

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107079

基于超表面的低插损频率选择吸波体的仿真设计*

黎会鹏¹ 黄璞¹ 严保康²

(1.黄冈师范学院 物理与电信学院 黄冈 438000; 2.武汉科技大学 信息科学与工程学院 武汉 430081)

摘要: 该文提出了一种基于超表面的低吸高透的频率选择吸波体的设计思路,其主要目的是实现双站雷达散射截面缩减,从而增加天线系统的隐身功能。该频率选择吸波体(FSR)结构由上层的电阻层和下层的频率选择层组成,两层中间由11 mm高的塑料隔离柱隔开,两层结构均采用中字型结构进行设计。文中分析了FSR的等效电路吸波原理和透波原理,并通过参数优化查看了不同电阻值时FSR的吸波效果。通过分析不同频率下的电流分布,从物理层面解释了透波功能和吸波功能。仿真结果表明,传输带的-3 dB带宽从9.6 GHz到12 GHz。在通带中心频率10.7 GHz处,其插入损耗为0.15 dB,吸波带宽从3.84 GHz到7.84 GHz,其相对带宽达到69%,实现了吸透一体的功能效果。同时,该FSR具有较小的单元尺寸($0.026\lambda \times 0.026\lambda$, λ 为吸收带的起始频率对应的波长)。

关键词: 超表面;吸波体;等效电路;吸透一体;中字型;雷达散射截面;低插入损耗

中图分类号: TN8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Simulation design of low insertion loss frequency selective absorber based on metasurface

Li Huipeng¹ Huang Pu¹ Yan Baokang²

(1. School of Physics and Telecommunications, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China;

2. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Aiming at reducing the bistatic radar cross section and increasing the stealth function of the antenna system, a new two-dimensional hypersurface design method with low absorption and high permeability is proposed. The proposed frequency selective absorber (FSR) structure is composed of the resistance layer on the upper layer and the frequency selection layer on the lower layer. Two layers of substrate are isolated by nylon bolts and nylon columns to ensure a distance of 11 mm between both substrates. The two layers are designed with the zhong-type structure. In this paper, the principle of equivalent circuit absorption and wave penetration of FSR is analyzed, and the absorption effect of FSR with different resistance values is checked by parameter optimization. By analyzing the current distribution at different frequencies, the penetrating and absorbing functions are explained from the physical level. The simulation results show that the -3 dB bandwidth of the transmission band ranges from 9.6 GHz to 12 GHz. The insertion loss is only 0.15 dB at the center frequency of 10.7 GHz of the passband, and the absorption bandwidth ranges from 3.84 GHz to 7.84 GHz, with the relative bandwidth reaching to 69%. The FSR has a smaller unit size, i. e. the unit size is $0.026\lambda \times 0.026\lambda$.

Keywords: metasurface; FSR; equivalent circuit; transmission/absorption; zhong-type structure; radar cross section; low insertion loss

0 引言

由于频率选择表面(frequency selective surface, FSS)是一种二维平面周期结构,其具有良好的调控电磁波的特性而受到众多研究者的广泛研究。频率选择表面可以应用

于空间滤波器^[1]、无线通信^[2]、并广泛应用于雷达天线罩的设计^[3]。雷达天线罩是微波通信系统的重要组成部分,该装置能有效降低外部环境因素对天线系统的影响^[4-5]。基于频率选择表面的天线罩允许电磁波在透射带内传输,并能反射带外电磁波^[6],它能有效地降低雷达散射截面

收稿日期:2021-06-26

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51975433)、湖北省教育厅科研项目(B2019175)资助

(radar cross section, RCS),近年来在社会上得到了广泛的研究和应用。然而,传统的天线罩通过反射入射电磁波到其他方向来降低雷达散射截面,但对于双基站或多站雷达而言,其 RCS 没有较好的降低效果。为了解决传统的频率选择表面天线罩的不足,并获得更好的 RCS 抑制效果,相关学者提出了具有吸收性能的频率选择吸波体(frequency selective rasorber, FSR)构架^[7-8]。吸波体在频率选择吸收器的架构上,用带通频率选择表面代替全反射结构,在吸收带中形成通带,实现电磁波传输频段内信号通路,同时又减小了带外反射。FSR 根据吸收带与传输带的关系可分为3类:吸收带频率高于传输带频率的 FSR (T- Λ FSR)^[9-10],吸收带频率低于传输带频率的 FSR (A-T FSR)^[11],以及吸收带频率在传输带两侧的 FSR (A-T-A FSR)^[12]。

