameters.

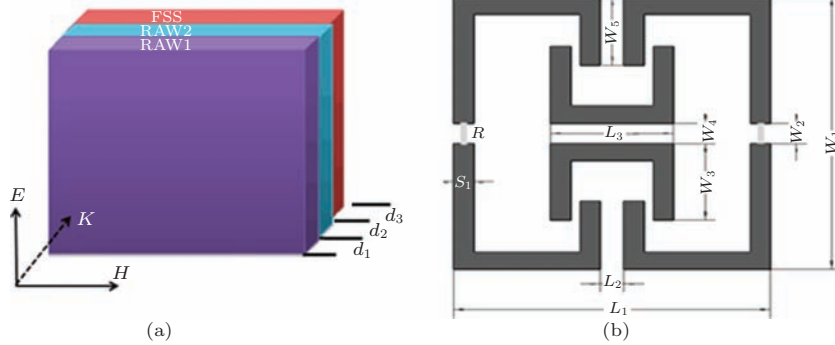


图2 (网刊彩色) (a) 模型结构; (b) 单元结构

Fig. 2. (color online) (a) Structure diagram of the composite material; (b) unit cell of the FSS absorber.

采用基于有限元的CST软件对上文给出的模型进行反射率仿真, 如图2(a)所示, 沿 x 轴和 y 轴方向的边界皆设为周期边界条件, 激励为平面电磁波, 且垂直入射到吸波体表面, 其中电场波矢 K 沿 $+x$ 方向, 磁场 H 沿 $+y$ 方向, 电场 E 沿 $+z$ 方向绘出反射率模拟曲线图. 由于在电磁波传播方向添加了铝板做为底层基板, 因此认为透射率为0, 即

3 模型设计

经过对FSS吸波原理的研究, 发现能量损耗主要来源于结构的缝隙处. 为了满足宽频带吸收器的研制, 设计多边开缝型结构, 并在结构左右开缝处添加 360Ω 的贴片型电阻(图2(b))与断开型结构进行比对, 研究两者的吸波效率. 同时复合传统的磁性吸波材料RAM(图2(a)), 分析有无电阻型FSS对磁性吸波材料RAM的改性效果. 表1给出了图形详细的尺寸参数. 采用印刷电路的方法在环氧面板上制备结构单元, 其中基板厚度为 1.6 mm , 损耗角正切 $\tan \delta = 0.025$, 介电常数 $\epsilon = 4.3$; 表面铜片厚度 $35 \mu\text{m}$, 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$.

表1 复合材料的结构尺寸参数
Table 1. Parameters of composite RAM.

| 参数 | 尺寸/mm | 参数 | 尺寸/mm |
|-------|-------|-------|-------|
| S_1 | 1 | W_2 | 1.2 |
| L_1 | 16 | W_3 | 4.5 |
| L_2 | 1.2 | W_4 | 1.2 |
| L_3 | 6.2 | W_5 | 4 |
| W_1 | 16 | d_1 | 5.5 |
| d_2 | 6 | d_3 | 1.6 |

吸收率 $A = 1 - \Gamma = 1 - |s_{11}|^2$. 图3中显示电阻型FSS在 8.7 GHz 和 11.5 GHz 处存在强吸收峰, 分别为 -24 dB 和 23 dB ; -10 dB 以下的有效带宽为 $8.4\text{--}9.2 \text{ GHz}$, $11.5\text{--}11.72 \text{ GHz}$. 无电阻型FSS在 8.7 GHz 频段处并没有明显的吸波性能, 11.5 GHz 处反射率 20 dB . 这说明, 电阻型FSS在 8.7 GHz 附近具有更加良好的吸收波性能, 在 11.5 GHz 附近

添加电阻对该FSS的影响并不明显. 采用反演法, 通过反射率曲线推算出超材料吸波体FSS的等效阻抗 z 为

$$z = \sqrt{\frac{(1 + s_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (4)$$

超材料FSS的相对阻抗如图4. 在8.7 GHz及11.5 GHz处, 相对阻抗的实部出现明显峰值, 虚部约等于0, 实现了超材料吸波体与空间的阻抗匹配, 在该频段处出现了吸收峰. 11 GHz处的匹配阻抗在图3中显示出了宽频带效果.

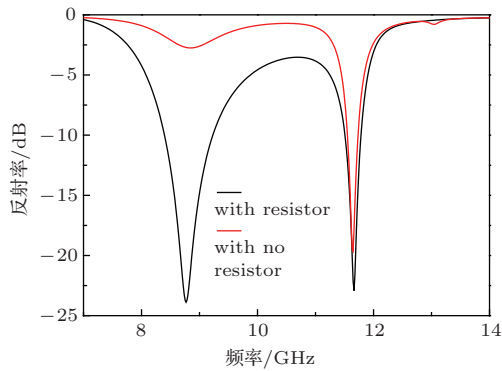


图3 (网刊彩色) 电阻型FSS与无电阻型FSS的模拟反射率

Fig. 3. (color online) Simulated reflection coefficients of nonresistor FSS and resistor FSS.

