

# 对称双层 FSS 的传输特性分析<sup>1</sup>

侯新宇 万伟 佟明安 万国宾

(西北工业大学电子工程系 西安 710072)

**摘要** 应用模匹配方法,研究了关于中心层面对称的双层频率选择表面(FSS)的传输特性。讨论了各介质层厚度改变对频率选择表面频响特性的影响,指出通过修正双层 FSS 的有关介质参数,可以有效地改善传输带宽的稳定性并缩小传输曲线谐振区的深沟。

**关键词** 双层 FSS, 对称激励, 反对称激励

**中图分类号** TN015

## 1 引言

频率选择表面(FSS)在微波系统中有着广泛的应用,例如可以用作极化器,滤波器,双频段天线的副反射面,以及雷达罩的雷达散射截面控制等<sup>[1]</sup>。

目前对于包括一层贴片或缝隙周期阵列和若干层均匀介质基板的 FSS 已经得到了比较深入的研究<sup>[2-5]</sup>。而通常对具有宽频带和陡截止频率特性的多层 FSS 的分析一般采用两种不同的方法:一种是首先求出每一层阵列包括与其直接相邻的介质层结构的广义传输矩阵(GTM)或其它多模矩阵,然后通过矩阵运算得到整个结构的 GTM<sup>[6]</sup>。另一种是把 FSS 结构当作一个整体,建立一系列互耦的积分方程<sup>[7]</sup>。这两种方法都有一定的局限性,前者当阵列单元排列得很紧密时,会对计算构成约束。后者由于需要对大矩阵求逆,一方面占用大量计算机内存,同时也消耗了计算时间。

因为在 FSS 应用中经常遇到两层周期阵列关于结构中心层面对称放置的对称结构,本文引入一种对称激励和反对称激励的分析方法求解此类结构的传输系数,相比上述两种求解方法更加简便、快捷,有利于减轻结构设计中的计算量。经过选择并优化设计双层结构中的介质参数,可以在设计带宽内实现颇为理想的传输特性。

## 2 理论分析

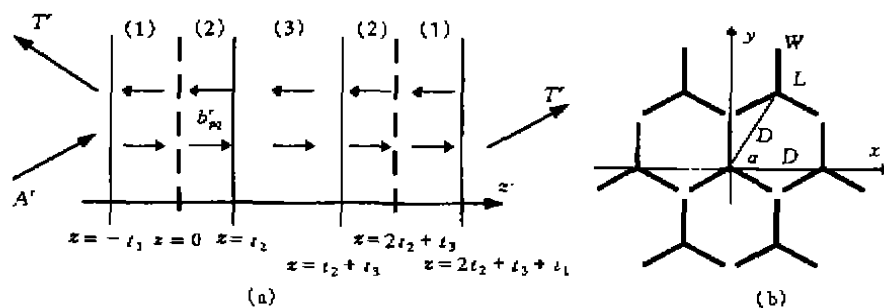


图 1 FSS 结构示意图 (a) 介质加载的对称结构

(b) Y 形缝隙周期阵列  $L=5.5\text{mm}$ ,  $W=0.5\text{mm}$ ,  $D=11.5\text{mm}$ ,  $\alpha=60^\circ$

<sup>1</sup> 1997-11-26 收到, 1998-06-05 定稿

图 1(a) 所示为将两个单层的 FSS 通过介质层连接所得到的关于  $z = t_2 + 0.5t_3$  平面对称的双层 FSS, 其中  $t_1, t_2$  分别为单层 FSS 覆盖层和衬底的厚度, 其介质参数分别为  $\epsilon_1, \mu_1$  和  $\epsilon_2, \mu_2$ ,  $t_3$  为中间连接层的厚度, 介质参数为  $\epsilon_3, \mu_3$ , 无限薄的 Y 形缝隙阵列结构如图 1(b) 所示。

研究一平面波沿  $+z$  方向入射到双层 FSS 上, 首先将介质层  $-t_1 < z < 0$  和  $0 < z < t_2$  中的电场和磁场的横向分量分别用相应区域中的 Floquet 模的叠加表示, 然后在  $z = 0$  平面上应用场的连续性条件, 利用 Floquet 模的正交性, 容易得到关于  $z = 0$  表面上未知缝隙电场的积分方程:

$$\begin{aligned} & \sum_{r=1}^2 \left[ \frac{1 + DF^r}{1 - DF^r} \cdot \frac{1}{\eta_{00}^{r(1)}} + \frac{1}{Z_{00}^{r(2)}} \right] \Phi_{00}^r \cdot \int_b E_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \hat{z} ds \\ & + \sum_{r=1}^2 \sum_p \sum_q \left[ \frac{1}{Z_{pq}^{r(1)}} + \frac{1}{Z_{pq}^{r(2)}} \right] \Phi_{pq}^r \cdot \int_b E_b \times \Phi_{pq}^{r*} \cdot \hat{z} ds \\ & = \sum_{r=1}^2 a_{00}^{rd} \frac{2}{1 - DF^r} \frac{1}{\eta_{00}^{r(1)}} \Phi_{00}^r, \end{aligned} \quad (1)$$

