

文章编号 1004-924X(2007)06-0978-05

# 改变 Y 孔单元排列方式对 FSS 极化稳定性的影响

贾宏燕<sup>1,2</sup>, 冯晓国<sup>1</sup>, 高劲松<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 100049)

**摘要:**以 Y 孔为基本图形单元,通过改变传统的单元排列方式,设计了一种极化稳定的频率选择表面(FSS)。利用模式匹配法进行了理论分析,得出频率与传输系数曲线。采用镀膜和光刻技术分别制备了 Y 孔单元传统和改进排列方式的 FSS 实验样件,在微波暗室中,对不同极化方式的电磁波在 30°入射时进行测试,得到的实验曲线与理论仿真曲线基本一致。数值分析和实验结果均表明:当入射波的极化方式改变时,传统排列方式的 FSS 频率响应特性会发生明显改变,中心频率处的传输损耗增加 -1.09 dB;但改进排列方式的 FSS 仅增大 -0.25 dB。改进的 FSS 结构能在单一频率下产生谐振并具有很好的极化稳定性,为入射波源极化方式未知情况下的应用提供了设计思路。

**关键词:**频率选择表面(FSS);极化稳定性;频率响应

**中图分类号:** TN713; TP391 **文献标识码:** A

## Influence on polarization independence of frequency selective surface by altering Y slot element arrangement

JIA Hong-yan<sup>1,2</sup>, FENG Xiao-guo<sup>2</sup>, GAO Jin-song<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 100049, China*)

**Abstract:** A novel polarization-independent Frequency Selective Surface(FSS) is designed by altering traditional Y slot element arrangement. Based on the modal matching method, the frequency response of this structure is analyzed to obtain the plot of frequency versus transmission coefficient. With coating technology and lithography, the FSS samples of conventional and improved arrangement are made respectively. The tests under different polarized waves at 30° incidence angle are given in the microwave darkroom. The measured curve shows good agreement with the simulated curve. Both of the numerical analysis and experiment results show that the response of FSS with the conventional arrangement is changed very distinctly with the source polarization, the increase of transmission loss is -1.09 dB; but with the modified structure, the increase is only -0.25 dB. The improved Y element array can be resonant at a single frequency and has good polarization independency. It provides a new design method for that the polarization situation of a source is completely unpredictable.

**Key words:** FSS; polarization independence; frequency response

收稿日期:2006-10-16;修订日期:2007-01-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478035)

## 1 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元,或金属屏上周期性的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构<sup>[1]</sup>。FSS与电磁波相互作用表现出明显的带通或带阻的滤波特性<sup>[2]</sup>,因而广泛地应用于微波<sup>[3,4]</sup>、红外直至可见光波段<sup>[5]</sup>。

描述FSS频率响应特性的主要指标有中心频率、中心频率点的透过率、传输带宽等。这些特性主要取决于FSS谐振单元的形式,单元的排布方式以及周围介质的电性能<sup>[6-9]</sup>。影响这些特性的因素很多,其中入射波的极化方式是众多影响因素之一。在FSS的实际工程应用中,很多情况下入射波的极化方式是未知的,因此很有必要寻找一种极化稳定性好的FSS结构。

由Y孔单元构成的谐振表面对不同入射角度具有相对稳定的谐振频率,并且易于满足复杂曲面表面的准周期性要求,因此在雷达罩工程中得到普遍应用,与其相关的理论分析也得到了人们的关注<sup>[8]</sup>。但是在传统的Y孔单元FSS设计中,当入射波的极化方式改变时,FSS的中心频率、中心频率点的透过率、传输带宽等频率响应特性会发生明显的改变,这在实际应用中会极大降低FSS的性能。

为了实现Y孔单元FSS的极化稳定性,通过对Y形单元的传统排列方式进行改进,把相互间隔的单元顺时针或逆时针旋转 $90^\circ$ ,给出了一种极化稳定性好的Y孔单元FSS结构。利用模式匹配法进行了理论分析,并制作了实验样件,在微波暗室中进行测试。计算和测试结果均表明,这种新型排列的Y孔单元FSS对入射波的极化方式不敏感,会在TE、TM两种不同的极化方式下给出基本相同的频率选择特性。

## 2 传统Y孔单元FSS分析

### 2.1 传统的Y孔单元FSS结构

按照MUNK的基础模型,Y孔单元两个臂长之和接近于半波长时将发生谐振现象<sup>[2]</sup>。根据这个模型进行了Y孔单元的参数设计。具体参数标注如图1所示。

对于传统的Y孔单元FSS,周期单元的排列

有一个明显特点:每个Y孔径单元会有一个臂彼此互相平行,如图1中的 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $L_3$ 。单元的排布方式一般采用正三角形(图1中 $\theta$ 为 $60^\circ$ )或正方形(图1中 $\theta$ 为 $90^\circ$ )栅格。

