

文章编号:1001-9014(2005)01-0027-04

# 介质加载对频率选择表面传输特性影响的实验研究

王焕青, 吕明云, 武哲

(北京航空航天大学 513 教研室, 北京 100083)

**摘要:**通过实验测试,从介质厚度、加载方式以及各参数对入射角的敏感性等方面,初步探讨了介质加载对频率选择表面(Frequency selective surfaces,简称FSS)传输特性的影响。结果表明,介质加载使FSS的谐振频率降低;加载不同厚度的介质对FSS的透波率和谐振频率影响不同;对称加载介质能提高FSS传输特性对入射角的稳定性。

**关键词:**频率选择表面;传输特性;实验研究;介质加载

**中图分类号:**TN015 **文献标识码:**A

## EXPERIMENT ON THE INFLUENCE OF DIELECTRIC LOADING ON TRANSMISSION PROPERTIES OF FREQUENCY SELECTIVE SURFACES

WANG Huan-Qing, LV Ming-Yun, WU Zhe

(Faculty 513, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Effects of the dielectric loading on the transmission properties of frequency selective surfaces (FSS) were preliminarily explored by experiment, especially in the thickness, loading patterns of the dielectric and the sensitivities of the fore-mentioned parameters to the varying angle of incidence. The experimental results show that the resonant frequency of FSS decreases with the dielectric loading, the transmission ratio and resonant frequency are changed with the different dielectric thickness, and the dielectric symmetrically loading can stabilize the FSS transmission characteristic as the angle of incidence is varied.

**Key words:** frequency selective surfaces (FSS); transmission properties; experimental investigation; dielectric loading.

### 引言

降低飞机头部攻击锥方向的雷达散射截面是一个十分复杂的问题,采用频率选择表面(Frequency Selective Surfaces,简称FSS)带通雷达罩是实现雷达天线隐身的一个较好的办法。FSS结构是指在导电金属表面上布满周期性的缝隙或介质表面上布满周期性的金属贴片,它能有效地控制电磁波的反射和传输特性,其实质是一种滤波器。FSS的各种分析方法中,国外的理论比较成熟,且FSS已被广泛应用于微波天线和雷达罩的设计中。由于FSS在GHz频段的重要用途是带通雷达罩的设计,涉及到军事技术,故国外有关的实验成果公开的较少。在国内,大多数文献是从理论上分析FSS,有关实际应用的较少。由于自由FSS(指不贴附任何介质的金属缝隙或金属

贴片)通常是附着在介质层表面或者夹在其中,这时就必须考虑介质对FSS传输特性的影响。侯新宇<sup>[1]</sup>等采用模匹配法分析了带有多层介质衬底的FSS频率响应技术,着重讨论了介质厚度变化对FSS传输特性的影响。冯林<sup>[2]</sup>等利用等效电路法分析了夹在介质层中的FSS散射特性。Munk<sup>[3]</sup>就介质加载对平板FSS的透波特性从理论上进行了较为详尽的分析。本文通过对机械加工成型的FSS进行测试,分别从介质的加载方式,介质厚度,以及各参数对带宽的影响、对入射角的敏感性等方面来初步研究介质加载对FSS平板传输特性的影响。

### 1 实验

图1是在微波暗室内配备的一套测试系统,用于测量FSS平板的空间透波特性的。其中Tx、Rx分别

收稿日期:2004-03-15,修回日期:2004-09-15

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划重点资助项目(90305026)

作者简介:王焕青(1973-),女,山东莘县人,博士生。主要研究方向:飞机雷达隐身设计、双曲FSS雷达罩性能分析与设计等。

Received date: 2004-03-15, revised date: 2004-09-15

是发射和接收双脊喇叭天线,测试件距离发射天线 3m 左右,距接收天线 0.7m 左右,背景在  $-35\text{dBsm}$  以下,测量频段  $8 \sim 17\text{GHz}$ ,TE 极化。 $\vec{k}$  是电磁波的人射方向,入射角  $\theta$  从  $0^\circ \sim 60^\circ$  每隔  $15^\circ$  扫频一次。