基于 FSR 的设计思路,采用方环形电阻膜和吸波蜂窝组成的多层结构在 8~18 GHz 频段上实现了 10 dB 的吸波性能^[13]。选择耶路撒冷十字环和带有负载电阻的双方形环作为带通 FSS 和电阻 FSS^[14],天线罩的吸收频段为 5.3~14.8 GHz。在双极化带吸收型频率选择性反射器的应用中^[15],其吸收波段在 10.6~18 GHz 范围,FSR 的插入损耗达到 0.76 dB。此外,基于欧姆损耗的超材料小型化 FSR,具有厚度薄和重量轻的特点,但只能实现较窄的强吸收带宽^[16-17],且这些设计的通带处插入损耗仍高于 1 dB。

本文提出了一种基于超表面的低吸高透的频率选择吸波体构架。该吸波体的上下金属结构均为中字型结构,具有较高的机械强度和承载力^[18]。基于等效电路模型对所设计的 FSR 进行分析,解释了所提出方案的吸波原理和透波原理。通过对 FSR 的表面电流分析,观察结构对不同频点的电流响应,分析了所设计结构的角度稳定性。该结构吸波频率从 3.84 GHz 到 7.84 GHz,相对带宽达到 69%。同时在 10.7 GHz 产生通带,其插入损耗为 0.15 dB,单元尺寸为 $0.026\lambda \times 0.026\lambda$ (λ 为吸收带的起始频率对应的波长),实现了低插入损耗的低吸高透的 FSR 的设计。该吸波体设计在天线、雷达等设备的 RCS 抑制和电磁屏蔽方面具有较强的应用潜力。

1 FSR 的设计与分析

1.1 FSR 模型等效电路分析

FSR 一般由两层结构组成:电阻层和频率选择表面层组成,如图 1(a)所示。频率选择表面层位于底层,主要功能是透射电磁波。电阻层位于顶层,主要由金属结构和有耗元件构成。电阻层和频率选择表面层均印制在高频介质板上,且两层通过空气隔开,其间隔为工作波长的 $1/4$ 长度。图 1(b)为 FSR 模型的等效电路^[19]。

等效电路图中 Z_1 和 Z_2 分别为电阻层和 FSS 层的特征阻抗。 Z_0 为自由空间的波阻抗^[20], Z_h 为介质板和两层板间隙空间的混合阻抗。根据传输线理论可知 FSR 等效电路的矩阵为:

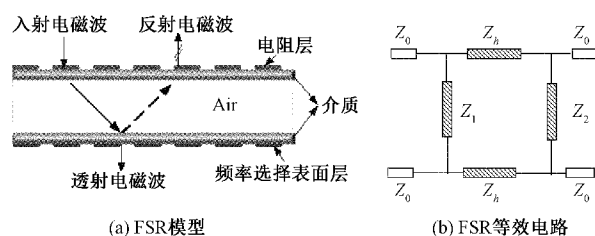


图1 FSR 模型及等效电路

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ_h \sin\theta \\ j\left(\frac{\sin\theta}{Z_h}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\frac{Z_h \sin\theta}{Z_f} + \cos\theta & jZ_h \sin\theta \\ j\frac{Z_h^2 + Z_r Z_f}{Z_h Z_r Z_f} \sin\theta + \frac{Z_h + Z_f}{Z_r Z_f} \cos\theta & j\frac{Z_h}{Z_f} \sin\theta + \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\theta = 2\pi/\lambda h$, h 为介质板之间厚度, λ 为自由空间波长。根据式(1)中的 $ABCD$ 矩阵,得到 $|s_{21}|$ 与 $|s_{11}|$ 分别为:

$$|s_{21}| = \left| \frac{2}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \right| \quad (2)$$

$$|s_{11}| = \left| \frac{A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \right| \quad (3)$$

当 FSR 工作在通带时,其传输系数 $|s_{21}| = 1$,反射系数 $|s_{11}| = 0$ 。当 FSR 工作在吸波带时,理想情况下要求传输系数 $|s_{21}| = 0$,反射系数 $|s_{11}| = 0$ 。即吸波率 $A = 1 - |s_{21}|^2 - |s_{11}|^2 = 1$,实现优良的吸波效果。

