

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 装配误差衰减双屏“十”字环 FSS 传输特性研究

何 斌<sup>1</sup>, 丛玉良<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 吉林大学, 吉林 长春 130025)

**摘要:**用 Galerkin 矩量法计算电场积分方程的方法, 数值计算、分析了装配误差引起双屏 FSS 频率响应衰减变化特性。由实际经验建立了双屏 FSS(频率选择表面)装配误差物理和结构模型, 并提出了具体数值分析计算方法。基于数值分析结果表明, 装配误差为单元周期长度 10% 时, 频率响应幅值衰减最大; 当装配偏移方向与入射波极化方向一致时, 产生相位插入延时并且相位与频率关系曲线发生变形; 当装配偏移方向与入射波极化方向正交时, 出现较大相位延迟。

**关键词:**双屏十字环; 频率选择表面; 单元装配误差; 相位失真

**中图分类号:** TN957.8; TN713 **文献标识码:** A

## Effect of fabrication error on FSS transmission performance attenuation of double screen cross loop slot

HE Bin<sup>1</sup>, CONG Yu-liang<sup>2</sup>

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China; Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** With the Galerkin moment method used to electric field integral equation, the frequency response attenuation performance produced by the fabrication error of two-layer Frequency Selective Surface(FSS) in the double screen frequency selective filter was analyzed. Based on the practical experience, the fabrication error analysis and construction models were built up. Moreover the practical numerical algorithm was proposed. According to the results of the numerical analysis, it is found that the amplitude attenuation of the double FSS frequency response is up to maximum value when the fabrication error is equal to a tenth unit cell periodic size. Further there is the phase delay and distortion when the fabrication excursion is parallel to the incident wave polarized direction. And there is much more phase delay, when the fabrication excursion is perpendicular to the incident wave polarized direction.

**Key words:** double screens cross loop slot; Frequency Selective Surface (FSS); unit cell fabrication error; phase distortion

# 1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种周期结构,已经广泛应用于通信系统和雷达系统,因此,近几十年来 FSS 的理论研究和实际应用取得了极大的发展,在数值分析方法和制作工艺方面都发表了许多研究报告、专著和专利<sup>[1-3]</sup>。为了得到更高品质频率特性的 FSS,即稳定的中心频率和陡峭的边缘特性,双屏或多屏 FSS 结构的设计分析成果已经发表<sup>[4-6]</sup>,然而在实际工程应用中,工艺尺寸误差的客观存在,多层 FSS 结构工艺误差对 FSS 频率特性影响的研究,已经引起许多工程研究人员的关注。在多屏 FSS 结构中,介质匹配厚度变化,对 FSS 能量传输的衰减自然成为重点研究对象,但是在多屏 FSS 实际设计制作过程中发现,多屏 FSS 结构中,各层 FSS 之间的图形单元装配尺寸变化对于传输特性有直接影响,然而关于双屏 FSS 结构图形单元装配误差对周期结构传输特性衰减方面的研究比较少见。本文基于 Floquet 定理,利用 Galerkin 距量法,研究双屏周期结构层间图形单元装配误差的物理模型,Galerkin 距量法数值分析 FSS 表面电流密度的方法,并且以“十”字环图形单元 FSS 为例,详细讨论双屏 FSS 图形单元装配误差对双屏周期结构传输特性的影响,并给出传输衰减规律的物理解释,为双屏 FSS 周期结构设计提供工艺制作偏差评价依据。

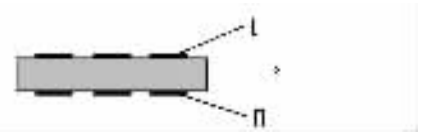
## 2 装配误差分析模型

### 2.1 物理模型

双屏 FSS 几何结构如图 1 所示,其中图 1(a)表示横截面结构,它主要由第一屏 FSS(I),介质( $\epsilon$ )和第二屏 FSS(II)等三部分组成。由于介质厚度图形单元一致性等诸多因素变化引起双屏 FSS 的传输特性变化已经在许多文献中进行了研究和报道<sup>[9-10]</sup>,为了重点研究单元装配误差引起传输特性的衰减变化,这里假设双屏 FSS 结构的介质厚度,图形单元几何尺寸以及周期尺寸完全满足设计尺寸,对传输特性衰减变化影响忽略不计。

