

## 基于电路模拟吸收体的宽带吸波型频率选择表面设计

赵宇婷 李迎松 杨国辉

### A novel wideband absorptive frequency selective surface based on circuit analog absorber

Zhao Yu-Ting Li Ying-Song Yang Guo-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 198101 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200641

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200641>

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

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 67(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

#### 双层螺旋环超表面复合吸波体等效电路模型及微波损耗机制

Equivalent circuit model and microwave reflection loss mechanism of double-layer spiral-ring metasurface embedded composite microwave absorber

物理学报. 2019, 68(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181960>

#### 基于方形开口环的超宽带线性极化转换器

Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring

物理学报. 2019, 68(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190267>

#### 基于铋可饱和吸收体的超快激光产生

Generation of ultra-fast pulse based on bismuth saturable absorber

物理学报. 2020, 69(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191995>

#### 完美吸收体、电磁“黑洞”以及内置完美匹配层的吸收特性

Absorption characteristics of perfect absorber, electromagnetic “black hole” and inner perfectly matched layer

物理学报. 2020, 69(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200110>

#### 基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

# 基于电路模拟吸收体的宽带吸波型 频率选择表面设计\*

赵宇婷<sup>1)</sup> 李迎松<sup>1)†</sup> 杨国辉<sup>2)</sup>

1) (哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

(2020 年 4 月 30 日收到; 2020 年 7 月 2 日收到修改稿)

设计了一种加载集总电阻的单极化低频透射吸波型频率选择表面 (absorptive frequency selective surface, AFSS). 该结构由二维有耗频率选择表面 (FSS) 阻抗屏和三维带阻 FSS 级联组成. 利用集总电阻加载的容性 FSS 和高选择性的三维宽阻带 FSS 实现了超宽带通响应以及低剖面、高选择性特性. 仿真结果显示设计的吸波型频率选择表面通带为 1—3.5 GHz, 吸波频段为 6.6—11.6 GHz, 通带与吸波频段的过渡带比为 1.9. 最后制作实物进行了实验验证, 测试结果与仿真基本一致, 充分验证了设计的有效性和正确性.

**关键词:** 吸波型频率选择表面, 电路模拟吸收体, 超宽带, 开口谐振环

**PACS:** 81.05.Zx, 42.60.Da, 84.30.Vn, 41.20.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200641

## 1 引言

频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 由于其可以对空间电磁波进行特定频段的选择性反射或透射 (频域) 而被广泛应用于雷达隐身、电磁兼容/屏蔽、天线设计等领域<sup>[1]</sup>. 然而, 传统的 FSS 主要是通过对带外信号的反射从而实现特定频段的电磁波的隐身或者隔离, 无法实现双站/多站雷达探测的隐身或者隔离, 反射的电磁波也会对电磁环境造成二次污染, 难以满足现实需求. 因此, 具有带外吸波特性的新型频率选择表面近年来备受关注, 且发展迅速. 2009 年, FSS 领域的著名专家 Munk<sup>[2]</sup> 在其新书中将这种新型 FSS 命名为 FSR (frequency selective rasorber). 2012 年, 意大利比萨大学的 Costa 等<sup>[3]</sup> 首次对吸波型频率

选择表面 (AFSS) 进行了深入研究, 并详细地阐述了设计机理. 同年, 国内空军工程大学屈绍波<sup>[4]</sup> 领导的团队提出了加载电阻膜吸波材料的 AFSS 设计方法.

根据物理结构, 现有的 AFSS 主要包括二维 AFSS 和三维 AFSS. 通常, 二维 AFSS 通过级联有耗 FSS 和无耗 FSS 来实现<sup>[5–9]</sup>. 而三维 AFSS 主要通过构造有耗谐振腔和无耗谐振腔实现, 如平面缝隙线结构<sup>[10]</sup>, 平行板波导<sup>[11]</sup>, 基片集成波导<sup>[12]</sup> 和屏蔽微带线<sup>[13]</sup> 等. 其中, 文献<sup>[4–9]</sup> 利用带通 FSS 实现了吸波带位于通带下侧或两侧的 AFSS, 这类 AFSS 主要适用于己方天线工作频段高于或正处于敌方威胁频段内的应用. 但是, 军事通信中有很多工作在 L、S 波段的雷达天线, 要在如此低的频段设计宽通带的 FSS 是非常困难的. 因此, 相关学者采用带阻 FSS 代替 AFSS 中的带