式中符号含义参考文献 [2] 中的说明。

由于两层周期阵列之间的互耦, (1) 式中的  $Z_{pq}^{r(2)}$  实际上是一个散射矩阵, 其矩阵元素  $[Z_{pq}^{r(2)}]_{ij}$  表示单位幅度的  $i$  阶模入射到第二层阵列表面上后所激励的  $j$  阶反射模的幅度。根据结构的对称性, 采用对称激励和反对称激励方法, 可将此散射矩阵转化为对角矩阵。然后将对称激励和反对称激励场相加便得到系统的反射系数, 相减便得到系统的传输系数。

应用 Galerkin 方法求解 (1) 式, 将缝隙孔径上的标量电场用基函数近似展开:

$$E_b = \sum_{j=1}^N C_j e_{bj}, \quad (2)$$

便可将积分方程转化为矩阵方程求解。Y 形缝隙单元臂上的标量基函数选为

$$e_{bj}(l) = \sqrt{2/(WL)} \cos[j\pi l/(2L)], \quad j = 1, 2, \dots \quad (3)$$

因为在对称中心  $z = t_2 + 0.5t_3$ , 对称激励时等效模阻抗  $Z_c$  等效为开路 ( $Z_c = \infty$ ); 反对称激励时, 等效为短路 ( $Z_c = 0$ )。根据等效传输线理论, 可以分别求出两种激励时  $z = 0^+$  表面的等效阻抗  $Z_{pq}^{r(2)}$ , 然后分别求解方程 (1) 式得到对称激励和反对称激励的孔径电场展开系数  $C_j^s$  和  $C_j^a$ ,  $z = 0^+$  表面上电场和磁场展开的主模系数便可表示为

$$b_{00}^r = \sum_{j=1}^N \left[ \frac{C_j^s - C_j^a}{2} \right] \int_b e_{bj} \times \Phi_{pq}^r \cdot \hat{z} ds. \quad (4)$$

从而双层 FSS 的传输系数

$$T^r = -b_{00}^r \exp(+j\gamma_{00}(2t_2 + t_3)) \cdot \exp[-j(\gamma_{00}^{(1)} - \gamma_{00})t_1] \cdot \frac{1 + j \tan(\gamma_{00}^{(1)} t_1)}{1 + j(\eta_{00}^{r(1)}/\eta_{00}^r) \tan(\gamma_{00}^{(1)} t_1)} \quad (5)$$

### 3 数值结果和讨论

首先分析两个相互平行放置的 FSS 屏的平面波传输响应(图 2), 计算之前检验了算法的收敛性, Floquet 模数目取为 242, 电场基函数取为 6 个时, 便能得到收敛的结果. 从图 2 中可看出,  $60^\circ$  TE 入射时传输曲线的谐振区内出现一个深的凹沟, 并且传输带宽对不同的入射角也改变很大. 如果两屏 FSS 间的距离增大一倍, 沟深显著减小(图 3). 这说明凹沟的出现主要是由于两屏 FSS 之间的近场耦合而非介质衬底的影响. 虽然增大两屏的距离可以减小凹沟的深度, 但是在实际应用中, 人们并不希望此间距远大于 0.5 倍的谐振波长, 而是使其电尺度  $(2\gamma_{00}^{(2)} t_2 + \gamma_{00}^{(3)} t_3)$  尽量保持近似于  $\pi/2$ , 因为间距过大不但容易出现带内谐振而造成带内传输损耗的增大, 而且也会使结构的电厚度随入射角的改变变化很快.

如果阵列参数不变而改变双层 FSS 中的介质参数, 可以很大程度地改善 FSS 传输响应. 如取  $t_1=8.5\text{mm}$ ,  $\epsilon_{r1}=1.5$ ,  $t_2=0$ ,  $t_3=7.0\text{mm}$ ,  $\epsilon_{r3}=1.9$ , 如图 4 的结果显示, 谐振频率已经非常稳定, 传输带宽随入射角变化也基本保持不变, 并且传输曲线的深沟得到了抑制.