图 2 是由具有 6 自由度的机器人加工而成的 FSS 平板,平板尺寸:(长  $\times$  宽  $\times$  厚)  $800 \times 600 \times 1.0\text{mm}$  (含覆铜层厚  $37\mu\text{m}$ ),且单侧覆铜。FSS 振子单元是圆环,中线半径  $3.55\text{mm}$ ,缝隙宽度  $0.4\text{mm}$ ,周期是  $13\text{mm} \times 13\text{mm}$ ,方形排列。试验结果中的数据  $0.98$  及  $1.65$  等是指介质的厚度(mm),这里的介质与 FSS 平板中的相同,是一种复合材料,其相对介电常数是  $5.2 \sim 5.6$  (室温,  $9.377\text{GHz}$  条件下的测试结果)。

## 2 实验结果

实验结果中,  $0$  度、 $2.63 + \text{自由 FSS} + 0.98$  ( $10.2, -1.91$ ),是指 TE 波以  $0$  度入射角(图 1 中的  $\theta$ )照射,依次经过  $2.63\text{mm}$  厚的介质、自由 FSS,再经过  $0.98\text{mm}$  厚的介质散射出去。括号中的  $10.2$ 、

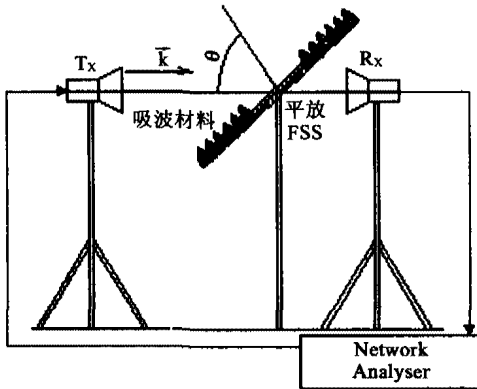


图 1 测试系统  
Fig. 1 Measuring system

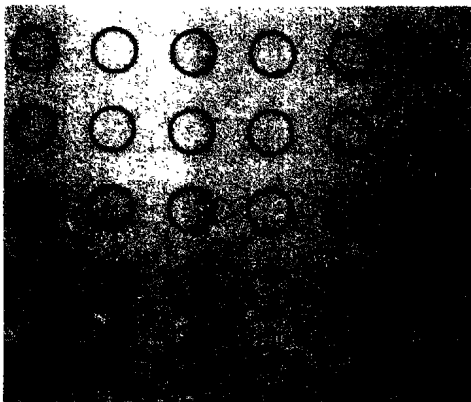


图 2 机械加工成型的 FSS  
Fig. 2 FSS machined

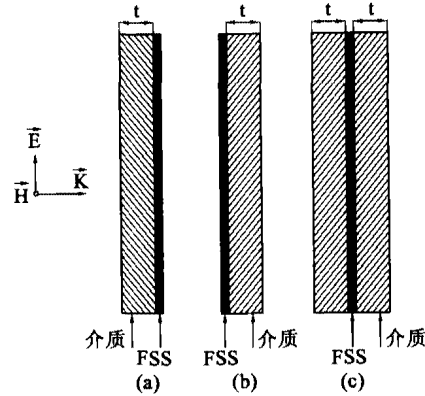


图 3 介质加载的 FSS  
自由 FSS(a)在右侧 (b)在左侧 (c)镶嵌在介质中  
Fig. 3 FSS with dielectric layers  
free FSS(a) on right side (b) on left side (c) embedded