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFE0111100)、黑龙江重点研发计划 (批准号: GX17A016) 和中国博士后基金 (批准号: 2016M620918, 2019T120134) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [liyingsong@ieee.org](mailto:liyingsong@ieee.org)

通 FSS<sup>[14–16]</sup> 来开展新的研究. 由于二维阻带 FSS 选择性较差, 带宽较窄, 而三维阻带 FSS 又存在厚度过大、制作困难的问题, 高选择性、宽带吸波的 FSR 设计仍然是 1 个难题.

本文利用二维容性有耗 FSS 与高选择性带阻 FSS, 进一步拓展通带带宽, 从而实现高选择性、宽吸波带和超宽通带的 AFSS 设计. 该结构由加载贴片电阻的容性 FSS 和具有高选择性的宽阻带 FSS 级联而成. 由于有耗 FSS 的通带与带阻 FSS 的通带一致, 且带阻 FSS 具有高选择性, 因此可以实现超宽的带通响应以及陡峭的过渡带. 仿真和实验结果表明, 所提出的 AFSS 具有超宽的带通响应和高选择性特性.

## 2 AFSS 设计原理

最简单的二维集总电阻式吸波体通常通过在金属地板前面一定距离处放置一块电阻屏组成, 该电阻屏由无耗的 FSS 加载集总电阻实现. 但吸波体作为单端口网络, 只能实现电磁波的吸收功能, 为了实现特定频段内的透射功能, 可将金属地板用阻带 FSS 替代<sup>[15]</sup>, 如图 1 所示. 此时阻带 FSS 需要满足两个条件: 1) 阻带与吸波体的吸波频段一致, 通带与吸波体的通带频段一致; 2) 阻带 FSS 在其阻带内具有准完美导体 (PEC) 特性.

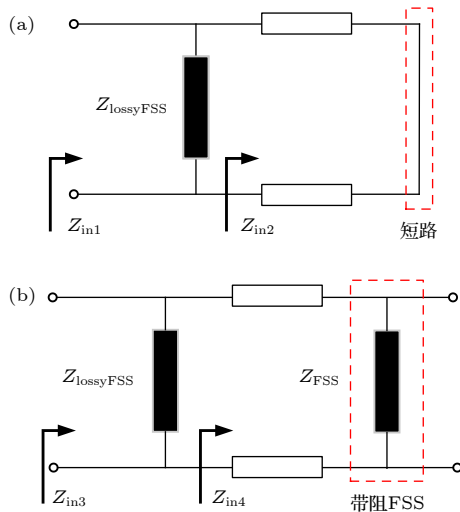


图 1 电路示意图 (a) 吸波体; (b) AFSS  
Fig. 1. Circuit Model: (a) Absorber; (b) AFSS.

由微波网络分析<sup>[17]</sup>可知, 对于级联二端口网络, 有耗 FSS 的传输矩阵与带阻 FSS 级联后的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos l_\beta & j \sin l_\beta \\ j \frac{1}{Z_0} \sin l_\beta & \cos l_\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $Y$  为有耗 FSS 的导纳,  $Z_0$  为自由空间波阻抗,  $l_\beta$  表示传输线的电长度,  $\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$  为带阻 FSS 的传输矩阵. 由 (1) 式可知, AFSS 的特性由有耗 FSS 和带阻 FSS 以及两者之间的距离和介质基板决定. 当 AFSS 工作在吸波频段时, 由于阻带 FSS 具有准 PEC 特性, 即阻抗接近于零, 介质基板和带阻 FSS 可以看作端接短路的传输线. 因此, 此时 AFSS 的输入阻抗  $Z_{in3}$  为

$$Z_{in3} = Z_{\text{lossyFSS}} / j Z_0 \tan l_\beta, \quad (2)$$

其中,  $Z_{\text{lossyFSS}}$  表示有耗 FSS 的阻抗. 由传输线理论可知, 当设计小于四分之一波长的低剖面吸波体时, 加载有损 FSS 端口的输入阻抗为感性, 即  $Z_{in4}$  为感性. 为了获得更宽的吸波频段带宽, 有耗 FSS 在工作频段内应该呈现容性以使 AFSS 的总阻抗虚部为 0<sup>[18]</sup>, 从而与自由空间实现阻抗匹配.