1.2 FSR 模型设计

根据上一节所介绍的等效电路模型,本文设计了一种电阻层和频率选择层均为中字型的频率选择表面吸波体结构,所不同的是,上层电阻层中字型为金属结构,而下层频率选择层采用中字型缝隙结构。所设计的三维 FSR 结构视图如图 2(a)所示。两层结构金属结构均采用铜材料,并印制在型号为 ROGERS4350B 的介质板上,其介质板的厚度为 1 mm,相对介电常数 $\epsilon = 3.66$,表 1 所示为 FSR 的其他相关参数。位于底层的频率选择表面实现入射电磁波选择性的通过。在吸波带工作频率时,由于吸波带与底层结构谐振频率相距较远,因此顶层的频率选择表面层可以等效为金属地,电阻片对金属地反射回来的电磁波进行吸收。上层电阻层可以等效为 RLC 串联结构,即与电阻连接金属可以等效为电感与电阻串联,而中间的方框可以等效为电感与电容并联。除此之外,中间的电感与电容结构也能实现在通带处谐振,这样就能满足在通带处达到切断电阻层损耗电阻元件,从而实现通带处插入损耗达到最低。

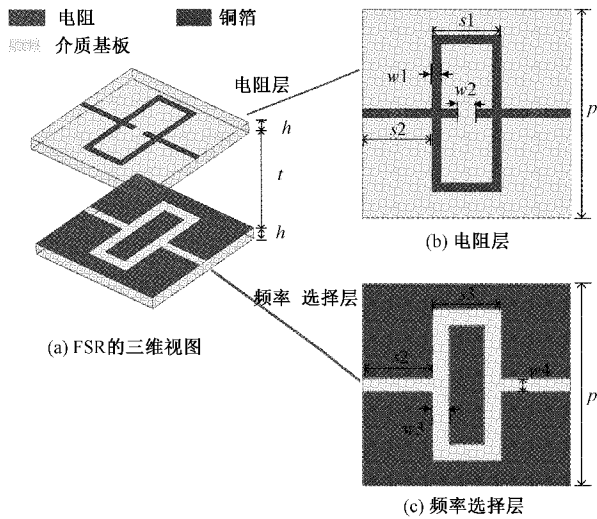


图 2 层次分布

表 1 FSR 的单元尺寸

mm					
p	h	t	$s1$	$s2$	$s3$
12	1	11	4	4	4
$w1$	$w2$	$w3$	$w4$	$R1$	
0.5	1	0.5	1	0.8	200 Ω

2 FSR 的仿真分析

2.1 FSR 的仿真

为了分析所设计的 FSR 结构的性能,使用 CST 全波仿真工具对设计的 FSR 进行了仿真。当电磁波垂直入射时,所设计的 FSR 的模拟反射/透射系数和吸收率如图 3 所示。从图 3 中可以看出,该频率选择吸波体具有低吸高透的控制电磁波的特性。通过优化参数,从图 3 中可以看到,其 -10 dB 吸收带宽从 3.84 GHz 到 8.84 GHz,其吸波率在 90% 以上的相对带宽达到 69%。同时,传输带的 -3 dB 带宽从 9.6 GHz 到 12 GHz,在通带中心频率 10.7 GHz 处,其插入损耗为 0.15 dB。

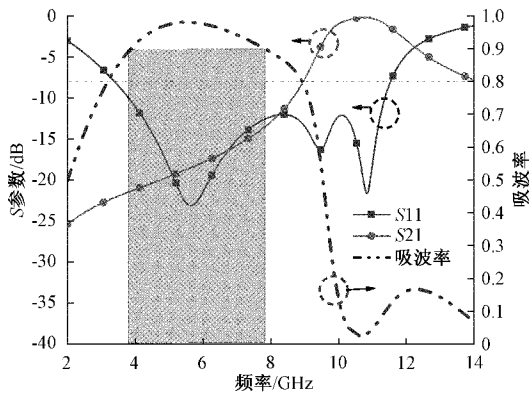


图 3 优化后的 FSR 散射曲线及吸波率

为了研究所设计的 FSR 结构对反射/透射系数的影响,本文选取影响 FSR 吸收性能的其中一个关键参数是电阻层中的电阻进行研究。为了使所设计的 FSR 在插入损耗较小的情况下获得最佳的吸收性能,通过对不同的电阻 R 值进行了优化。图 4 所示为具有不同电阻值的设计 FSR 的仿真结果。可以看出,电阻对反射系数的影响大于对透射系数的影响。通过仿真软件扫描 $R1$ 参数分别为 150、200 和 250 Ω 时不同的散射曲线,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当 $R1$ 参数选取为 200 Ω 时,吸波效果最好。而选其他两个电阻参数时,均不能达到较好的吸波效果。换句话说, R 取 200 Ω 时电阻层实现了系统的阻抗匹配。