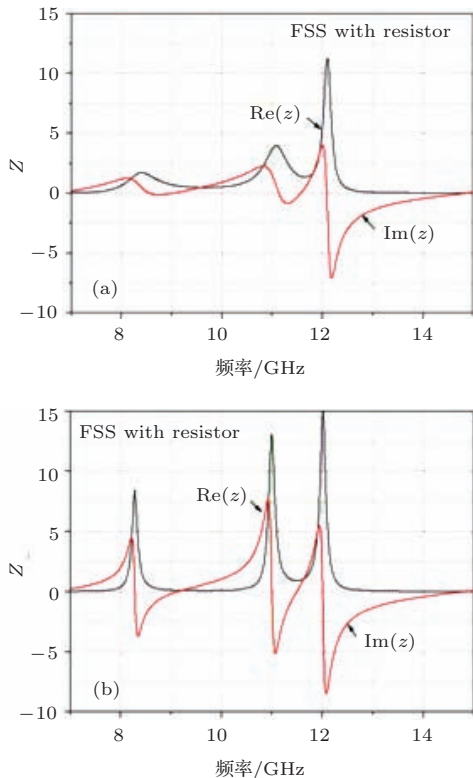


图4 超材料FSS的相对阻抗

Fig. 4. The relative impedance of the Metamaterial FSS.

为了更好的解释该现象, 在8.7 GHz及11.5 GHz处添加了场监视器, 观测表面电流强度及流向, 并且给出对应的电路原理图.

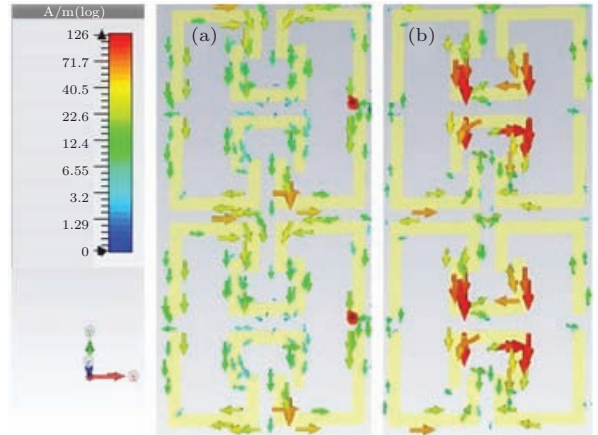


图5 双频带FSS在(a) 8.7 GHz和(b) 11.5 GHz处的表面电流分布

Fig. 5. The surface current distributions of the dual-band FSS absorber at (a) 8.7 GHz and (b) 11.5 GHz.

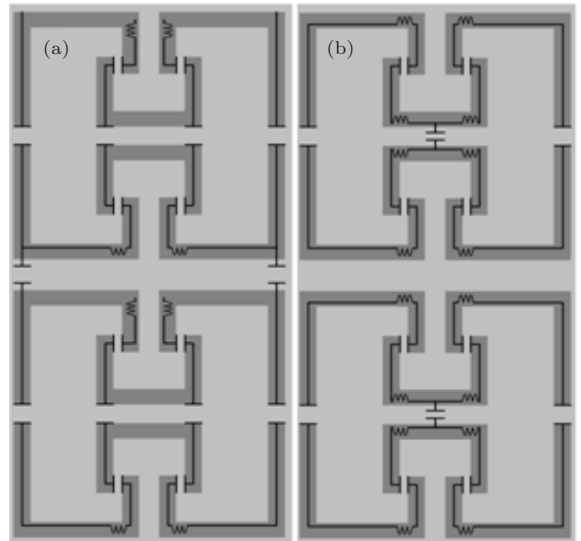


图6 双频带FSS在8.7 GHz (a) 以及11.5 GHz(b) 处的电路原理图

Fig. 6. Circuit schematic of dual-band FSS absorber at (a) 8.7 GHz and (b) 11.5 GHz.

图5显示的是双频带FSS吸波体在谐振频率8.7 GHz以及11.5 GHz处的表面电流分布. 根据Lee等^[8]的假设: 1) 产生谐振电流的开缝处存在电容; 2) 有电流流经同一材料结构的转折处存在电感, 得到等效电路图(图6). 图5能够观测到电路中主要的损耗来自于图形缝隙处, 图形缝隙处的未知电阻消耗了电磁波能量. 图5(a)中8.7 GHz附近的谐振电流主要作用于边路开封处, 在边路开封处添加电阻可以有效提高FSS的吸波效率, 得到了

一个更高的吸收峰. 图5(b)在11.5 GHz处的谐振主要作用于内部环形结构处, 故与电路中有无电阻没明显联系, 电阻对于峰值的影响较小, 以上结果与上文中的反射率分析结果一致. 表面电流密度(图7)进一步验证了该结果. 图6显示2个共振频率下的等效电路图, 为了方便解释LC参数, 我们忽略了电路开缝处的电阻. 因此可以认为图1给出的等效电路模型与该结构匹配.