## 3 所提出 AFSS 结构与仿真

### 3.1 吸波体的设计

由上节分析可得, 有耗 FSS 设计为容性更有利于降低剖面. 因此, 本文提出了一种双“工”字型单元增加容性阻抗, 如图 2 所示. 该结构中间加载 150  $\Omega$  的贴片电阻, 使得有耗 FSS 的表面阻抗与自由空间中的波阻抗匹配. 从而实现良好的吸波特性. FR-4 介质基板的介电常数  $\epsilon_r = 4.4$ , 损耗角正切  $\tan \delta = 0.02$ , 厚度为 0.5 mm, 其他主要设计参数为:  $h = 6$  mm,  $a = 5$  mm,  $b = 8$  mm,  $c = 2$  mm,  $d = 1$  mm.

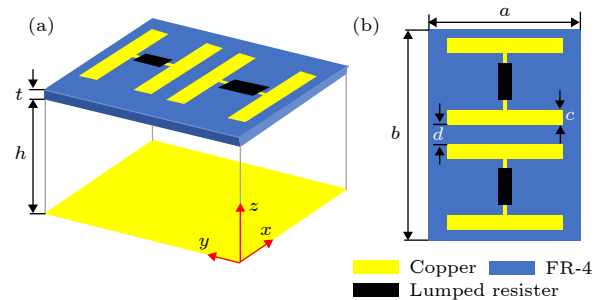


图 2 吸波体结构设计 (a) 三维视图; (b) 正视图  
Fig. 2. Design of the absorber: (a) 3-D view; (b) front view.

采用 CST 微波工作室对所涉及的模型进行全波仿真,  $x$  方向和  $y$  方向均设置为周期边界, 激励设置为 TE 极化平面电磁波, 沿  $-z$  方向垂直入射到单元平面, 其中电场  $E$  沿  $+y$  方向, 磁场  $H$  沿  $+x$  方向. 由于接地板为铜, 透射率为零, 吸收率  $A = 1 - |S_{11}|^2$ , 吸波体的吸收率和阻抗特性分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 图 3(a) 中蓝色区域表示吸收率大于 90% 的吸波频段, 为 5.4—13.8 GHz, 通带为 1—3.5 GHz. 此外, 图 3(b) 为有耗 FSS 的表面阻抗以及从介质基板向接地板的输入阻抗  $Z_{in2}$ . 可以看出, 所设计的“工”字形单元加载集总电阻构成的有耗 FSS 阻抗在整个工作频段内都呈容性, 在低频段内与介质基板及空气层呈现的感性阻抗相抵消, 从而实现良好的阻抗匹配, 有效降低吸波体厚度的同时实现了宽频带吸波.

### 3.2 带阻 FSS 的设计

根据上文所述的 FSR 设计原理及吸波体的设计结果, 为了实现具有高频吸波, 低频透射的 AFSS, 需要设计一个阻带与上述吸波体的吸波频

段一致, 且为具有高选择性的带阻 FSS. 所设计的三维带阻 FSS 单元如图 4(a) 所示, 该三维 FSS 单元由两个耦合的双开口谐振方环构成, 介质基板采用 F4-B, 单元沿电磁波入射方向放置, 沿  $y$  轴进行周期延拓. 其中, 谐振器线宽  $c_1 = 1$  mm,  $c_2 = 2$  mm, 耦合缝隙  $g = 2$  mm, 介质基板长度  $l = 8$  mm, 厚度  $t_m = 0.5$  mm, 相对介电常数  $\epsilon_r = 3.3$ , 单元周期  $p = 5$  mm. 利用 CST 微波工作室对设计的单元进行仿真,  $x, y$  方向设为周期边界,  $-z$  为电磁波矢入射方向.

