

双波段频率选择表面复合材料的性能研究

范跃农¹, 廖章奇²

(1. 景德镇陶瓷大学 机械电子工程学院, 江西 景德镇 333403; 2. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要:以三阶正十字分行贴片旋转 45° 得到的图形为基本周期单元,设计了一种新型周期图案的频率选择表面(FSS)。将FSS和聚甲基丙烯酸酰胺泡沫复合制备得到双波段频选复合材料,通过对频率选择表面尺寸和泡沫厚度的设计,研究了其在 $1\sim 18$ GHz内的电磁波插损。研究表明,当FSS厚为 $12\ \mu\text{m}$,边界宽为 $30\ \mu\text{m}$,两侧泡沫厚为 $5\ \text{mm}$ 时,双波段频率选择超材料在特定的频段内电磁波插损的实验值和仿真值基本一致,即在 $2.5\sim 3.5$ GHz及 $8.5\sim 11$ GHz频段内,90%频点插损值小于 $0.9\ \text{dB}$;随着电磁波入射角的偏移,带内插损值增大,有效带宽减小。

关键词:频率选择表面(FSS);双波段;复合材料;插损;入射角

中图分类号: TN43 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.05.006

Study on Properties of Dual-band Frequency Selective Surface Composites

FAN Yuenong¹, LIAO Zhangqi²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, China;

2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: A kind of frequency selective surface (FSS) with a new periodic pattern has been designed by using the pattern obtained by rotating the third-order straight cross branch patch into 45° as a basic periodic unit. The dual-band frequency selective composite material has been prepared with compounding of FSS and the polymethyl acrylamide foam. The electromagnetic wave insertion loss in the range of $1\ \text{GHz}$ to $18\ \text{GHz}$ has been studied by designing the frequency selection surface size and foam thickness. The results show that the experimental value and the simulation value of the electromagnetic wave insertion loss of this dual-band frequency selective composite material in a specific frequency range are almost the same when the thickness of FSS is $12\ \mu\text{m}$, the boundary width is $30\ \mu\text{m}$ and the thickness of foam on both sides is $5\ \text{mm}$. That is, the insertion losses of frequency points of 90% are all less than $0.9\ \text{dB}$ in the range of $2.5\sim 3.5\ \text{GHz}$ and $8.5\sim 11\ \text{GHz}$. As the incident angle of the electromagnetic wave offsets, and the in-band insert loss increases, the effective bandwidth reduces.

Key words: frequency selective surface (FSS); dual band; composite material; insertion loss; incident angle

0 引言

随着无线传输和高频电子设备在商业和军事应用中的发展,电磁干扰和电磁吸收损耗倍受关注。频率选择表面(FSS)是一种新型的人工电磁材料,当入射电磁波与其相互作用时,其显现出带通或带阻的滤波特性。通常FSS是一种二维的表面周期阵列,有贴片型或孔径型两种类型。在过去20年中,FSS及其应用一直是重点研究课题。其可用于天线的增益和带宽增强,将损耗FSS和介电层进行结合制成宽带和低雷达散射截面(RCS)的吸收剂已

有报道^[1-2]。因此,根据频选单元的阵列结构、谐振元件的类型和形状等结构参数,FSS用来反射或发射电磁波。

近年来,作为复合材料之一的超材料正受到越来越多的关注。电磁超材料的亚波长结构设计,已表现出对入射电磁波的特定响应。超材料包括共振和非共振人工结构亚波长单元。1968年,Veselago首先提出超材料的概念^[3],他发现在自然界中除传统的材料,还存在因其特定结构而产生的一些独特的性能,如负介电常数和渗透特性的复合材料。

收稿日期:2018-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565020)