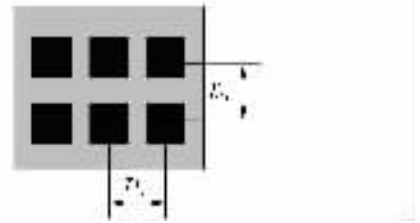
在双屏 FSS 周期结构的数值分析中,双屏

FSS 由两个周期尺寸、单元图形完全一样的单屏 FSS 装配组成,并且介质厚度尺寸满足等效 $1/4\lambda$ 双屏 FSS 耦合条件。定义第一屏 FSS(I)分布排列是装配第二屏 FSS(II)周期尺寸基准,因此装配误差就是第二屏 FSS 图形单元相对于第一屏 FSS 的图形准直偏差。



(a)横截面

(a)Cross section



(b)FSS 布局

(b)FSS layout

图 1 双屏 FSS 结构

Fig. 1 Double screens FSS Construction

### 2.2 装配误差模型

理想情况下,双屏 FSS 理论设计参量中第一屏与第二屏 FSS 单元图形几何中心是无偏差的;然而实际设计制作中,装配公差不可避免。根据实验过程中装配误差的实际情况,以“十”字环为例,说明十字环缝隙单元装配误差数值分析模型如图 2 所示,图 2(a)表示第一屏“十”字环周期单元,图 2(b)表示第二屏“十”字环单元,相对于第一屏可能出现的  $X, Y$  两轴向装配误差,定义为:以第一屏单元中心点  $O$  为基准点,坐标为  $(0, 0)$ ,如果第二屏对应单元中心点  $O'$  坐标为  $(X, Y)$ ,距离  $E_0 = X^2 + Y^2$ ,那么定义  $E_0$  为装配误差。

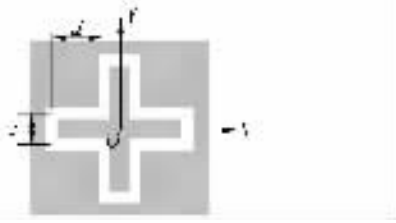
### 2.3 数值分析算法

单屏 FSS 表面电流密度由电场积分方程(EFIE)表示为:

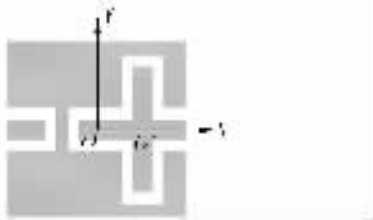
$$\text{在空域中: } E_i = GJ$$

$$\text{在谱域中: } \tilde{E}_i = \tilde{G}\tilde{J}_i, \quad (1)$$

其中  $G$  表示并矢格林函数,  $J$  表示面电流密度,  $E_i$  为入射电场。将电场分解为  $E_{xi}, E_{yi}$ , 并且将电流密度用一组屋顶基函数  $B_x, B_y$  展开,在谱域



(a) 第一层 FSS 单元  
(a) first layer FSS cell



(b) 第二层 FSS 各种装配误差几何分布  
(b) Various aligning error geometry distributions on second layer

图 2 FSS 单元装配模型

Fig.2 FSS unit cells aligning model

中 EFIE 的表示式为矩阵数值形式,

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_{xi} \\ \tilde{E}_{yi} \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} \tilde{G}_{xx} \tilde{B}_x & \tilde{G}_{xy} \tilde{B}_y \\ \tilde{G}_{yx} \tilde{B}_x & \tilde{G}_{yy} \tilde{B}_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)可以写成线性方程,应用 Galerkin 法,在平面入射波激励下,分析计算感应电流以及散射场。可以得到 FSS 的反射和透射传输特性变化曲线<sup>[8-9]</sup>。

