

# 介质材料对频率选择表面传输特性的影响

李 南<sup>1</sup> 刘 颖<sup>2</sup> 杨洁颖<sup>1</sup> 张天翔<sup>1</sup>

(1 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

(2 电子信息控制重点实验室,成都 610036)

**文 摘** 通过理论计算和实验验证分析了介质材料对频率选择表面传输特性的影响规律,讨论了蒙皮的厚度、介电常数,芯层厚度、介电常数四个因素对 FSS 的通带位置、宽度、损耗的影响。结果表明,蒙皮和芯层厚度增厚会使通带位置向低频移动,厚度减小通带位置向高频移动;蒙皮和芯层介电增大会使通带位置向低频移动,介电减小通带位置向高频移动。并测试了同样结构的 FSS 平板传输特性,理论分析和实验结果一致性较好。

**关键词** 频率选择表面(FSS),介质材料,传输特性

中图分类号:TN04

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.019

## Influence of Dielectric Materials on Transmission Properties of Frequency Selective Surface

LI Nan<sup>1</sup> LIU Ying<sup>2</sup> YANG Jieying<sup>1</sup> ZHANG Tianxiang<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

(2 Science and Technology on Electronic Laboratory, Chengdu 610036)

**Abstract** In this paper, influences of the dielectric materials on the transmission properties of frequency selective surface are studied with theoretical calculation and experimental verification. The frequency properties, including resonance frequency, transmission bandwidth, and transmission loss, of the FSS with the skin and core of different dielectric constants, different thickness are discussed. The result shows that raising the thickness of the skin and core layer will make the bandpass position shifts to low frequency, reducing the thickness will make the the bandpass shifts to higher frequency. Raising the dielectric constant of the skin and core layer will make the bandpass position shifts to low frequency, reducing the dielectric constant will make the the bandpass shifts to higher frequency. And the transmission properties of the sample flat, which has the same structure the discussed FSS, are tested. Theoretical analysis and experimental results are in good consistency.

**Key words** Frequency selective surface, Dielectric Materials, Transmission Properties

### 0 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元,或由金属屏上周期性的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构<sup>[1]</sup>。其频率选择性表现为类似于空间滤波器,对电磁波有选择性过滤的能力。FSS已经广泛的应用于卫星、战斗机雷达罩、电磁屏蔽系统等,尤其是在实现飞行器雷达舱的隐身方面,是目前的最佳选择。雷达舱作为强散射源,既要求雷达天线能够正常工作,又要求天线系统散射尽可能降低,因

此采用频率选择表面隐身天线罩是一种方便又可行的方案。

频率选择表面的传输特性受到多个因素的影响,包括谐振单元几何尺寸、基体介质材料电磁参数、基体介质材料的厚度等共同影响。当前多数研究均集中于不同形式单元及单元栅格排列的影响分析<sup>[2-4]</sup>,研究中一般均假设介质层对 FSS 影响极小,然而根据 Ben. Munk<sup>[5-6]</sup>的报道,介质材料对 FSS 的性能影响较大,如果不充分考虑介质结构,往往会使分析结果

收稿日期:2015-04-26

作者简介:李南,1983年出生,工程师,主要从事隐身天线罩技术研究

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第4期

出现偏差;同时,若能较好的利用介质层对 FSS 的影响规律,有利于通过适当的参数设计来得到最优的 FSS 结构。Ben. Munk<sup>[6-7]</sup>研究表明,介质材料的厚度对 FSS 的谐振频率有极大的影响。冯林等<sup>[8]</sup>研究了夹层介质中的频率选择表面的散射特性,获得了谐振频率稳定,入射角不敏感的频率选择表面结构。贾宏燕等<sup>[9]</sup>研究了中间加载介质材料的双屏 Y 孔单元 FSS 的传输特性,得出了介质材料的介电常数、厚度以及传输损耗对 FSS 的传输特性均有影响。然而,以上这些研究均是基于理论设计研究,未对理论分析结果进行试验验证,理论分析和设计仅局限于无限大平面的周期结构,同试验结果存在一定误差。

本文从 FSS 的理论设计出发,研究了介质材料对频率选择表面传输特性的影响,并制作了相应结构的 FSS 平板进行了一系列对比测试,分析总结出介质材料对 FSS 的传输特性影响规律,用以指导频率选择表面天线罩的成型工艺。