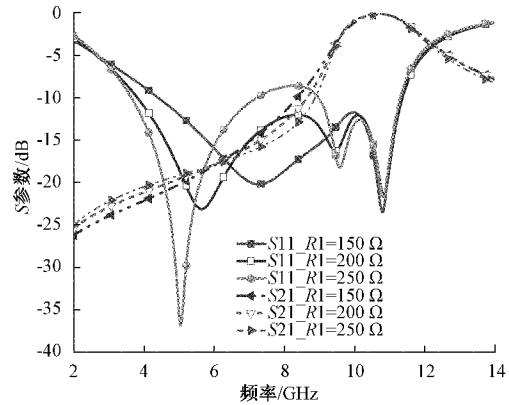


图 4 不同的 $R1$ 取值对散射曲线的影响

2.2 FSR 结构的稳定性分析

通常频率选择吸波体用于雷达天线罩时,其接收的电磁波不一定全为垂直入射,因此需要对所设计的 FSR 在不同入射角度下进行仿真分析。图 5 所示为不同入射角情况下 TE 极化波入射时所设计 FSR 结构的角敏感性。从斜入射下 TE 极化 FSR 的 S 参数结果可明显看出,所设计的频率选择吸波体雷达罩对在 TE 极化波入射时角度不敏感,在角度 45° 仍能保持较好的吸波效果。

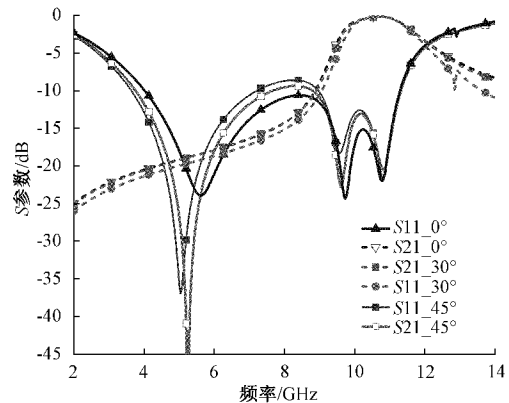


图 5 斜入射下 TE 极化 FSR 的 S 参数结果

为了进一步分析所设计的 FSR,从物理层角度对所设计的 FSR 的表面电流分布进行分析。本文选择吸波波谷

点、中心频率附近和透波谐振点 3 个谐振频率(5、8 和 10.7 GHz)处对 FSR 的电流分析进行物理分析,其电流分布如图 6 所示。其中图 6(a)为电阻层电流分布,图 6(b)为频率选择表面层电流分布。从图 6 中可知,在 5 和 8 GHz 时电阻层电流较大,而频率选择表面层电流较弱。与之相反的是在 10.7 GHz 时频率选择层电流分布较强,同时,电阻层方环部分有较大的电流。这种现象说明在通带处,上层与下层在通带频率处均有较强的电流,即在透波带处上层下层较有利于电磁波通过,这也是我们所设计的 FSR 能够在传输带实现较小的插入损耗的原因。