由于单元采用耦合的双开口谐振方环, 基于奇偶模分析理论<sup>[19]</sup>, 可将两个开口方环之间的耦合电容等效为图 4(b) 所示中的  $C_1$  和  $C_2$ , 其中,  $C_1 = 0.27$  pF,  $C_2 = 0.22$  pF. 当电磁波入射到结构时产生不连续面处的等效电抗由电容  $C_p$  表示, 且  $C_p = 4.9$  pF, 电感  $L_1 = 6.06$  nH,  $L_2 = 5.34$  nH. 在传输方向上, 介质基板等效为传输线, 传输线的等效阻抗为  $Z_1 = Z_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}$ . 相邻单元之间的等效耦合电容为  $C_3 = 0.1$  pF. 在仿真软件 ADS(Advanced Design System) 中利用等效电路仿真得到的  $S$  参

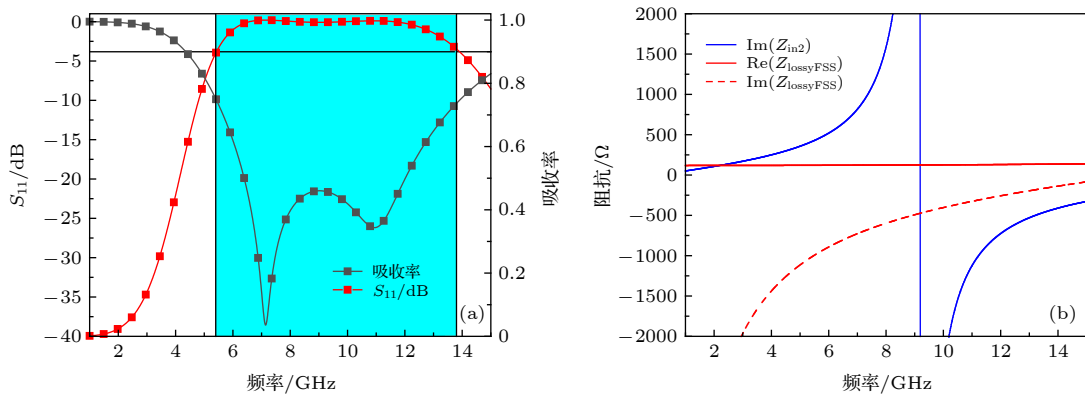


图 3 吸波体特性 (a)  $S_{11}$  与吸收率; (b) 阻抗特性

Fig. 3. Characteristic of the absorber: (a)  $S_{11}$  and absorptivity; (b) impedance characteristic.

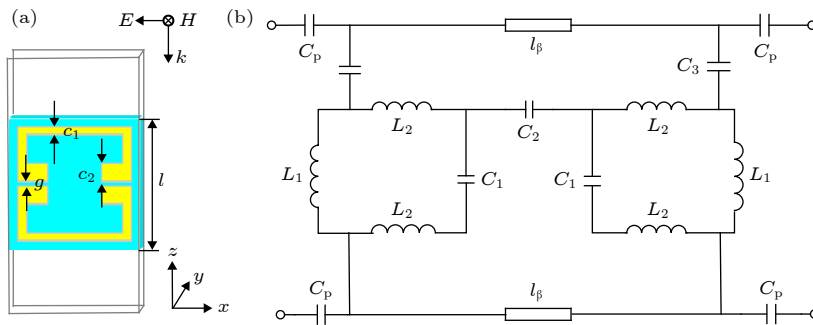


图 4 带阻 FSS (a) 单元设计; (b) 等效电路

Fig. 4. Band-stop FSS: (a) The design of unit cell; (b) equivalent circuit.

数与 CST 全波仿真的结果对比如图 5 所示. 从图 5 中可以看到两者吻合度较高, 但是电路仿真结果在低频处有一些毛刺, 这主要是由于等效电路模型是在中心频率点进行提取得到的.

