

FSS 对 TE 极化波传输特性的实验研究

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, 从单元的尺寸、形状、介质加载以及各参数对入射角的敏感性等方面, 初步探讨了频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, 简称 FSS)对 TE 波的传输特性. 结果表明, FSS 的谐振频率主要由单元的尺寸和形状确定; 介质加载使得 FSS 平板的谐振频率降低; 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 的传输特性对入射角的稳定性.

关键词: 频率选择表面 (FSS); 传输特性; 介质加载; 实验研究; 谐振频率

中图分类号: TN82 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 06 1099-03

Experiment on Transmission Properties of TE Polarized Plane Wave Incidented on Frequency Selective Surfaces

WANG Huanqing, LÜ Mingyun, WU Zhe

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

Abstract: The transmission properties of TE polarized plane wave incident on frequency selective surfaces(FSS) was preliminarily explored by experiment, especially in the elementary geometry, types, the dielectric thickness, loading patterns, and the sensitivities to the varying angles of incidence. The experimental results are described as the following. The resonant frequency of FSS is mainly determined by the elementary geometry and types. The resonant frequency of FSS decreases with the dielectric loading. The transmission ratio and resonant frequency are changed with the different dielectric thickness. 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; dielectric loading; experimental investigation; resonant frequency

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, 简称 FSS)结构是指在导电金属表面上布满周期性的缝隙或在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. 在 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. 在国内, 大多数文献是从理论上分析 FSS, 有关的实验研究较少, 而国外有关 GHz 频段的实验成果也很难得到. 在实际应用中, 自由 FSS(指不贴覆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, 必须考虑介质对 FSS 传输特性的影响. 陈国瑞^[1]等用圆环单元对 FSS 的实验研究做了简介. 侯新宇^[2]等采用模匹配方法分析了带有多层介质衬底的 FSS 频率响应技术, 并着重讨论了介质层厚度变化对 FSS 传输损耗及带宽的影响. 冯林^[3]等利用等效电路法分析了夹在介质层中的 FSS 传输特性. Munk^[4]对 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 平板进行测试, 分别从单元的尺寸、形状, 介质的加载以及各

参数对带宽的影响、对入射角的敏感性等方面来初步研究 FSS 平板的传输特性.

2 实验

在微波暗室内配备了一套测试系统^[5], 用于测量 FSS 平板的空间透波特性. 为保证实验数据的可靠性, 暗室内的四面墙、顶部以及地面都覆盖了锥形的吸波材料, 减小干扰, 并尽可能保证测量结果的准确度. 测试背景在 -35dBsm 以下, 测量频段 8~17GHz, TE 极化, 入射角从 0°~60°每隔 15°扫频一次.

FSS 平板^[5]是由具有 6 自由度的机器人加工而成的, 平板尺寸:(长×宽×厚)800×600×1.0mm(含覆铜层厚 374μm), 且单侧覆铜. 自由 FSS 后所附介质是一种复合材料, 其相对介电常数是 5.2~5.6(9.377GHz 条件下的测试结果).

3 实验结果

测试结果中, 0 度、2.63+ 自由 FSS+ 0.98 (10.2, -1.91), 是指 TE 波以 0 度入射角照射, 依次经过 2.63mm 厚的介质、

自由FSS,再经过0.98mm厚的介质散射出去.括号中的10.2、-1.91是指在扫频8~17GHz的范围内电磁波传输经过FSS平板后,最高透波率为-1.91dB,且此时的谐振频率是10.2GHz.

图1所示的透波曲线,其FSS平板单元是六边形,平均边长3.73mm,缝隙宽度0.3mm,周期15mm×15mm,正三角排列.很明显,谐振频率约为9.8GHz.如果将六边形的平均边长改为3.70mm,其他条件不变时,测试的谐振频率约为10.4GHz.由此可知,当单元的谐振边长增加时,其谐振频率降低.

图2为30°入射角,单元的形状不同时FSS平板的透波曲线.六边形、八边形的平均边长分别为3.80mm、2.85mm,圆形的平均半径为3.64mm.由图表明,当单元的谐振长度相同(平均周长均为22.8mm)时,虽然其形状不同,但它们的谐振频率点却是基本相同的(谐振频率约为9.6~9.7GHz).由图2还可知,八边形和圆形单元的带通宽度较六边形单元的窄些.

