

文章编号:1001-9014(2007)02-0146-03

## 具有双频段的十字形复合单元频率选择表面

李小秋<sup>1,2</sup>, 卢俊<sup>3</sup>, 贾宏燕<sup>1,2</sup>, 高劲松<sup>1</sup>, 冯晓国<sup>1</sup>, 孙连春<sup>1</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. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**基于模式匹配分析技术,对由2种尺寸不同的十字形单元组合成的十字形复合单元频率选择表面进行了理论分析;利用十字形孔径单元的电场基函数得出十字形复合孔径单元的电场基函数,计算结果表明,这种复合单元频率选择表面具有两个频段,在微波、红外乃至可见光波段上将广泛的应用。

**关键词:**频率选择表面;双频段;基函数

**中图分类号:**TN957 **文献标识码:**A

## FREQUENCY SELECTIVE SURFACES OF MULTIPLE CROSSED DIPOLES ELEMENT WITH DUAL-BAND

LI Xiao-Qiu<sup>1,2</sup>, LU Jun<sup>3</sup>, JIA Hong-Yan<sup>1,2</sup>,

GAO Jin-Song<sup>1</sup>, FENG Xiao-Guo<sup>1</sup>, SUN Lian-Chun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. College of Applied Sciences, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on the modal matching method, frequency selective surfaces of multiple crossed dipoles element was analyzed. The electric field based function for multiple crossed dipoles aperture element was presented by taking the electric field based function of crossed dipoles aperture element. The frequency selective surfaces of multiple crossed dipoles element has dual-band, which will be widely applied in microwave, infrared and optics.

**Key words:** frequency selective surfaces; dual-band; basis function

### 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces简称FSS)是由周期性排列的金属贴片单元(带阻型),或由金属屏上周期性的开孔单元(带通型)构成的一种二维周期阵列结构<sup>[1]</sup>. FSS能够较好的控制电磁波的传输和散射,能使入射电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射<sup>[2]</sup>. FSS已经广泛的应用于微波、红外直至可见光波段,特别是在实现飞行兵器雷达舱的隐身方面,是目前的最佳选择<sup>[3,4]</sup>.

FSS的中心频率主要由单元的 shape 和尺寸决

定. 将2种尺寸不同的十字形单元组合成一个新的十字形复合单元,由这种新的复合单元构成的FSS将具有2个不同的频段,这在微波、红外乃至可见光波段上都将有广泛的应用.

### 1 理论分析

图1所示是一侧有介质加载的开孔单元FSS结构剖面图. 将自由空间场和介质区域场以Floquet模式展开,将周期表面的电场以一组系数待定的正交完备模式展开,然后两者在周期表面上利用电场和磁场横向分量的连续条件,就得到了关于一侧有介质加载的周期表面未知电场的积分方程<sup>[5]</sup>:

收稿日期:2006-06-21,修回日期:2006-09-24

基金项目:国家自然科学基金(60478035)资助项目

作者简介:李小秋(1980-),男,湖南隆回人,博士生,主要从事频率选择表面的设计,周期性结构单元图形的研究等.

Received date: 2006-06-21, revised date: 2006-09-24

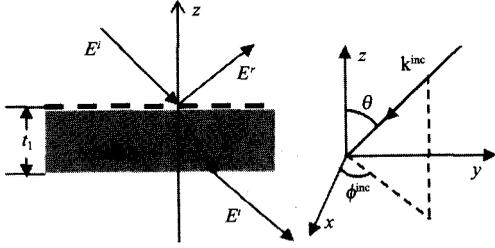


图1 一侧有介质加载的FSS结构剖面图  
Fig. 1 The structure of FSS with dielectric support in side

$$\begin{aligned}
 & \sum_{r=1}^2 \left( 1 + \frac{1 + DF^r}{1 - DF^r} \right) a_1^r \frac{\vec{\Phi}_{00}^r}{\eta_{00}^{r(1)}} \\
 &= \sum_{r=1}^2 \left( \frac{1 + DF^r}{(1 - DF^r) \eta_{00}^{r(1)}} + \frac{1}{Z_{00}^{r(1)}} \right) \vec{\Phi}_{00}^r \times \int_{\text{aperture}} \vec{E}_b \\
 & \times \vec{\Phi}_{00}^{r*} \cdot \vec{Z} ds + \sum_{r=1}^2 \sum_{i=2}^{\infty} \left( \frac{1}{Z_{pq}^{r(1)}} + \frac{1}{Z_{pq}^{r(1)}} \right) \vec{\Phi}_{pq}^r \\
 & \times \int_{\text{aperture}} \vec{E}_b \times \vec{\Phi}_{pq}^{r*} \cdot \vec{Z} ds \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中

$$a_1^r = 2A^r \frac{\eta_{00}^{r(1)}}{\eta_{00}^{r(1)}} \exp(-j(r_{00}^{(1)} - r_{00})t_1) \quad ,$$

$$DF^r = \frac{\eta_{00}^{r(1)} - \eta_{00}^r}{\eta_{00}^{r(1)} + \eta_{00}^r} \exp(-2j_{00}^{(1)}t_1) \quad .$$