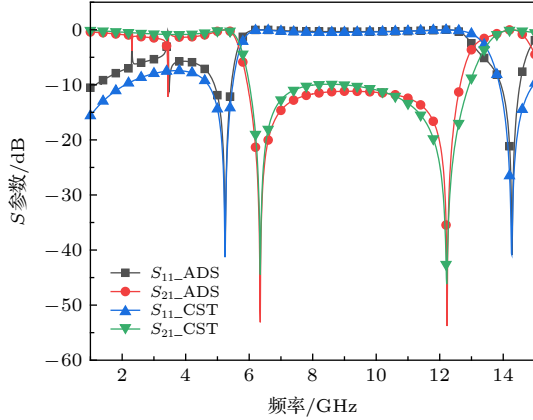


图 5 带阻 FSS 的等效电路仿真与全波仿真结果对比  
Fig. 5. Comparison between simulation results and full wave simulation.

### 3.3 AFSS 结构设计

将所设计的有耗 FSS 与高选择性的宽阻带 FSS 级联形成所设计的 AFSS 结构, 如图 6(a) 所示, 图 6(a) 是一个  $3 \times 1$  的周期结构示意图, 其中有耗 FSS 与带阻 FSS 之间为空气层, 空气层厚度  $h = 6 \text{ mm}$ , 带阻 FSS 相邻单元之间的距离  $p = 5 \text{ mm}$ , 其余参数均与上文一致. 在 CST 微波工作室, 采用与上文相同的周期边界条件进行设置, 并将入射波设置为 TE 极化波, 仿真得到的  $S$  参数与吸收率如图 6(b) 所示, TE 极化波斜入射情况下的反射系数与传输系数由图 6(c) 所示. 其中, 黄色区域为  $-1 \text{ dB}$  通带频段, 蓝色区域为吸收率为 90% 的吸收频段. 可以看到级联后的 AFSS 在  $1\text{--}3.5 \text{ GHz}$  频段构成了 1 个 3.5 倍频程的低损耗、超宽带的带通响应频段, 通带内最小插入损耗为  $0.21 \text{ dB}$ , 吸频段为  $6.5\text{--}11.7 \text{ GHz}$ , 且从图 6(c) 中可以看到当斜入射角度增大到  $30^\circ$  时, 仍能保证该性能. AFSS 通带过渡到吸波带的陡峭性可由  $\text{FR}_{\text{ap}} = f_a/f_p$  获得<sup>[14]</sup>, 其中  $f_a$  为吸波段的最低频率,  $f_p$  为通带的截止频率, 可得  $\text{FR}_{\text{ap}} = 1.9$ . 与加载金属地面的吸波体  $5.4\text{--}13.8 \text{ GHz}$  的吸波频段相比较, 级联带阻 FSS 后吸收频带变窄, 这是由于带阻 FSS 的相位特性与 PEC 平面存在一定差异所导致.