### 1 理论分析及结果讨论

本文选用环形缝隙单元构成的 FSS 周期阵列,是因为这种 FSS 对不同极化和入射角的平面波具有较好的频率、带宽以及极化稳定性。如图 1 中所示环形缝隙阵列为无限大、无厚度的周期表面。图 2 为采用夹层结构的 FSS 结构图,本文之所以选用夹层结构作为研究对象,是因为夹层 FSS 结构能够获得较好的传输特性及传输角度稳定性。

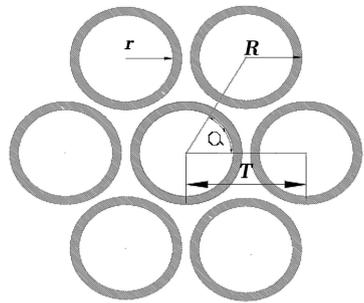


图 1 环形缝隙周期阵列  
Fig1 Annular gap periodic array

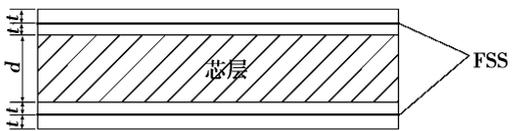


图 2 夹层结构 FSS 示意图  
Fig. 2 FSS diagram of the sandwich structure

采用模式匹配法对 FSS 结构进行分析,将周期阵列前后两侧介质区域以及自由空间中的电场和磁场分别以 Floquet 谐波模式展开,然后在周期阵列表面

上应用横向场的连续性条件,便可得到关于周期单元上未知电场的积分方程表达式。并把其中的电场用适当的基函数展开,利用矩量法求解可以得到电场,进而得到传输和反射系数。

图 1 结构图的设置参数为: $R=2.5\text{ mm}$ , $r=2.0\text{ mm}$ , $\alpha=60^\circ$ , $T=5.5\text{ mm}$ 。图形单元为正三角形栅格阵列。图 2 中夹层结构 FSS 的参数为: $t=0.4\text{ mm}$ , $d=4.5\text{ mm}$ ,蒙皮采用石英纤维增强氰酸酯树脂,蒙皮介电常数  $\epsilon=3.1$ , $\tan\delta=0.006$ ;芯层采用 PMI 泡沫或者聚氨酯泡沫,芯层介电常数  $\epsilon=1.1$ , $\tan\delta=0.005$ 。制作的 FSS 屏如图 3 所示。

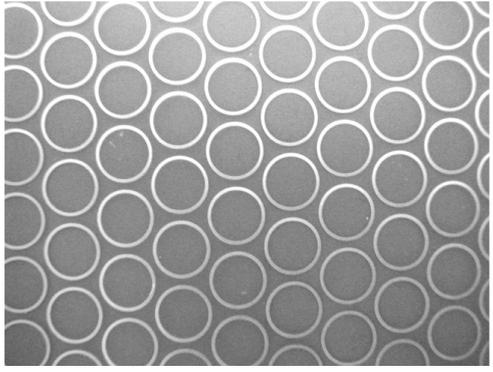
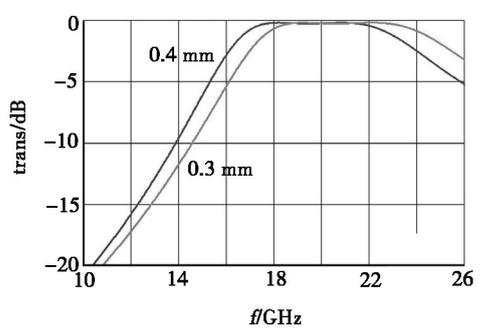


图 3 FSS 屏照片  
Fig. 3 FSS film photo

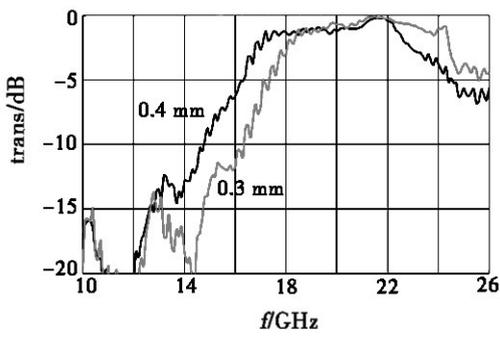
在平面波正入射时,对上述结构的夹层 FSS 结构,选取不同蒙皮厚度、蒙皮介电常数、芯层厚度、芯层介电常数及漆层计算电磁波的传输系数,同时,分别制作了不同结构的 FSS 平板,利用聚焦喇叭天线测试其传输特性,与理论结果进行对比,研究介质材料对 FSS 的传输特性影响。