下面的实验中,FSS平板的单元是圆环,平均半径3.55mm,缝隙宽度0.4mm,周期13mm×13mm,方形排列.试验结果中的数据0.98及2.63等是指介质的厚度(mm),这里的介质与加工前FSS平板中所附的介质相同.

图3(a)、(b)分别是不同厚度的介质加载、入射角不同时FSS平板的透波曲线.由图可知,不同厚度的介质对入射角的敏感性不同,介质厚度为2.63(图3(b))的透波特性要比0.98(图3(a))的对入射角的敏感性低.由图3还可以看出,不同介质厚度的FSS平板其带宽对入射角的敏感性也不同.介质厚度为2.63的FSS平板与厚度为0.98的相比,前者的带宽对入射角的敏感性较低.

图4(a)是左侧加载不同厚度的介质时FSS平板的透波曲线.厚度较小时,由图中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[5]中的结论相同.但当介质厚度达到一定的值以后(图中4.28的曲线),谐振频率随介质厚度的增加又略有升高.图4(b)是自由FSS分别为单侧加载和两侧对称加载介质时FSS平板的透波曲线.加载介质厚度为0.98时,对称加载的谐振频率(9.9GHz)低于单侧加载的值(10.7GHz);加载介质的厚度为2.63时,由于9.2GHz<9.6GHz,同样是对称加载时的谐振频率比单侧加载时的低.

4 分析与讨论

由电磁场知识可知,对于缝隙型的线性偶极子单元,在平面波的照射下,如果偶极子单元的长度约为入射波半波长的整数倍时,该单元就会发生半波谐振;对于环形(如圆环、方环等)缝隙结构,如果它们的周长为入射波波长的整数倍时,也会产生谐振现象(即半个环相当于一个偶极子).图1

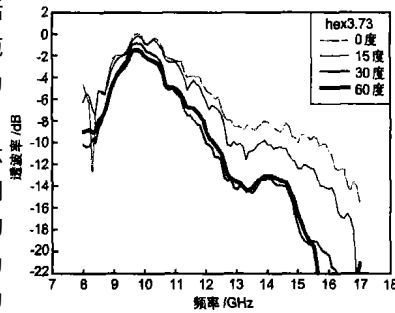


图1 六边形单元的FSS平板透波曲线

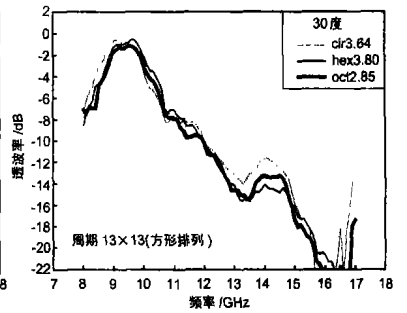


图2 30度入射角时三种单元的FSS平板透波曲线

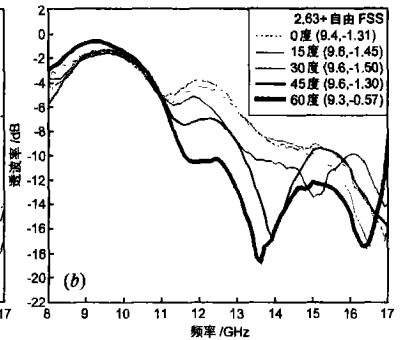
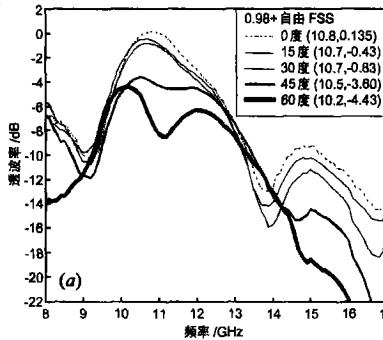


图3 不同入射角度时FSS平板的透波曲线,介质厚度(a)0.98;(b)2.63

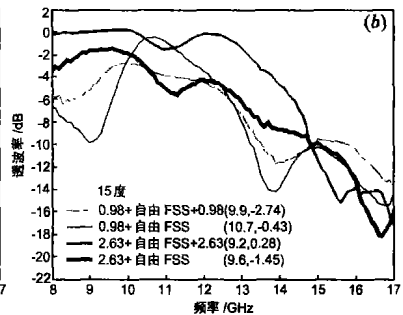
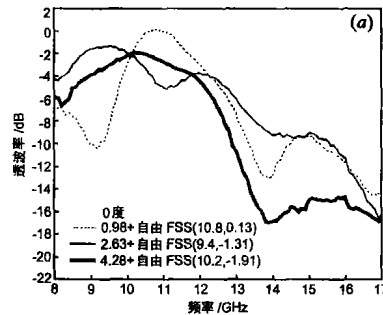