作者简介:范跃农(1964-),男,江西临川人,教授,博士,主要从事无机介质材料的研究。

1996年, Pendry 提出金属网具有超低的等离子体频率^[4], 这一发现开创了超材料研究的新领域, 这种类型的材料被广泛用于研究隐身斗篷、EM 超透镜、表面天线及电磁波吸收剂^[5-6]。在过去的 20 年中, 超材料的发展主要在光学和高频范围(10 GHz)内厚度和刚性较大的结构单元的电磁应用。对双频带频率选择性超材料和柔性超材料的设计^[7]的研究较少。

本文以常用的正方形栅格排布的三阶正十字周期图案 FSS 为基础, 以每个三阶正十字周期图案旋转 45° 得到的图形为基本周期单元, 给出了一种优化的新型周期图案 FSS 设计。它能实现在特定频段范围内的透波特性。为了进行对比分析, 通过上述方法得到所需的 FSS 分形结构, 然后利用计算机仿真技术(CST)仿真模拟结果, 并与使用矢量网络分析仪(安捷伦、型号 N5230A)和 2 个喇叭天线测得的实验结果进行对比验证。

1 实验

1.1 材料

制备双波段频率选择表面复合材料采用的蒙皮层是石英玻璃纤维氰酸酯预浸料, 其介电常数为 3.5~3.7, 介电损耗 $\tan \delta \approx 0.004$ 。泡沫夹芯层采用聚甲基丙烯酸酯(PMI)泡沫, 频选层采用聚酰亚胺单面覆铜板。

1.2 FSS 设计

图 1 为本文中使用的 FSS 单元。阵列排列为

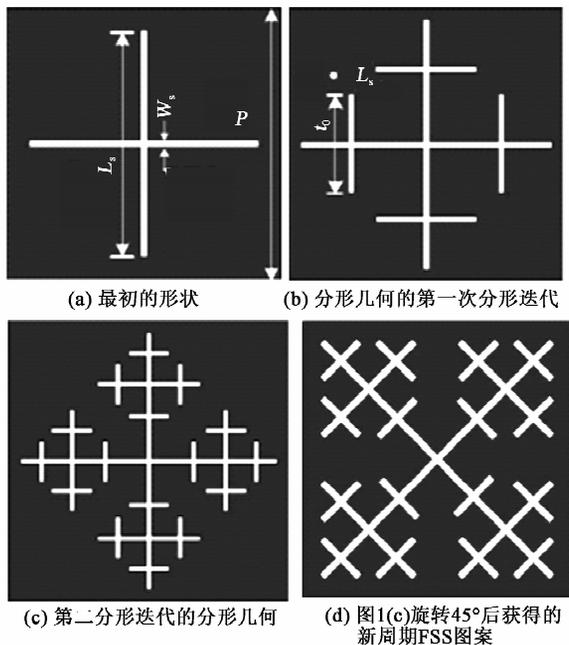


图 1 分形迭代过程(迭代阶数 $N=0\sim 2$)

正方形网格, 阵列周期为 P , 金属阵列嵌入聚酰亚胺衬底上。最初形状是基于交叉分形贴片元件的组合, 长度 $L_s=19.14\text{ mm}$, 宽度 $W_s=0.77\text{ mm}$ (见图 1(a))。图 1(b)为分形几何的第一次分形迭代, 根据交叉分形形成规则, 其尺寸为 $8.38\text{ mm} \times 0.77\text{ mm}$ 。图 1(c)为第二分形迭代的分形几何, 根据交叉分形的形成规则, 尺寸为 $2.31\text{ mm} \times 0.77\text{ mm}$ 。图 1(d)为图 1(c)旋转 45° 后获得的一种新的周期 FSS 图案。

对于图 1 中分形图形构成的 FSS, 其插损曲线在低频段是全透的, 需添加其他形状的单元达到所需特定频段电磁波透过的要求。外部金属框架的存在, 旨在增加在低频范围内的电磁波的损失, 而外部金属框架的大小未定, 通过改变边缘宽度来改变电磁波的透波率。因此, 在分形图形单元周围设计了口字型单元, 其线宽对插损有影响, 一般线宽越小, 高频处透波效果越好。采用化学刻蚀的方式加工出频选图案。