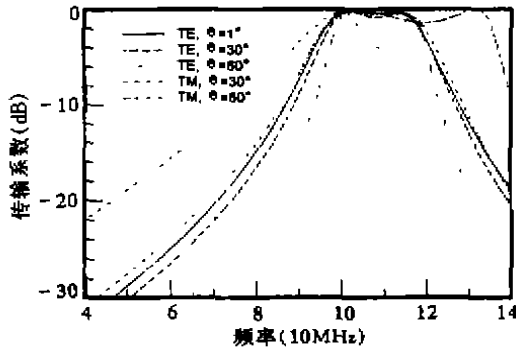


图 2 双层 FSS 的平面波传输响应

$\epsilon_{r1}=2.56$ ,  $t_1=0.8\text{mm}$ ,  $\epsilon_{r3}=1.0$ ,  $t_3=4.4\text{mm}$ ,  $t_2=0$

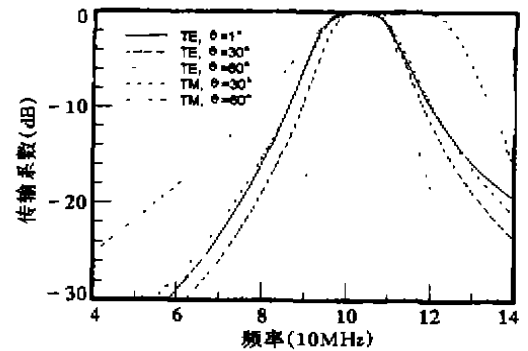


图 3 双层 FSS 的平面波传输响应

$\epsilon_{r1}=2.56$ ,  $t_1=0.8\text{mm}$ ,  $\epsilon_{r3}=1.0$ ,  $t_3=8.5\text{mm}$ ,  $t_2=0$

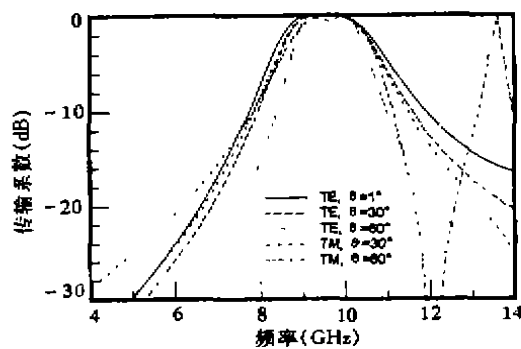


图 4 双层 FSS 的平面波传输响应

$\epsilon_{r1}=1.5$ ,  $t_1=8.5\text{mm}$ ,  $\epsilon_{r3}=1.9$ ,  $t_3=7.0\text{mm}$ ,  $t_2=0$

#### 4 结 论

本文应用模匹配法技术,采用对称激励和反对称激励方法,给出了关于中心层面对称的双层 FSS 结构传输特性的简单、方便的分析方法。在所建分析方法的基础上,研究了介质材料参数对 FSS 传输特性的影响,发现只要结构中的介质层的参数设计适当,便能得到理想的传输响应。

#### 参 考 文 献

- [1] Mittra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—A review. *Proc. IEEE*, 1988,76(12): 1593–1615.
- [2] Luebbers R J, Munk B A. Some effects of dielectric loading one periodic slot arrays. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1978, AP-26(4): 536–542.
- [3] Chan C H, Mittra R. On the analysis of frequency selective surfaces using subdomain basis functions. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.* 1990, AP-38(1): 40–50.
- [4] Parker E A, Vardaxoglou J C. Influence of single and multiple-layer dielectric substrates on the band spacing available from a concentric ring frequency selective surface. *International Journal of Electronics*, 1986, 61(3): 291–297.
- [5] Huang J, Wu T K, Lee S W. Tri-band frequency selective surfaces with circular ring elements. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.* 1994, AP-42(2): 166–175.
- [6] Hall R C, Mittra R, Mitzner K M. Analysis of multilayered periodic structure using generalized scattering matrix theory. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1988, AP-36(4): 511–517.
- [7] Pous R, Pozar D M. A frequency selective surfaces using aperture-coupled microstrip patches. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.* 1991, AP-39(12): 1763–1769.

### ANALYSIS OF TRANSMISSION PROPERTIES OF A SYMMETRIC DOUBLE-LAYER FSS

Hou Xinyu    Wan Wei    Tong Mingan    Wan Guobin

(*Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*)

**Abstract** A symmetric double-layer frequency selective surface is studied by adopting the symmetric and anti-symmetric excitation method. Transmission properties of the structure are discussed for different dielectric parameters of the structure. It is shown that the frequency response of the structure can be great by improved by choosing suitable dielectric parameters of the covering and coating layers.

**Key words** Double-layer FSS, Symmetric and anti-symmetric excitation

侯新宇: 男, 1969 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向为复杂目标电磁散射的数值分析和频率选择表面。

万 伟: 男, 1936 年生, 教授, 长期从事微波技术、电磁理论、电磁散射和波与材料相互作用等方面的研究。

佟明安: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 从事航空火力控制和指挥系统等方面研究。

万国宾: 男, 1967 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向为复杂目标电磁散射的数值分析和频率选择表面。