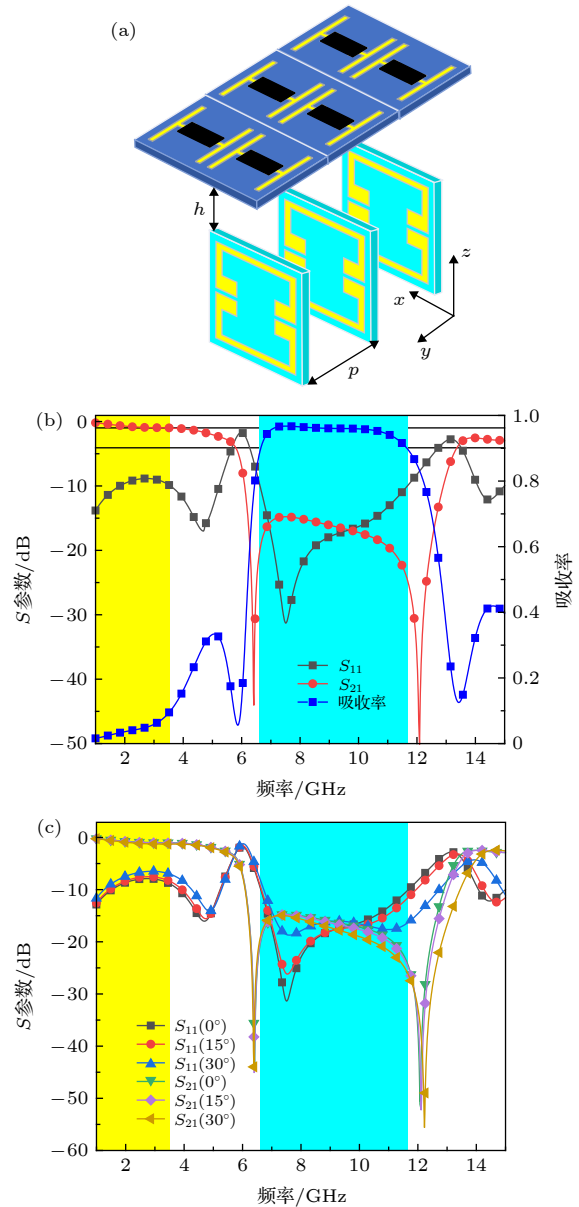


图 6 (a) AFSS 的  $3 \times 1$  周期结构示意图; (b) TE 极化波入射下的  $S$  参数与吸收率; (c) TE 极化波斜入射时的反射系数与传输系数

Fig. 6. (a) Geometry of the proposed AFSS ( $3 \times 1$  periodic structure); (b)  $S$  parameters and absorptivity at TE-polarized incidence; (c) reflection/transmission coefficients at TE-polarized oblique incidences.

## 4 实验验证

采用印刷板技术及工艺焊接技术对 AFSS 进行了样件加工, 加工的 AFSS 样件尺寸为  $240 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 14.5 \text{ mm}$ , 单元数量为  $48 \times 30$ . 样件如图 7 所示, 第一层为加载集总电阻的有耗 FSS 层, 第二层级联沿波矢方向放置的阻带 FSS. 为了增强机械强度, 有耗 FSS 与阻带 FSS 之间加载了少量介电常数接近于 1 的泡沫条, 并设计了一种齿

状夹具对三维 FSS 进行固定. 采用自由空间法<sup>[20]</sup>进行测试, 实验装置如图 8(a) 所示, 测试天线型号为德国施瓦兹贝科 BBHA 9120 D, 频率范围 1—18 GHz, 矢量网络分析仪 (VNA) 型号为安捷伦 N5244 A PNA-X. 测量  $S_{11}$  时, 两个天线放在被测样品同侧, 为了消除多径传播引起的其他反射, 需要先测量与样品尺寸相同的金属板的  $S_{11}$ , 再测试样品的  $S_{11}$ , 两者的差值即为被测样品相对金属板的吸波效果. 为了更好的观察实验结果, 测量结果与仿真结果的对比如图 8(b) 所示. 可以看到制备的 FSR 实物的 -1 dB 通带为 1—3.5 GHz,

吸波频段为 6.3—11 GHz,  $FR_{ap} = 1.8$ . 与仿真结果相比, 虽然过渡性变得更加陡峭, 但带阻 FSS 的第二传输零点向低频移动, 导致吸收频段变窄, 这主要是由于带阻 FSS 的介质基板过薄, 在实物制备中即使使用夹具进行固定, 也会产生一定的形变, 导致样件周期不均匀所引起的. 但总体而言, 样件的实验结果与仿真结果效果一致. 所设计的 AFSS 与近几年的 AFSS 进行比较, 如表 1 所示. 可以看出, 所提出的 AFSS 具有更宽的通带和吸收带宽, 以及陡峭的过度带宽, 对于混合结构而言, 结构尺寸相对较小, 剖面也相对较低.

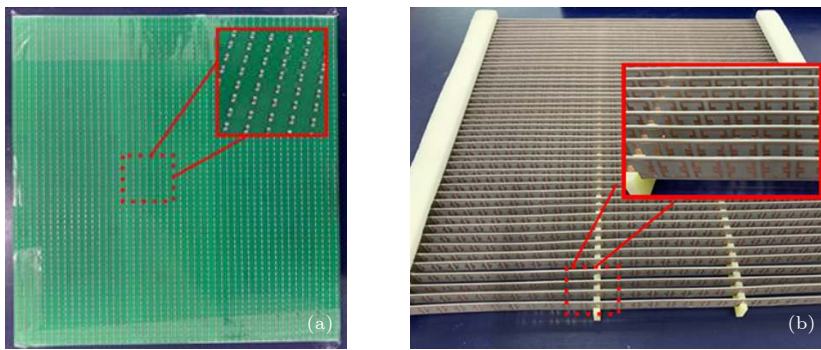


图 7 AFSS 样品 (a) 有耗 FSS; (b) 带阻 FSS

Fig. 7. Fabricated AFSS: (a) Lossy FSS; (b) bandstop FSS.