图 2 为增加了边界的 FSS 分形图案。考虑交叉分形元素的共振特性, 设计了具有交叉分形几何结构的 FSS 结构。因此, 通过该十字分形的几何形状尺寸的变化可改变 FSS 的谐振频率及频段的透波率, 从而得到一个满足电磁波在特定频率范围内传输要求的 FSS 结构。

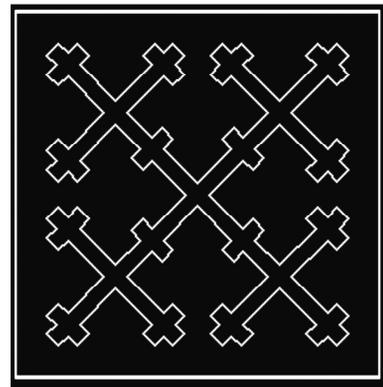


图 2 含有框架的十字分形 FSS

1.3 复合材料的制备

首先是将石英玻璃纤维氰酸酯预浸料与 PMI 泡沫进行粘接复合, 然后将频率选择表面置于泡沫夹芯层中间, 对于 FSS, 其上、下对称。为获得在特定频段范围内电磁波的透过率大于 90%, 对 FSS 中待定尺寸的变化和泡沫的厚度及对称性通过 CST Microwave Studio 进行仿真计算, 并采用成熟的镀膜及光刻技术在厚 $12\ \mu\text{m}$ 的 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 覆铜聚酰亚胺薄膜(介电常数 $\epsilon = 2.9$, $\tan \delta \approx 0.007$)

上制作分形 FSS 样件,并在微波暗室中进行其传输特性的测试,测试系统采用安捷伦 N5264 A 矢量网络分析仪,发射与接收天线是恒达迷你型喇叭天线,电磁波为垂直极化入射。图 3 为 FSS 样件。入射平面波以一定角度入射时,根据 Floquet 定理可将 FSS 周期的场用相对于 z 轴的 TM 和 TE 模式来表示。所设计的单元结构相对于 x 轴和 y 轴完全对称,垂直入射时 TE 及 TM 模式的传输特性相同。因此,只需计算 TE 模式下边框待尺寸对电磁波入射时传输系数 S_{21} 的影响。

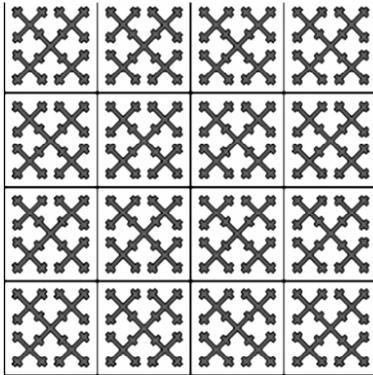


图 3 FSS 样件

2 实验结果与讨论

2.1 电磁波反射率模拟分析

图 4 为 FSS 图形中不同边界宽度尺寸的仿真曲线。当泡沫夹芯层和石英玻纤氰酸酯预浸料蒙皮只在频选单元的单侧时,其中泡沫层厚为 10 mm。由图可看出,随着待定边框宽度的增加,带内透过率逐渐减低,谐振频率保持不变。当铜箔宽为 $30\ \mu\text{m}$ 时,在 $2.33\sim 3.88\ \text{GHz}$ 及 $9.73\sim 11.95\ \text{GHz}$ 频带内,插损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$;当边框宽为 $60\ \mu\text{m}$ 时,在 $2.42\sim 3.93\ \text{GHz}$ 及 $8.82\sim 12.06\ \text{GHz}$ 频带内,插损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$ 。