对于具有装配误差的双屏 FSS,数值分析计算可以采用改变柱状波束激励入射波,改变有限照度函数的定义范围,实现第一屏与第二屏装配误差模型的数值分析计算。以“十”字环单元为例如图 2,先计算图 2(a)的第一屏散射场,然后将激励入射场辐照在同样面积表面的图 2(b)单元上,获得第二屏散射场,将第一屏、第二屏散射场以及介质散射场进行合成计算,可以获得双屏 FSS 在装配误差模型情况下的传输衰减变化特性。

### 3 装配误差双屏 FSS 频率特性数值分析

#### 3.1 设计结构模型

单屏“十”字环单元 FSS 周期结构模型中,

“十”字环缝隙宽度  $W=0.762$  mm,分布周期  $D=D_x=D_y=7.569$  mm,“十”字环  $d=2.590$  mm, $c=1.625$  mm,介质屏为等厚  $S_0=4.572$  mm,介电常数  $\epsilon=1.2$ ,损耗角正切  $\tan\delta=0.005$ 。单屏和双屏“十”字环 FSS 数值分析结果图 3,图 3 中用 TE 和 TM 分别表示垂直和水平极化平面垂直入射波。数值分析结果表明,“十”字环单元对极化方向不敏感,双屏 FSS 结构比单屏 FSS 结构具有更好的边缘频率特性。

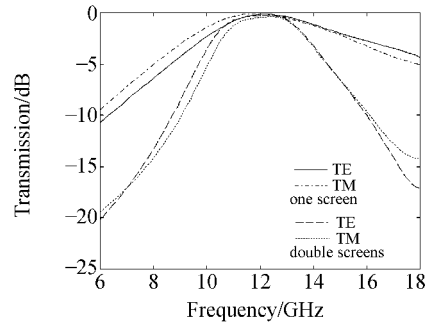


图 3 “十”字环 FSS 单屏双屏传输特性比较

Fig.3 Comparison between one screen and double screens in FSS performance of the cross loop slot

#### 3.2 传输幅值衰减

如图 2 可知,“十”字环单元具有轴对称和中心对称几何特性,平面周期结构中 X,Y 轴向偏差传输特性变化一致,因此只要分析一个方向的装配误差变化,另外方向变化相同。表 1 是在 Y 轴极化方向的双屏 FSS 装配误差模型数值分析结果,此时定义  $X=0, E_0=Y$ 。从表 1 结果可知,如果单元装配偏差值与缝隙宽度相当,重叠 FSS 周期单元产生结构周期单元变形,那么将产生插入衰减和谐振频率漂移,因此引起传输特性发生变化。相反,偏差为半个单元排列周期时,传输特性变化不明显。

表 1 单元装配偏差引起传输特性变化

Tab.1 Transmission performance change with cell aligning error

$E_0/D$ (%)	-0.5 dB(GHz)		$f_0$ (GHz)		Transmission loss (dB)	
	TM	TE	TM	TE	TM	TE
0	1.8	1.8	12.4	12.3	0.1	0.12
10	1.8	1.8	12.6	12.7	0.5	0.8
20	1.9	2	12.3	12.1	0.2	0.23
50	1.8	2	12.3	12.4	0.21	0.22

### 3.3 传输相位失真变化

装配误差引起相位失真变化如图 4、图 5 给出的数值分析结果。从图中特性曲线分析可知,当“十”字环形双屏 FSS 第一屏与第二屏单元图形装配偏差恰好平行于 Y 轴方向时,(1)入射波为 TE 极化,根据图 4 对四种情况的比较,在图形单元中心装配偏差为 10% 条件下,引起相位特性变化幅度最大,而且改变了相位的变化规律。(2)入射波为 TM 极化,由图 5 可知,这时装配误差引起相位延迟,并不改变相位在中心频率附近相