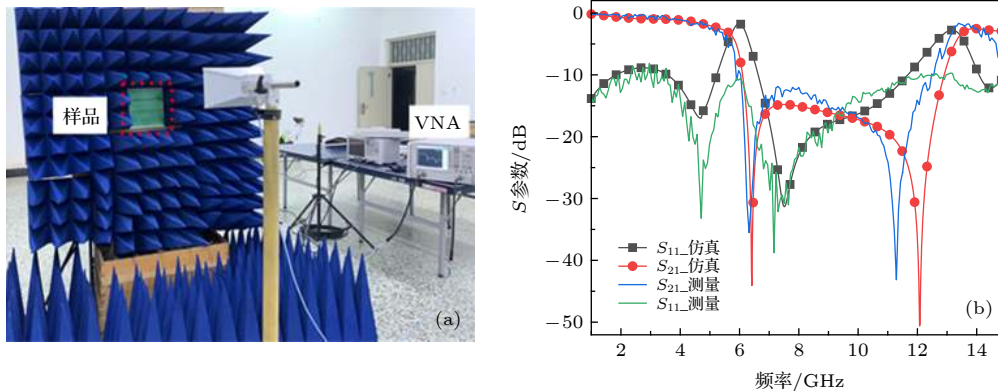


图 8 (a) 实验装置 (b)  $S$  参数的仿真结果与测量结果的对比

Fig. 8. (a) Experimental setup; (b) comparison between simulated and measured  $S$  parameters.

表 1 所设计 AFSS 与前人所设计的 AFSS 比较

Table 1. Comparisons between the proposed AFSS and the previous AFSSs.

参考文献	通带频段/GHz	吸波段分数带宽/%	$FR_{ap}$	$f_a$ / GHz	尺寸(@ $f_a$ )	极化	结构
[14]	2—2.82	39.8	2.1	7.9	$0.24 \times 0.24 \times 0.36$	单极化	混合
[15]	$\leq 1.54$	34.6	3.1	4.8	$0.14 \times 0.14 \times 0.13$	单极化	三维
[16]	$\leq 1.28$	43	3.3	4.2	$0.21 \times 0.17 \times 0.17$	双极化	二维
本文	1—3.5	54	1.8	6.3	$0.1 \times 0.17 \times 0.3$	单极化	混合

## 5 结 论

本文基于电路模拟吸收体的原理, 利用三维带阻 FSS 替换吸波体接地板的方法设计了一款低频透波高频吸波的 AFSS, 利用容性 FSS 加载集总电阻, 以及高选择性的带阻 FSS, 在实现宽带吸波的同时有效降低了剖面, 提高了过渡带的陡峭性, 并拓展了通带带宽, 整体性能有了显著提高. 此外, 设计的三维带阻 FSS 只需要利用普通的 PCB 印刷技术制造, 省去三维 FSS 制作和组装的困难, 可以满足实际工程需求. 最后通过实验验证, 结果表明实验结果与仿真结果一致.