#### 1.1 蒙皮厚度的影响

不同厚度蒙皮的 FSS 透波率曲线见图 4,图 4 (a)为 FSS 平板透波率仿真曲线,FSS 单侧蒙皮分别为 0.3、0.4 mm,由图中仿真结果可以看出,蒙皮减薄会使 FSS 的通带区域往高频移动,但蒙皮厚度较小的变化不会影响通带宽度和通带损耗。



(a) 仿真曲线



(b) 平板实测曲线

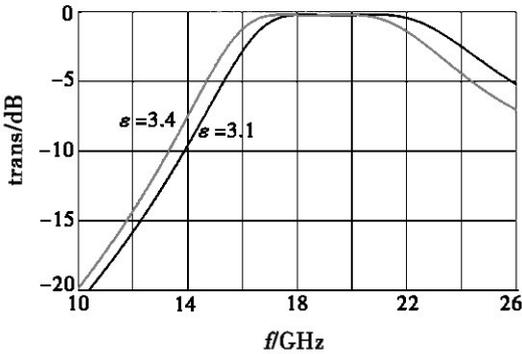
图4 不同厚度蒙皮的FSS透波率曲线

Fig.4 FSS transparent curves of different thickness skin

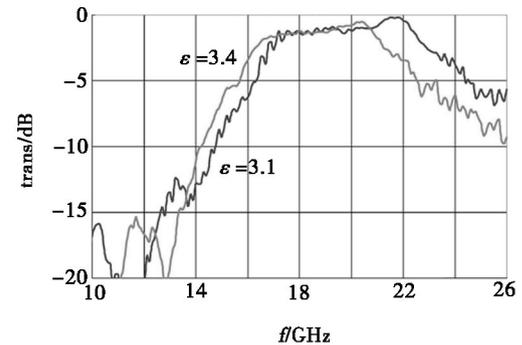
图4(b)为FSS平板试验件实测透波率曲线,可以看出,传输特性结果同仿真结果一致性很好,单侧蒙皮的减薄会使通带往高频移动,而通带宽度及通带损耗基本不变。

### 1.2 蒙皮介电常数的影响

图5为蒙皮介电常数分别为3.4和3.1的FSS平板透波率仿真和实测曲线。



(a) 仿真



(b) 平板实测

图5 不同介电常数蒙皮透波率曲线

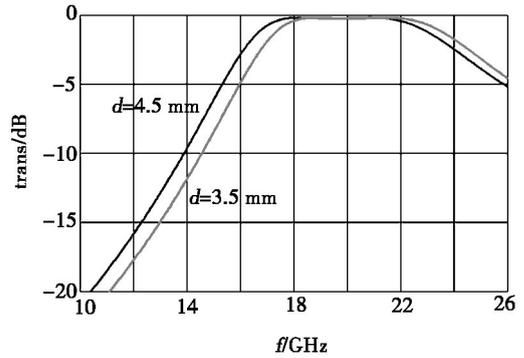
Fig.5 Transparent curves of skin with different dielectric constant

从图5可以看出,FSS平板实测传输特性结果同仿真结果一致性很好,介电常数的增大会使FSS的通带往低频方向移动,但通带顶部出现轻微凹陷,通带损耗增加,这主要是由于改变了芯层的介电常数,但是并没有调整其厚度,使各层匹配特性变差,改变介电常数后的结构不是最优结构,因此通带损耗增加,顶部出现凹陷。

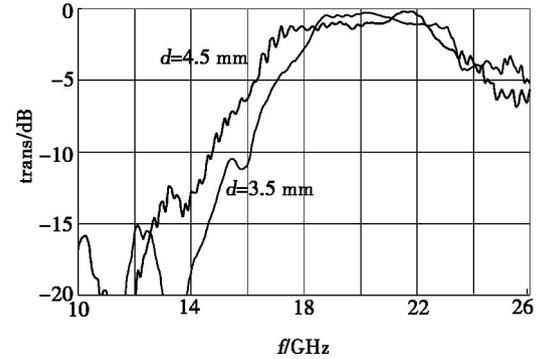
带向低频方向移动,但较蒙皮厚度变化引起的通带移动要小;通带宽度有所减小,介电常数的增大引起频带高端的下降要大于频带低端,整体带宽稍有减小;通带损耗基本保持不变。

### 1.3 芯层厚度的影响

图6为芯层厚度分别为4.5和3.5 mm的FSS平板透波率仿真和实测曲线。可以看出,FSS平板实测传输特性结果同仿真结果一致性很好,芯层厚度的减小会使FSS的通带向高频方向移动;通带宽度有所减小,芯层厚度的减小引起频带高端的升高要小于频带低端,整体带宽稍有减小;通带损耗基本保持不变。