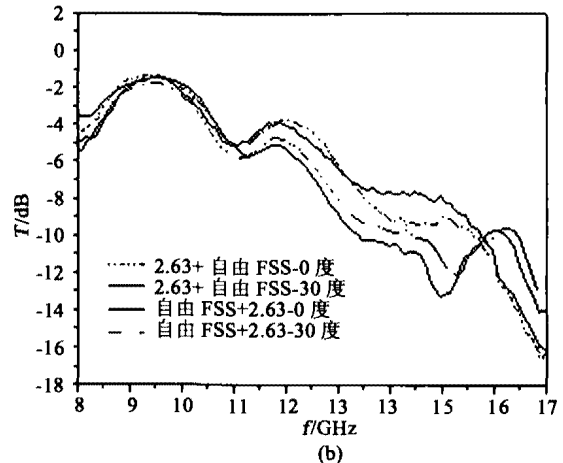
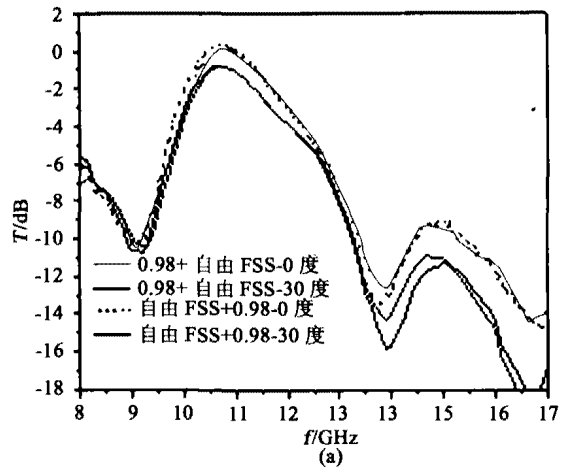


图 4 不同方位介质加载时 FSS 平板的透波特性 介质厚度(a)  $0.98$  (b)  $2.63$   
Fig. 4 Transmission response of dielectric loading on different sides of FSS dielectric thickness (a)  $0.98$  (b)  $2.63$

$-1.91$  是指在扫频  $8 \sim 17\text{GHz}$  的范围内电磁波传输经过 FSS 平板后,最高透波率  $T$  为  $-1.91\text{dB}$ ,且此时的谐振频率  $f$  是  $10.2\text{GHz}$ 。

图 4(a)、(b)是在自由 FSS 屏的不同侧加载介

质,厚度  $t$  分别为 0.98 和 2.63 时, FSS 平板的透波特性曲线. 图 4(a) 中,  $t$  为 0.98 的 FSS 平板, 无论入射角是  $0^\circ$  还是  $30^\circ$ , 介质加载方式是图 3 中的 (a) 还是 (b), 其透波率  $T$  基本是相同的, 且其谐振频率  $f$  基本相同. 厚度增加 ( $t$  为 2.63) 时, 如图 4(b), 测试结论相同. 也就是说, 不论电磁波从哪一侧入射, 平板 FSS 的透波性能都是相同的, 这一点与不含自由 FSS 的纯介质板的透波性能相同<sup>[4]</sup>.

图 5(a)、(b) 分别是不同厚度的介质加载、入射角不同时, FSS 平板的透波特性曲线. 很明显, 加载不同厚度的介质 FSS 平板对入射角的敏感性不同,  $t$  为 2.63 的要比 0.98 的对入射角度的敏感性低. 随着  $t$  的增加, FSS 平板的透波特性对入射角的敏感性降低. 如果采用适当的介质 (合适的介质厚度和相对介电常数) 加载后, 谐振频率  $f$  随入射角的改变而改变的情况可以达到最低限度<sup>[5]</sup>. 由图 5(b) 可以看出, 不同  $t$  值的 FSS 平板其带宽对入射角的