图7表示有无电阻的FSS两种结构在8.7 GHz以及11.5 GHz处的表面电流密度. 显然, 添加电阻之后, 在8.7 GHz处电流密度得到了极大的提高, 电流在通过电阻的时候被消耗. 因此, 电阻的添加可以很大程度上改善材料的吸波性能.

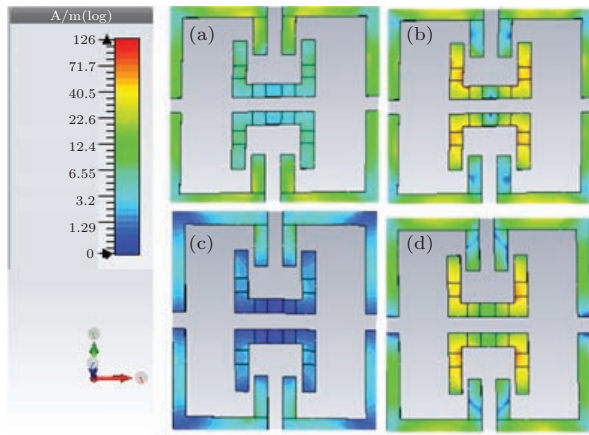


图7 无电阻FSS与有电阻FSS在8.7 GHz以及11.5 GHz处的电流强度 (a)有电阻FSS在8.7 GHz; (b)有电阻FSS在11.5 GHz; (c)无电阻FSS在8.7 GHz; (d)无电阻FSS在11.5 GHz

Fig. 7. Surface current density of nonresistor FSS and resistor FSS at 8.7 GHz and 11.5 GHz: (a) Resistor FSS at 8.7 GHz; (b) resistor FSS at 8.7 GHz; (c) nonresistor FSS at 8.7 GHz; (d) nonresistor FSS at 11.5 GHz.

4 实验结果与分析

图8展示了采用印刷电路制备的FSS实物的实际测试结果, 对比制备的2种FSS发现在9.3 GHz处含电阻的FSS实物的反射率衰减达到了-29 dB, -10 dB以下的有效带宽为8.9—9.8 GHz. 12.5 GHz附近的吸收峰在实物制备中不理想. 同时对比仿真结果发现峰值向高频偏移, 这主要由于制备的基板介电常数并不均匀, 会随着频率增大而减小; 及仿真计算的结果是在材料拥有无限循环的结构前提下获得, 实际情况受尺寸大小的限制, 导致样品的整体电容变小, 产生了频带偏移效果. 但整体效果上与仿真结果类似.

为了验证FSS与常见吸波材料复合的实际结果, 在RAM底层添加FSS测量复合材料的反射率, 对比包含两种类型的FSS以及空白材料的吸波效果(图9). 由于FSS板材的厚度相对于复合材料厚度较小, 因此忽略其厚度对材料的影响. 观测到FSS板材与RAM复合以后, 在FSS强吸收峰附近出现了叠加效应, 使整个材料的吸收峰值增大. 含电阻FSS复合RAM在9 GHz处反射率达到了-19 dB, 而无电阻复合的RAM为-17 dB, 大幅提高了材料的吸波性能. 同时对材料在-10 dB以下的有效带宽得到了改进, 产生了极好的拓频效果, 电阻型FSS复合的RAM材料在8—15 GHz频段产生了全频段吸收, 进一步说明电阻型FSS具有良好的吸波性能.

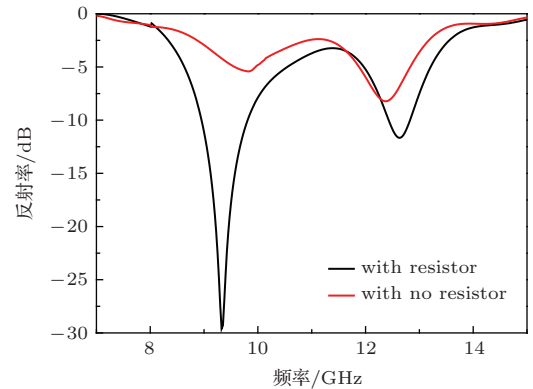


图8 电阻型FSS与无电阻FSS实际反射率测试结果
Fig. 8. Measured reflection coefficients of nonresistor FSS and resistor FSS.