$p=q=0$  时  $i=1$ , 此时其对应的 Floquet 模代表平面波,  $i \geq 1$  对应  $p, q$  不同时为零的其他 Floquet 模.  $r=1, 2$  分别对应 TE 和 TM 极化.  $A^r$  为已知入射平面波的模系数,  $\eta_{00}^{r(1)}, \eta_{00}^r$ , 分别表示介质和自由空间的模阻抗,  $r_{00}^{(1)}, r_{00}$  分别表示介质和自由空间  $z$  方向的传播常数,  $Z_{pq}^{r(1)}$  表示任意  $i$  阶 Floquet 模的等效模阻抗, 并且  $Z_{pq}^{r(1)} = \eta_{pq}^{r(1)} \frac{\eta_{pq}^r + j\eta_{pq}^{r(1)} + j\eta_{pq}^{r(1)} \tan(r_{pq}^{(1)}t_1)}{\eta_{pq}^{r(1)} + j\eta_{pq}^r \tan(r_{pq}^{(1)}t_1)}$ ,  $\vec{\Phi}_{pq}^r = \hat{z} \times \vec{e}_i^{r(1)}$  是一组完备正交的 Floquet 模式, 周期表面中每一单元孔径上的电场  $\vec{E}_b$  为未知量, 用矩量法求解方程(1).

首先应适当选择这种十字形复合孔径单元 FSS 孔径上未知电场  $\vec{E}_b$  的展开基函数. R. Mittra 在文献 [6] 中总结出了十字形孔径单元孔径上未知电场的展开基函数为

$$\begin{aligned}
 \vec{E}_{xq}^{a(n)} &= \vec{x} \left\{ C_{1q} \cos \left[ \frac{q\pi}{L} \left( x + \frac{L}{2} \right) \right] + \text{sgn}(x) B \cos \left( \frac{\pi}{L} x \right) \right\} \\
 & \cdot P_x(0, L) P_y(0, W) \quad , \\
 \vec{E}_{yq}^{a(n)} &= \vec{y} \left\{ C_{2q} \cos \left[ \frac{q\pi}{L} \left( y + \frac{L}{2} \right) \right] - \text{sgn}(y) B \cos \left( \frac{\pi}{L} y \right) \right\} \\
 & \cdot P_x(0, W) P_y(0, L) \quad ,
 \end{aligned}$$

其中  $q=0, 1, 2, \dots$ .

$$P_x(x_0, D) = \begin{cases} 1, & \left| x - x_0 \leq \frac{D}{2} \right| \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$P_y(y_0, D) = \begin{cases} 1, & \left| y - y_0 \leq \frac{D}{2} \right| \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

这种十字形复合孔径单元是由 5 个十字形孔径单元组成的, 将这 5 个十字形孔径单元孔径上未知电场的展开基函数进行矢量相加, 就得到了满足这种十字形复合孔径单元孔径边界条件的电场展开基函数:

$$\vec{E}_b = \sum_{n=1}^5 \sum_{r=1}^2 \sum_q F_{qr}^{(n)} (\vec{E}_{xqr}^{a(n)} + \vec{E}_{yqr}^{a(n)}) \quad , \quad (2)$$

其中上标  $n$  表示第  $n$  个十字形孔径单元,  $r=1, 2$  分别表示 TE 极化和 TM 极化, 将式(2)代入式(1)即可求出孔径上的未知电场  $\vec{E}_b$ , 进而可以求出透射系数

$$T_r = a_1^{rd} + \rho^r (1 - DF^r) \quad .$$

## 2 计算结果

图 2 所示是十字形复合开孔单元 FSS 单元尺寸的示意图, 其中  $L=14 \text{ mm}$ ,  $W=2 \text{ mm}$ ,  $L'=6 \text{ mm}$ ,  $W'=2 \text{ mm}$ ,  $D=7.778 \text{ mm}$ , 单元间距  $D_x = D_y = 22 \text{ mm}$ , 阵列按正方形栅格排列, 介电常数为 3, 厚度  $t_1=1.5 \text{ mm}$ , 入射平面波的  $\phi$  均为  $90^\circ$ . 图 3 和表 1 是不同入射角对十字形复合开孔单元 FSS 的频率响应特性. 从图 3 和表 1 可以看出, 十字形复合开孔单元 FSS 具有 2 个不同的通带, 这 2 个通带具有较好的角稳定性. 2 个通带的距离以及带宽可以通过改变大小十字形孔径单元尺寸的比值和相对位置来调节.