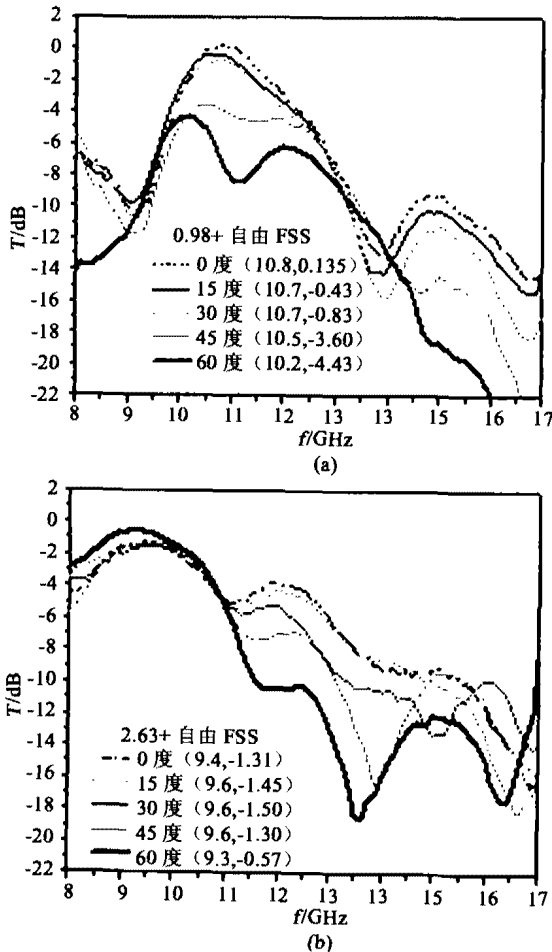


图 5 不同入射角度时 FSS 平板的透波特性 介质厚度 (a)0.98 (b)2.63  
Fig. 5 Transmission response of different incidence angle of FSS dielectric thickness (a)0.98 (b)2.63

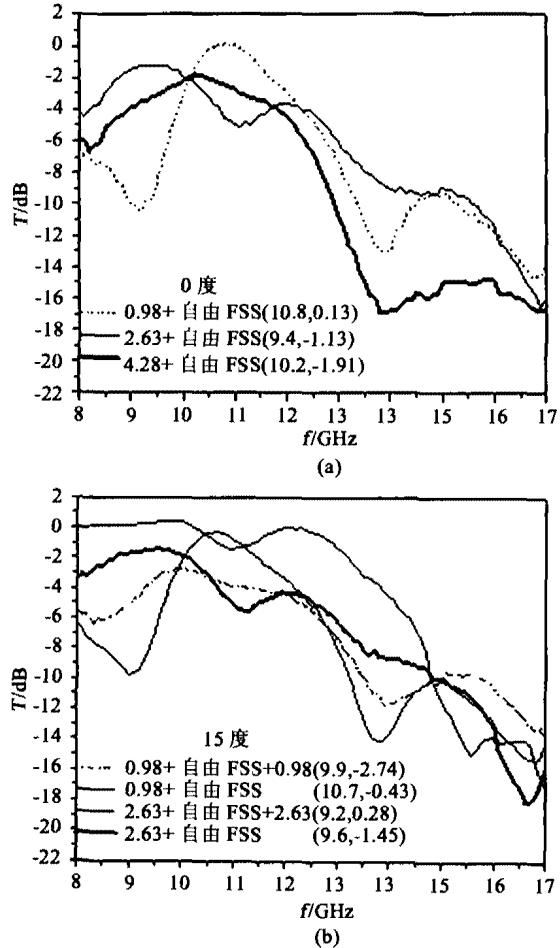


图 6 不同厚度介质加载的 FSS 平板透波特性 介质加载方式 (a)单侧加载 (b)对称加载与单侧加载  
Fig. 6 Transmission response of different dielectric thickness of FSS patterns of dielectric loading (a) single side (b) symmetry and single side

敏感性也不同.  $t$  愈大, 其带宽对入射角就愈不敏感. 但是介质的厚度应与介质半波长的整数倍相匹配<sup>[3]</sup>, 否则, FSS 平板的透波率  $T$  将会大大降低.

图 6(a) 是左侧加载不同厚度的介质时 FSS 平板的透波特性曲线. 在自由 FSS 的一侧加载介质, 谐振频率降低.  $t$  值较小时, 由图 6(a) 中 0.98 和 2.63 的曲线比较, FSS 平板的谐振频率随厚度的增加而降低, 这与文献<sup>[5]</sup>中的结论相同. 但当  $t$  达到一定的值后, 图中 4.28 的曲线, 谐振频率随  $t$  的增加又升高了.

图 6(b) 是自由 FSS 分别按图 3 中的 (a) 和 (c) 加载介质时 FSS 平板的透波特性曲线. 单侧加载介质时的谐振频率较对称加载时的低, 即谐振频率左移的程度小.  $t$  为 0.98 时, 对称加载时的谐振频率 (9.9GHz) 低于单侧加载的值 (10.7GHz);  $t$  为 2.63 时, 由于  $9.2\text{GHz} < 9.6\text{GHz}$ , 结论同样成立.