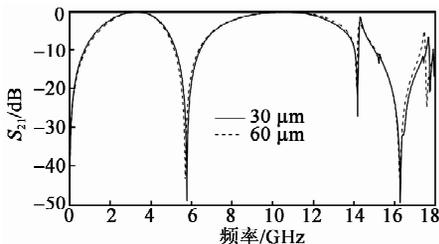


图 4 不同边宽尺寸单侧泡沫的模拟曲线

图 5 为泡沫层和石英玻纤氰酸酯预浸料蒙皮在频选单元的双侧时的仿真曲线,其中两侧泡沫厚度各为 5 mm,频选单元边宽为 $30\ \mu\text{m}$ 。由图可看出,在 $2.43\sim 3.68\ \text{GHz}$, $8.26\sim 10.89\ \text{GHz}$ 频带内,插

损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$ 。通过仿真结果,对比图 4、5 的传输系数可见,泡沫厚度对带内透过率影响较小。泡沫芯材单侧设计时,其带内透过率略低于对称加载。考虑频选层和泡沫芯材的粘接及最终结构的刚度,泡沫芯材对称设计的方案更优。

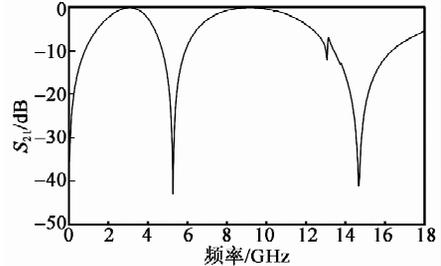


图 5 边宽为 $30\ \mu\text{m}$ 时双侧泡沫的仿真曲线

2.2 不同角度入射时传输特性

图 6 为不同入射角度下十字分形 FSS 传输特性的理论结果。其中两侧泡沫厚度各为 5 mm,频选单元边宽为 $30\ \mu\text{m}$ 。由图可看出,随着入射角偏移的增大,带内透过率逐渐略有降低,有效工作带宽减小。当 0° 入射时,在 $2.33\sim 3.88\ \text{GHz}$ 及 $9.73\sim 11.95\ \text{GHz}$ 频带内,插损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$;当 15° 入射时,在 $2.45\sim 3.65\ \text{GHz}$ 及 $8.27\sim 10.82\ \text{GHz}$ 频带内,插损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$;当 30° 入射时,在 $2.52\sim 3.58\ \text{GHz}$ 及 $8.26\sim 10.57\ \text{GHz}$ 频带内,插损小于 $0.9\ \text{dB}$,带外插损大于 $-8\ \text{dB}$ 。从仿真结果可看出,该十字分形 FSS 对入射角具有一定的稳定性。

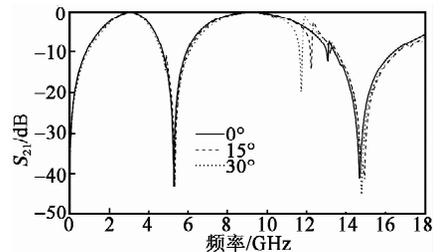


图 6 交叉分形 FSS 在不同入射角下的仿真结果

2.3 实验验证

图 7 为不同入射角度下十字分形 FSS 传输特性的实测结果。其中两侧泡沫厚度各为 5 mm,频选单元边宽为 $30\ \mu\text{m}$ 。由图可看出,随着入射角偏移量的增大,带内透过率逐渐略有降低,有效工作带宽略有减小,谐振频率大致保持不变,基本与仿真结果趋势相同。图 8~10 分别为入射角 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 时

的实测与仿真结果对比。由图可看出,入射角为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 时,在 $1\sim 18\text{ GHz}$ 内,其对电磁波的传输趋势大致相同,每个角度入射时都存在2个谐振频率,且谐振频率都在 $5\sim 6\text{ GHz}$ 和 $15\sim 16\text{ GHz}$ 内。所以,在 $2.5\sim 3.5\text{ GHz}$ 和 $8.5\sim 11\text{ GHz}$ 频率范围内,该十字分形频率选择表面能在该特定的频段范围内透波率达 90% 。当然,在某一区域内还是存在误差,但差值在测试误差允许范围内,理论结果与实验结果基本符合。