图4 不同厚度介质加载的FSS平板透波曲线,(a)单侧加载介质;(b)对称加载与单侧加载介质的比较

中所测六边形的平均边长为3.73mm,另一六边形平均边长为3.70mm,其平均周长分别为11.2mm和11.1mm,对应的谐振频率理论值应为13.4GHz、13.5GHz,测试结果为9.8GHz、10.4GHz.如果排除介质加载的影响(因为介质的加载使得谐振频率降低^[9]),此测试结果与上述的理论还是较为一致的.因为长度为一个波长的偶极子会在其侧面产生一个弱谐振,因此,为了使高次谐振的能量得到抑制,应使每个环的周长为一个波长而非波长的整数倍.图1中的单元皆取一个波长的长度,六边形、八边形、圆形的平均周长相同(22.8mm),其谐振频率的测试结果是一致的.

当FSS附着在介质衬底上时,由于电磁波在介质中传播时介质中的波长要减小,而单元的谐振波长是不变的,因此相当于谐振频率降低了.而且当介质的厚度与所要求的谐振波长的1/2整数倍相匹配时,透波率较高^[7].但是介质因素的影响是一个很复杂的问题,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:

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

对称加载时, 假设 FSS 被无限厚度(趋于 ∞)的介质(相对介电常数 ϵ_r)加载, 那么由 Maxwell 方程很容易得出, 谐振频率将降至 f_1 ; 假如介质厚度减至有限值, 则谐振频率将处于 f_0 及 f_1 之间。然而当介质厚度减至很小(约 $0.05\lambda_0$)时, 谐振频率将趋近于自由 FSS 的 f_0 。本试验中的圆环单元, 其平均半径为 3.55 , 谐振频率的理论值约是 13.5GHz 。由公式(1)得, $f_1 = 5.69\text{GHz}$, $f_2 = 7.41\text{GHz}$ 。图 4(b)中, 介质厚度较大(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。当介质厚度较小(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与文献[4]还是很符合的。

5 结论

根据自由 FSS 中单元的尺寸和形状, 可以预估其谐振频率。环形单元的谐振频率由其平均周长决定。介质加载能提高 FSS 平板对入射角度的稳定性, 尤其是介质厚板。介质愈厚, FSS 平板的带宽对入射角的敏感性就愈低。在自由 FSS 的一侧加载不同厚度的介质时, 当厚度由小变大时, 开始时, 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。单侧加载介质时的谐振频率较对称加载同样厚度的介质时的低。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 。

参考文献:

[1] 陈国瑞, 曹建章, 等. 频率选择表面实验研究[A]. 1999 全国微

波毫米波会议论文集[C]. 北京: 中国电子学会出版, 1999 358 - 360.

- [2] 侯新宇, 王伟, 等. 带有多层介质衬底 FSS 的损耗和带宽特性分析[J]. 微波学报, 1999, 15(4): 366- 370.
- [3] 冯林, 阮颖铮. 介质层中频率选择表面特性分析[J]. 航空学报, 1994, 15(9): 1122- 1125.
- [4] Munk Ben A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley, 2000. 11- 12, 393- 395.
- [5] 王焕青, 吕明云, 武哲. 介质加载对频率选择表面传输特性影响的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(1): 27- 30.
- [6] 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.
- [7] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 67- 79.

作者简介:



王焕青 女, 1973 年 3 月出生于山东省莘县, 2002 年 7 月就读于北京航空航天大学航空科学与工程学院, 博士研究生, 主要研究方向为飞机雷达隐身设计, 电磁场数值计算及双曲 FSS 雷达罩性能分析与设计等. E-mail: hqjng_w@163.com



吕明云 男, 1969 年 7 月出生于湖北省公安县, 北京航空航天大学讲师, 博士, 主要从事频率选择表面及飞行器隐身方面的研究. E-mail: lvmingyun@sina.com