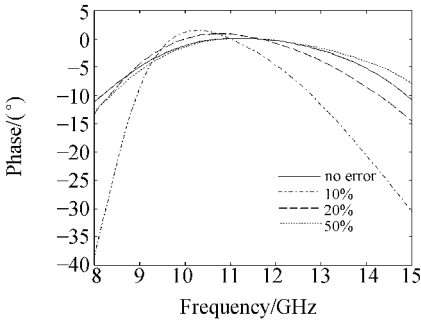


图 4 TE 相位与频率变化曲线

Fig. 4 Phase vs frequency of TE mode

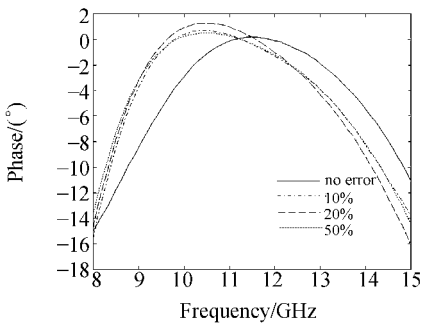


图 5 TM 相位与频率变化曲线

Fig. 5 Phase vs frequency of TM mode

位的周期规律,只是相位平移一个固定量。由于“十”字环形图形的几何特性,当装配沿 X 轴方向偏差时,其结果正好与上述结果相反。

综合数值分析得到的结果,可以得到装配误差引起“十”字环形双屏 FSS 相位变化特性。如果两层单元图形中心偏移方向与入射波极化方向一致时,相位不仅有延时而且有可能发生相位特性失真现象;反之,如果与极化方向正交,那末,将发生相位固定相位平移延迟。

## 4 结 论

本文对装配误差引起的双屏 FSS 频率特性衰减问题进行了讨论,根据实际经验建立了装配误差双屏 FSS 结构模型和数值分析模型。在谱域 Galerkin 矩量法的基础上,提出改进的数值分析方法,并且对“十”字环形单元双屏 FSS 进行了系统的分析和计算,综合分析计算结果,得出如下结论:

(1)当装配偏差在 10% 单元周期长度附近时,引起双屏 FSS 频率响应幅值较大衰减;

(2)当装配偏移方向与入射波极化方向一致时,将产生相位插入延时,偏差为 10% 单元周期长度时,相位变化曲线严重失真;

(3)当装配偏差方向与入射波极化方向正交时,产生较大相位平移。

## 5 致 谢

本文工作得到了长春光机所孙连春研究员给予的多方面支持,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] MUNK B A. *Frequency selective surface: theory and design*[M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surface-A review[J]. *IEEE*, 1988, 76(12), 1593-1615.
- [3] GERINI G, ZAPPELI L. Multilayer array antennas with integrated frequency selective surfaces conformal to a circular cylindrical surface[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2005, 53(6): 2020-2030.
- [4] MA J F, MITTRA R, HANG N T. Analysis of multiple FSS screens of unequal periodicity using an efficient cascading technique[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, 2005, 53(4): 1401-1414.
- [5] 马金平, 陈国瑞, 李春晖. “十”字环形缝隙阵频率选择表面的频率特性研究[J]. *电子学报*, 1997, 25(4): 125-127.  
MA J P, CHEN G R, LI CH H. Performance of cross-loop slot array as frequency selective surfaces[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1997, 25(4): 125-127. (in Chinese)

- [6] 杨利,徐善驾. 介质材料周期结构频率选择特性的多模网络分析[J]. 电子学报,1999,27(3):63-66.  
YANG L,XU SH J. Multimode network analysis for the frequency selective characteristics of dielectric periodic structure[J]. *Acta Electronica Sinica*,1999,27(3):63-66. (in Chinese)
- [7] HE B,SUN L CH. Effects of fabricated error on transmission performance of double layer frequency selective surface configuration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(5) 599-603.
- [8] 侯新宇,万伟. 对称双层 FSS 的传输特性分析[J]. 电子科学学刊,1999,21(4):569-572.  
HOU X Y,WAN W. Analysis of transmission properties of a symmetric double-layer FSS[J]. *Journal of Electronics*, 1999,21(4):569-572. (in Chinese)
- [9] HARMS P,MITTRA R,KO W. Implementation of the periodic boundary condition in the finite-difference time-domain algorithm for FSS structures[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*,1994,42(9):1317-1324.
- [10] ERTURK V B,ROJAS R G. Analysis of finite arrays of axially directed printed dipole on electrically large circular cylinders[J]. *IEEE Trans on Antenna and Propagation*,2004,52(10):2586-2595.

作者简介:何 斌(1961—),男,副研究员,工学博士,研究方向为光学工程,数字信号处理和隐身滤波复合材料。