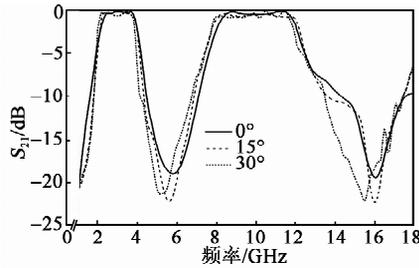


图7 交叉分形 FSS 在不同入射角下的测量结果

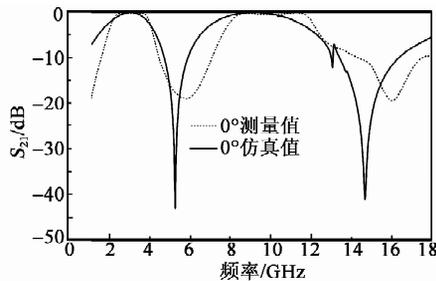


图8 在 0° 时的测量和仿真结果

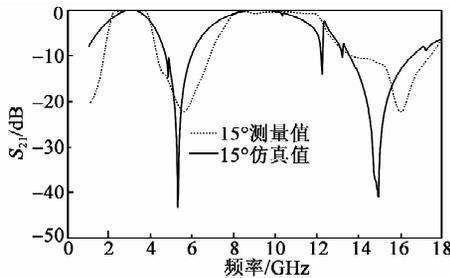


图9 在 15° 时的测量和仿真结果

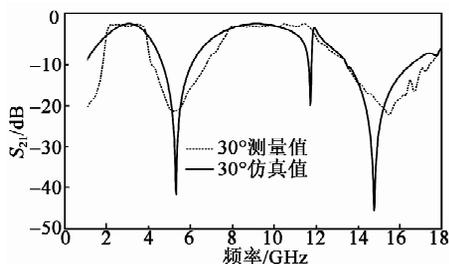


图10 在 30° 时的测量和仿真结果

3 结束语

为使单屏 FSS 具有多频谐振的特性,且能在特定频段范围内作双波段频选复合材料使用,本文做出带有边框的十字分形 FSS 结构单元。采用化学刻蚀的方式加工出频选图案,再与石英玻璃纤维氰酸酯预浸料和聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫粘接成复合材料。通过计算机仿真技术(CST)模拟仿真和实验测出该轻质复合材料在 $2.5\sim 3.5\text{ GHz}$ 和 $8.5\sim 11\text{ GHz}$ 内的透波率达 90% ,可作为一个良好实用的透波复合材料;而在 $1\sim 18\text{ GHz}$ 内其他频段范围中可作为屏蔽材料使用。对比仿真结果与实验结果发现,仿真与实验结果基本符合。在实际应用中,可通过改变单元尺寸得到所需谐振点的多频分形 FSS,但需注意第二谐振频率的角度稳定性问题。分形 FSS 还可扩展到红外甚至光学波段,应用于多波段复合制导材料。

参考文献:

- [1] FANTE R L, MCCORMACK M T. Reflection properties of the salisbury screen[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1988, 36(10): 1443-1454.
- [2] YANG F, RAHMAT-SAMII Y. Mutual coupling reduction of microstrip antennas using electromagnetic band-gap structure[C]//Boston, MA, USA: Antennas and Propagation Society International Symposium, 2001,2:478-481.
- [3] VESELAGO V G. Reviews of topical problems; the electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and μ [J]. Physics-Uspeski, 1968, 10(4):509.
- [4] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(25): 4773.
- [5] DECKER M, STAUDE I, SHISHKIN I I, et al. Dual-channel spontaneous emission of quantum dots in magnetic metamaterials [J]. Nature Communications, 2013, 4(4):2949.
- [6] YOO Y J, JU S, PARK S Y, et al. Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets[J]. Scientific Reports, 2015, 5:14018.
- [7] GAO B, YUEN M M F, YE T T. Flexible frequency selective metamaterials for microwave applications[J]. Scientific Reports, 2017, 7:45108.