## 参考文献

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley) pp12–20.
- [2] Munk B A 2009 *Metamaterials: Critique and Alternatives* (Hoboken: Wiley) pp50–56.
- [3] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2740
- [4] Zhou H, Qu S B, Peng W D, Wang J F, Ma H, Zhang D W, Zhang J Q, Bai P, Xu Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104201 (in Chinese) [周航, 屈绍波, 彭卫东, 王甲富, 马华, 张东伟, 张介秋, 柏鹏, 徐卓 2012 物理学报 **61** 104201]
- [5] Zhong S, Wu L, Liu T, Huang J, Jiang W, Ma Y 2018 *Opt. Express.* **26** 16466
- [6] Chen Q, Sang D, Guo M, Fu Y Q 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 1045
- [7] Wang Z F, Fu J H, Zeng Q S, Song M X, Denidni T A 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **18** 1443
- [8] Guo Q X, Li Z R, Su J X, Yang L Y, Song J M 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **18** 961
- [9] Chen Q, Liu L G, Chen L, Bai J J, Fu Y Q 2016 *Electron. Lett.* **52** 418
- [10] Zhang Y X, Li B, Zhu L, Tang Y M, Chang Y M, Bo Y M 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 633
- [11] Shen Z X, Wang J, Li B 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 3087
- [12] Luo G Q, Hong W, Tang H J, Chen J X, Wu K 2006 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **16** 648
- [13] Rashid A K, Shen Z X 2010 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* Toronto, Canada, July 11–17, 2010 p978
- [14] Yu W L, Luo G Q, Yu Y F, Liao Z, Jin H Y, Shen Z X 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 1701
- [15] Yu W L, Luo G Q, Yu Y F, Cao W H, Pan Y J, Shen Z X 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 1318
- [16] Yu Y F, Luo G Q, Liu Q, Yu W L, Jin H Y, Liao Z, Shen Z X 2019 *IEEE Access.* **7** 2520
- [17] Pozer D M (translated by Zhang Z Y) 2010 *Microwave Engineering* (Beijing: Electronic Industry Press) pp157–160 (in Chinese) [波扎 著 (张肇仪 译) 2010 微波工程 (北京: 电子工业出版社) 第157—160页]
- [18] Costa F, Monorchio A, Manara G 2016 *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine.* **5** 67
- [19] Zhou L 2011 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [周良 2011 博士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
- [20] Ghodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K 1989 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **38** 789

# A novel wideband absorptive frequency selective surface based on circuit analog absorber<sup>\*</sup>

Zhao Yu-Ting<sup>1)</sup> Li Ying-Song<sup>1)†</sup> Yang Guo-Hui<sup>2)</sup>

1) (*College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

( Received 30 April 2020; revised manuscript received 2 July 2020 )

## Abstract

In this paper, a single polarized absorptive frequency selective surface (AFSS) with ultra-wide transmission band and broad absorption band has been proposed numerically and experimentally. Based on the principle of circuit analog absorber (CAA), the proposed wideband AFSS is realized via replacing the ground plane with a band-stop frequency selective structure. The proposed AFSS is finally a hybrid structure composed of a wideband lossy frequency selective surface (FSS) in the top and a 3D band-stop frequency selective structure in the bottom. The wideband lossy FSS with thinner profile in the top is realized by utilizing a low pass capacitive elements to compensate the equivalent load inductance arising from the air space that is less than quarter wavelength installing between FSS and ground plane, and the low pass capacitive lossy FSS is synthesized using “Gong”-shaped patterns with lumped resistors. Meanwhile, the unit cell of 3D frequency selective structure consists of two electrical coupling C-shaped patterns is investigated to achieve a wide stop band with high selectivity, which can be equivalent to the ground plane in the absorption band. By cascading the wideband lossy FSS and the 3D band-stop frequency selective structure, a thinner hybrid AFSS is presented with ultra-wide transmission band and broad absorption band. The results obtained from simulation shown that an absorption band with absorptivity above 90% is obtained from 6.6 to 11.6 GHz, and the 1 dB transmission band is from 1 to 3.5 GHz with minimum insertion loss of 0.21 dB. Moreover, the performance can be guaranteed for TE-polarized oblique incidence up to 30°. Finally, a prototype is fabricated to validate its performance, the measured results shown that the 1 dB transmission band ranges from 1 to 3.5 GHz, and the absorption band is operating from 6.3 to 11 GHz at normal TE-polarized incidence. A good agreement between the experiment and simulation results is achieved, which verifies the effectiveness of the design.

**Keywords:** absorptive frequency selective surface, circuit analog absorber, ultra-wide pass band, split ring resonator (SRR)

**PACS:** 81.05.Zx, 42.60.Da, 84.30.Vn, 41.20.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200641

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFE0111100), the Key Research and Development Program of Heilongjiang Province, China (Grant No. GX17A016), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2017M620918, 2019T120134).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [liyingsong@ieee.org](mailto:liyingsong@ieee.org)