(a) 仿真曲线



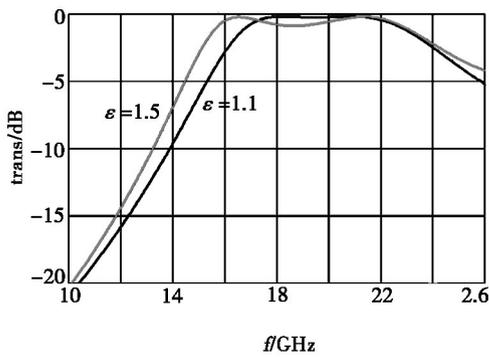
(b) 平板实测曲线

图6 不同厚度芯层的FSS透波率曲线

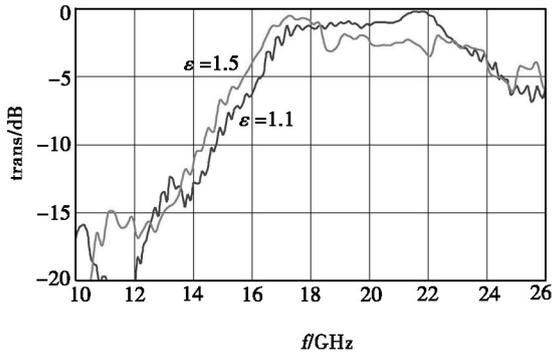
Fig.6 Transparent curves of different thickness core layer

### 1.4 芯层介电常数的影响

图7为芯层介电常数分别为1.1和1.5的FSS平板透波率仿真和实测曲线( $\epsilon=1.1$ 为德固赛PMI泡沫, $\epsilon=1.5$ 为自制聚氨酯泡沫)。可以看出,FSS平板实测传输特性结果同仿真结果一致性很好,芯层介电常数的增大会使FSS的通带向低频方向移动;但通带顶部出现轻微凹陷,通带损耗增加,这主要是由于改变了芯层的介电常数,但是并没有调整其厚度,使各层匹配特性变差,改变介电常数后的结构不是最优结构,因此通带损耗增加,顶部出现凹陷。



(a) 仿真曲线



(b) 平板实测曲线

图7 不同介电常数芯层的FSS透波率曲线

Fig. 7 Transparent curves of core layer with different dielectric constant

## 2 结论

介质材料对频率选择表面的传输特性有着较大的影响,本文结合模式匹配法和FSS平板试验验证,研究了介质材料对FSS传输特性的影响规律。结果表明:蒙皮厚度的变薄会使FSS的通带位置向高频移动,但通带带宽和通带损耗基本不变;蒙皮介电常数的增大会使通带往低频移动,同时通带带宽变窄,通

带损耗不变;芯层厚度变薄会使通带往高频移动,通带带宽变窄,通带损耗不变;芯层介电常数的增大会使通带往低频移动,传输特性变差,通带损耗增大。这些规律对FSS设计和后期工艺成型均有较大的指导意义,在设计时要充分考虑到工艺成型的误差对FSS带来的影响,将设计和工艺结合起来,以保证FSS的传输特性满足设计要求。

## 参考文献

- [1] Wu T K. Frequency selective surface and grid array [M]. New York: Wiley, 1995
- [2] Mittra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-A review. Proc. IEEE, 1988, 76 (12): 1593-1615
- [3] 贾宏燕,高劲松,等. 一种新型组合单元频率选择表面[J]. 光学学报,2008,28(8): 1596-1600
- [4] 路宝,龚书喜,等. 一种新型频率选择表面及其在天线雷达散射截面减缩中的应用[J]. 电子与信息学报,2010, 32(1): 199-202
- [5] Luebbers R J, Munk B A. Some effects of dielectric loading on periodic slot arrays[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1978, 26(4): 536-542
- [6] Munk B A. Frequency Selective Surface: Theory and Design[M]. New York: Wiley, 2000
- [7] 侯新宇,等译. 频率选择表面:理论与设计[M]. 北京:国防工业出版社,2006
- [8] 冯林,阮颖铮. 介质层中频率选择表面散射特性分析[J]. 航空学报,1994,15(9): 1122-1125
- [9] 贾宏燕,高劲松. 双屏频率选择表面中间电介质层对传输特性的影响规律[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007,2(6):593-596

(编辑 任涛)