### 3 分析与讨论

根据自由 FSS 中振子的基本形状和尺寸可预估自由 FSS 的谐振频率  $f_0$ <sup>[3]</sup>。然而, FSS 平板谐振频率的确定还依赖于附在自由 FSS 上的介质。下面讨论介质加载于单侧或对称加载且厚度变化时, FSS 平板的谐振频率是如何预估的。设自由 FSS 的谐振频率是  $f_0$ ,  $f_1$  和  $f_2$  的计算公式如下:

$$f_1 = f_0 / \sqrt{\epsilon_r}, f_2 = f_0 / \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}, \quad (1)$$

对称加载时, 假设 FSS 被无限厚度 ( $t \rightarrow \infty$ ) 的介质 (相对介电常数  $\epsilon_r$ ) 加载, 由 Maxwell 方程很容易得出, 谐振频率将降至  $f_1$ ; 假如介质厚度  $t$  减至有限值, 则谐振频率将处于  $f_0$  及  $f_1$  之间。然而当  $t$  减至很小 (约  $0.05\lambda_0$ ) 时, 谐振频率将趋近于自由 FSS 的  $f_0$ , 其理论值约是 13.5GHz<sup>[3]</sup>。由公式 (1) 得,  $f_1 = 5.69\text{GHz}$ ,  $f_2 = 7.41\text{GHz}$ 。图 6(b) 中,  $t$  较大 (2.63 大于  $0.05\lambda_0$ ) 时, 对称加载与单侧加载的谐振频率值分别是  $f_{1M} = 9.2$ 、 $f_{2M} = 9.6$ , 皆处于  $f_0$  和  $f_1$  之间。当  $t$  较小 (0.98) 时, 对称加载与单侧加载的谐振频率值分别是  $f'_{1M} = 9.9$ 、 $f'_{2M} = 10.7$ 。由  $f_{2M} > f_{1M}$ ,  $f'_{2M} > f'_{1M}$  可知, 对称加载时的谐振频率降低的幅度较大。也就是说, 对称加载时谐振频率的值接近于  $f_1$ , 单侧加载时的谐振频率接近于  $f_2$ 。测试结果在误差允许的范围内与文献 [3] 中的结论还是很一致的。

### 4 结语

无论介质加载在自由 FSS 的哪一侧 (前侧或后

侧), 对 FSS 平板的传输特性是没有影响的。介质加载能提高 FSS 平板对入射角的稳定性, 尤其是介质厚板。介质越厚, 谐振带宽也就越大。在自由 FSS 的一侧加载不同厚度的介质, 厚度由小变大时, 起初谐振频率下降的幅度较大, 随着厚度的增加, 谐振频率又有回升的趋势。自由 FSS 被无限厚度的介质对称加载时, 谐振频率将降至  $f_1$ ; 介质厚度减至有限值  $t$  时, 谐振频率将处于  $f_0$  及  $f_1$  之间; 介质加载于 FSS 的单侧时, 谐振频率最大值将趋近于  $f_2$ 。欲获得较好的透波曲线, 在自由 FSS 的两侧对称加载介质, 且介质的厚度要与自由空间的半波长相匹配。

### REFERENCES

- [1] HOU Xin-Yu, WAN Wei, TONG Ming-An, *et al.* Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multi-Layer dielectric substrates [J], *Journal of Microwave* (侯新宇, 王伟, 佟明安等. 带有多层介质衬底 FSS 的损耗和带宽特性分析. *微波学报*), 1999, **15** (4): 366—370.
- [2] FENG Lin, RUAN Ying-Zheng. Analysis of FSS sandwiched in a dielectric sheet [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (冯林, 阮颖铮. 介质层中频率选择表面特性分析. *航空学报*), 1994, **15** (9): 1122—1125.
- [3] Munk B A. *Frequency selective surfaces: theory and design* [M]. New York: John Wiley, 2000.
- [4] DU Yao-Wei, *Telecommunication Design Method of Radome* [M]. Beijing: National Defence Industry Press (杜耀惟. *天线罩电信设计方法*. 北京: 国防工业出版社), 1993.
- [5] Callaghan P, Parker E A, Langley R J. Influence of supporting dielectric layers on the transmission properties of frequency selective surfaces [J], *IEE Proceedings-H*. 1991, **138**(5): 448—454.