## 3 制作与测试

采用镀膜和光刻技术<sup>[7]</sup>, 在大小为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 、厚度为  $1.5 \text{ mm}$  的聚酯板(介电常数为 3.0, 损耗正切小于 0.01)上镀上加厚的铜膜(大约为  $200 \text{ nm}$ ), 采用光刻技术刻蚀出十字形复合开孔单元的 FSS 图形, 单元图形是沿  $x$  方向和  $y$  方向周期排列的, 在二方向上均有 13 个单元. 将制备好的实验件在微波暗室进行测试<sup>[8]</sup>, 测试系统主要包括矢量网络分析仪和 2 个双脊喇叭天线. 图 4 所示是十字形复合开孔单元 FSS 的测试曲线. 从测试曲线可以看出, 测试值与理论值基本一致.

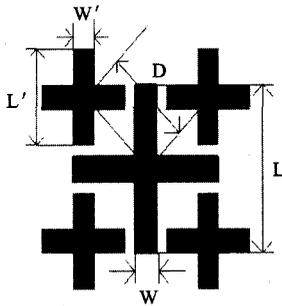


图2 十字形复合孔径单元的尺寸  
Fig.2 Dimension of multiple crossed dipoles aperture element

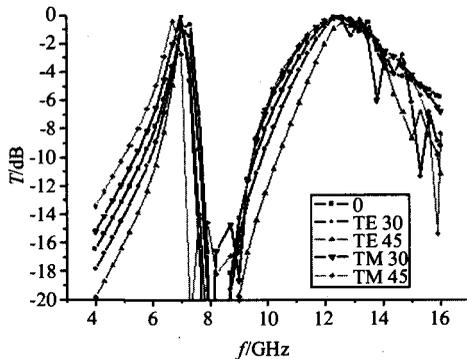


图3 不同入射角对十字形复合开孔单元 FSS 的频率响应特性曲线  
Fig.3 Various incident angles vs. frequency Response of multiple crossed dipoles aperture element FSS

表1 不同入射角对十字形复合开孔单元 FSS 的频率响应特性

Table 1 Various incident angles vs. frequency response of multiple crossed dipoles aperture element FSS

极化方式	入射角	第一个通带		第二个通带	
		$f_0$ (GHz)	-3dB 带宽 (GHz)	$f_0$ (GHz)	-3dB 带宽 (GHz)
TE	0°	7.0	0.7	12.5	2.9
	30°	7.0	0.6	12.6	2.4
	45°	7.0	0.5	12.6	2.1
TM	0°	7.0	0.8	12.4	3.6
	45°	6.8	0.9	12.3	3.8

### 4 结语

本文基于模式匹配分析技术,对十字形复合开孔单元 FSS 进行了理论分析并建立了积分方程,采用矩量法求解该积分方程.利用十字形孔径单元的电场基函数得出十字形复合孔径单元的电场基函数,求出孔径的未知电场,进一步求出透射系数.采用镀膜和光刻技术制备出了相应的实验件,并在微

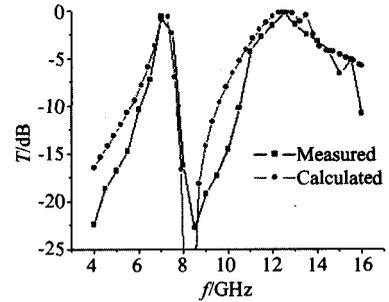


图4 十字形复合开孔单元 FSS 的测试曲线,TE 极化,0° 入射  
Fig.4 Measured transmission curve for FSS of multiple crossed dipoles aperture element, TE polarization, 0° incident

波暗室进行了测试,测试值与理论值基本一致.从这种十字形复合开孔单元 FSS 的频率响应特性曲线可以看出其具有 2 个相近的不同通带,这 2 个通带具有较好的角稳定性.二通带之间的距离以及带宽可以通过改变大小十字形孔径单元尺寸的比值和相对位置来调节,这在微波、红外乃至可见光波段都将有广泛的应用.

### REFERENCES

- [1] WU T K. *Frequency Selective Surface and Grid Array* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [2] MUNK B A. *Frequency Selective Surface: Theory and Design* [M]. New York: Wiley, 2000.
- [3] SUN Lian-Chun. Application of frequency selective surface technology in missile electronic warfare[J]. *Electromagnetic Countermeasure*(孙连春. 频率选择表面技术在导弹电子战中的应用. *电子对抗*), 2002,2(46):1-3.
- [4] LU Jun, ZHANG Jing, SUN Lian-Chun. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element[J]. *Optics and Precision Engineering*(卢俊,张靓,孙连春. Y 形和 Y 环形单元特性的试验对比研究. *光学精密工程*), 2005,13(2): 219-224.
- [5] Luebbers R J. Analysis of various periodic slot array geometries using modal matching[R]. AD-023257, 1975.
- [6] Mittra R, Chan C H, Cwik T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review[J]. *IEEE Proc*, 1988,76(12): 1593-1615.
- [7] ZHANG Li-Guo, CHEN Di. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Optics and Precision Engineering*(张立国,陈迪. SU-8 胶光刻工艺研究. *光学精密工程*), 2002,10(3): 266-269.
- [8] WANG Huan-Qing, LV Ming-Yun, WU Zhe. Experiment on the influence of dielectric loading on transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(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试验研究. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(1):27-30.