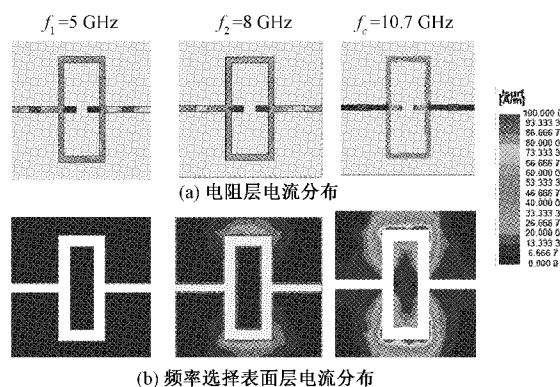


图 6 FSR 的表面电流分布图

3 结 论

本设计提出了一种上下层均为中字型的具有吸透一体功能的频率选择吸波体的设计方法。该频率选择吸波体采用两层结构进行设计,上层为电阻层,下层为频率选择表面层。频率选择表面层主要实现入射电磁波的选择,而电阻层主要功能是对电磁波进行吸收。文中分析了不同电阻值对吸波性能的影响,并对电磁波斜入射进行了分析。最后通过对 FSR 表面电流的分析,从物理层面上分析了所设计的 FSR 的吸波原理及透波原理,并解释了在通带处插入损耗较小的原因。最终设计的 FSR 的单元尺寸为 $0.026\lambda \times 0.026\lambda$ (λ 为吸收带的起始频率对应的波长),吸收频率从 3.84 GHz 到 7.84 GHz,相对带宽达到 69%。同时在 10.7 GHz 产生通带,其插入损耗为 0.15 dB。通过仿真可以看出,所设计的 FSR 能够吸收带外的入射电磁波,能够降低双基站雷达散射截面,并能在传输带处实现低插入损耗传输。

参考文献

[1] MUHARREM K A. Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications [J]. Optics Communications, 2017, 392: 31-38.
[2] COSTA F, MONORCHIO A. A frequency selective radome with wideband absorbing properties[J]. IEEE

Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(6): 2740-2747.

- [3] 丁武伟,赵文普.用于弹载雷达天线罩测试的微波接收机设计[J].电子测量技术,2016,39(1):49-53.
[4] 刘强.基于后向散射和软件定义的无线传感器网络通信[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):41-47.
[5] 张俊丽,翟政安,杨勇,等.高精度 Ka 频段测控天线卫星跟踪预报方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(4):54-60.
[6] 肖雷.频率选择表面设计及应用研究[D].成都:电子科技大学,2017.
[7] BSKSHI S C. A frequency selective surface based reconfigurable rasorber with switchable transmission/reflection band [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(1): 29-33.
[8] YU W, LUO G Q, YU Y. Dual-polarized band-absorptive frequency selective rasorber using meanderline and lumped resistors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1318-1322.
[9] WANG Z, ZENG Q, FU J. A high-transmittance frequency-selective rasorber based on dipole arrays[J]. IEEE Access, 2018: 1-13.
[10] GUO M, CHEN Q, BAI T. Wide transmission band frequency-selective rasorber based on convoluted resonator [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(5): 846-850.
[11] GUO Q, SU J, LI Z. Absorptive/transmissive frequency selective surface with wide absorption band [J]. IEEE Access, 2019,7: 92314-92321.
[12] ZHANG X, WU W, MA Y. Design dual-polarization frequency selective rasorber using split ring resonators[J]. IEEE Access, 2019,7: 101139-101146.
[13] 段坤,唐守柱. X 波段 30 dB 吸收的吸波体结构[J].电子测量技术,2020,43(2):16-20.
[14] YI B, LIU P, LI G, et al. Design of miniaturized and ultrathin absorptive/transmissive radome with wideband absorbing property [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58: 1870-1875.
[15] 杜欣,孙运强,杨瑞.圆形相控阵波束形成及干扰抑制[J].国外电子测量技术,2020,39(11):52-56.
[16] LIU L, ZHAI H, HU D, et al. A polarization-stable frequency selective rasorber with miniaturized elements and wideband absorbing properties[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(4): 1643-1650.
[17] 严祥熙,孔祥鲲,卜博锐,等.覆盖 L 波段的宽带隐身雷达天线罩设计[J].微波学报,2019(2):48-53.
[18] MEDAGEDARA M H, PEIRIS T T S, WANASEKARA N D. Review of recent advances in

- non-invasive, flexible, wearable sweat monitoring sensors[J]. *Instrumentation*, 2020, 7(2): 36-50.
- [19] GUO M, SUN Z, SAND D. Design of frequency-selective rasorbers based on centrosymmetric bended-strip resonator[J]. *IEEE Access*, 2019:24964-24970.
- [20] YU W, LUO G Q, YU Y. Miniaturized band-absorptive frequency selective rasorbers with wide absorption band[J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2019, 13(11):1777-1781.

作者简介

黎会鹏, 博士, 讲师, 主要研究方向为信号处理、频率选择表面等。

E-mail: yeshuip@sohu.com

黄璞, 硕士, 讲师, 主要研究方向为射频信号检测与优化。

E-mail: yeshuip@163.com

严保康, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为高频电路设计、信号处理等。

E-mail: 43543386@qq.com