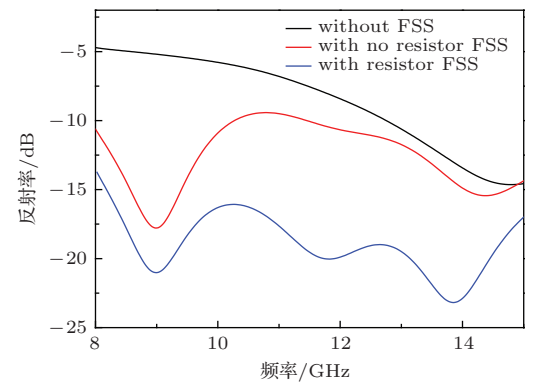


图9 单一材料RAM, 无电阻FSS复合RAM, 电阻FSS复合RAM反射率测试结果
Fig. 9. Reflectivity of RAM and the composite RAM with nonresistor FSS and resistor FSS.

5 结论

在本文中采用一个多边开缝结构的FSS复合RAM材料制备宽频带超材料吸波体. 添加电阻使

FSS具有更加良好的吸波性能, 并对其原理进行了分析. 实物测试结果与仿真结果一致, 实现了FSS对原吸波材料RAM的带宽增大以及吸波性能的提高. 受限于实验条件, 采用的贴片电阻对FSS进行添加使FSS具有一定的厚度, 可以使用薄膜电阻来进行优化.

参考文献

- [1] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer SA 2006 *Science* **314** 977
- [2] Hadjicosti K, Sydoruk O, Maier S A 2015 *Journal of Applied Physics* **117** 163910
- [3] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J 2008 *Physical Review Letters* **100** 207402
- [4] Pang Y Q, Cheng H Y, Zhou Y J, Li Z G, Wang J 2012 *Opt. Express* **20** 12515
- [5] Wang Y, Chen Z Y, Gong R Z, Nie Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 074101 (in Chinese) [王莹, 程用志, 聂彦, 龚荣洲 2013 物理学报 **62** 074101]
- [6] Wasif Niaz M, Bhatti R A, Majid I 2013 *Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology*, Islamabad, Pakistan, 15th–19th January, 2013 p424
- [7] Viet D T, Hien N T, Tuong P V, Minh N Q, Trang P T, Le L N, Lee Y P, Lam V D 2014 *Optics Communications* **322** 209
- [8] Lee J, Yoo M, Lim S 2015 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **63** 1123

Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS*

Hui Yi-Cong¹⁾ Wang Chun-Qi²⁾ Huang Xiao-Zhong^{2)†}

1) (School of Physics and Electronics, Changsha 410073, China)

2) (School of Aeronautics and Astronautics, Central South University, Changsha 410073, China)

(Received 18 May 2015; revised manuscript received 25 June 2015)

Abstract

In this paper, a kind of composite radar absorption materials, consisting of polygonal and seamed resistor with frequency selective surface (FSS) and traditional magnetic radar absorption materials (RAM), is presented. After analyzing such a material and its topological structure, we obtain the equivalent circuit model of this structure, and acquire the reflectivity and input impedance of such models on the basis of transmission line theory. By the application of CST (computer simulation technology), we have made a comparison between structures with nonresistor and resistor FSS. The structure with resistor FSS has a dual-band whose bandwidths are 0.8 GHz from 8.4 to 9.2 GHz and 0.22 GHz from 11.5 GHz to 11.72 GHz with the reflectivity below -10 dB, respectively. The simulated reflection coefficient for the resistor FSS shows two resonant frequencies at 8.7 and 11.5 GHz which respectively make contribute to a higher absorbing peak reaching -24 dB and -23 dB. However, the nonresistor FSS does not have the absorption peak at 8.7 GHz, and the absorption peak at 11.5 GHz reaches -20 dB, confirming the importance of resistors in improving absorption performance. We have observed which part of such a structure influences most the absorption by ascertaining power loss density in the absorbing structure. Based on the current distribution of the FSS, two different schemes of LC equivalent circuits can be modeled, at 8.7 GHz and 11.5 GHz, which can explain the anti-resonance and higher absorbing peak of resistor FSS. Moreover, due to the fact that the induced current increases significantly after adding resistors, we could see that the losses happen when the induced current flows through the resistors, Finally the usage of resistor could improve the absorptive performance of FSS at around 8.7 GHz, this result is coincident with that of simulation. In addition, the combination of resistor FSS and RAM can lead to a frequency-doubling effect, meaning that it has remarkable absorptive performance in the range of 8–15 GHz.

Keywords: resistor, frequency selective surface, magnetic radar absorption materials

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.64.218102

* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 51312040302), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2014AA7024034, 2014AA7060403).

† Corresponding author. E-mail: 13974837493@139.com