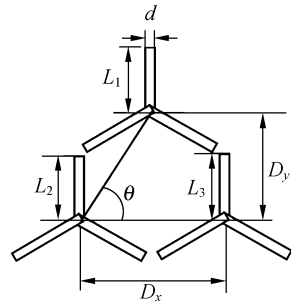


图1 Y单元阵列参数

Fig. 1 Parameters of Y element array

### 2.2 极化方式对传统Y孔单元FSS频响特性的影响

对于传统Y孔单元FSS的特性,已有较多的研究工作<sup>[10,11]</sup>。为了做进一步的分析和对比,本文以正方形栅格排布方式的传统Y孔单元FSS为例,在电磁波 $30^\circ$ 入射时,研究由TE入射波变为TM入射波时FSS频率响应的变化情况。图2给出了周期阵列图。

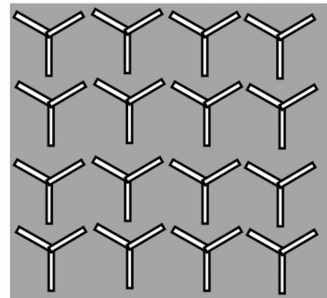


图2 正方形栅格排布的Y孔单元FSS

Fig. 2 Y slot element FSS of square arrangement

参数设置:阵列周期 $D_x = D_y = 14$  mm,臂宽 $d = 0.8$  mm,臂长 $L = 6.5$  mm,入射波的入射角均取 $30^\circ$ 。利用模式匹配法进行分析,在TE、TM两种不同极化方式下得出频率与传输系数曲线,如图3所示。

由计算结果可以明显看出,入射波由TE变为TM波时,虽然中心频率都稳定在11.4 GHz,

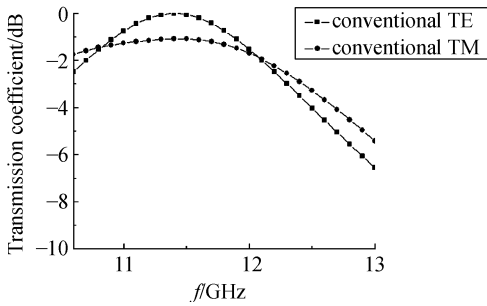


图 3 传统 Y 孔单元 FSS 对不同极化方式入射波的透波特性

Fig. 3 Transmission response of conventional Y slot element FSS for different polarization incidences

但是传输带宽和中心频率点的透过率发生了明显改变。-2 dB 带宽由 1.4 GHz 变宽为 1.6 GHz, 中心频率透过率由原来的 -0.003 dB 增加到 -1.09 dB。传统 Y 孔单元 FSS 的频率响应不具备对不同极化方式入射波的稳定性。

对于传统 Y 孔单元 FSS, 入射波的极化方式改变时, FSS 传输特性会发生如此大的变化, 在很多波源极化方式未知的情况下限制了 FSS 的应用。

### 3 新型 Y 孔单元 FSS 分析

#### 3.1 新型 Y 孔单元 FSS 结构

为了实现频率响应的极化稳定性, 对于 Y 孔单元 FSS, 在传统排列方式的基础上, 给出了一种新型的 Y 孔单元 FSS 结构, 如图 4 所示。

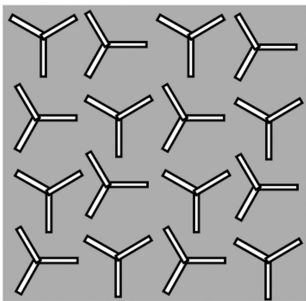


图 4 改进的正方形栅格 Y 孔单元 FSS

Fig. 4 Improved Y slot element FSS of square arrangement

为了与传统 FSS 的传输特性进行比较, 这里仍采用上述传统 FSS 的设计参数, 仅仅把相互间隔的单元沿同一方向旋转  $90^\circ$ 。在电磁波  $30^\circ$  入射时, 对这种改进的 FSS 结构, 研究入射电磁波由 TE 波变为 TM 波时 FSS 频率响应的变化情况。

#### 3.2 理论分析及仿真

对改进的周期结构, 应用模式匹配法进行分析。可以采用单屏 FSS 的分析方法, 把彼此相邻的四个单元看作一个周期。

应用模式匹配方法, 将周期阵列前后自由空间电磁场分别以 Floquet 谐波模式展开, 然后在周期阵列表面上应用横向场连续条件, 便可以得到关于周期单元上未知电场的积分方程。

孔径电场的积分方程为

$$\sum_{r=1}^2 \frac{2A^r \Phi_{00}^r}{\eta_{00}} = \sum_{r=1}^2 \left[ \frac{1}{\eta_{00}} + \frac{1}{Z_{00}^r} \right] \Phi_{00}^r \cdot \int_a \dot{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \dot{Z} ds + \sum_{r=1}^2 \sum_{i=2}^{\infty} \left( \frac{1}{\eta_{pq}^r} + \frac{1}{Z_{pq}^r} \right) \Phi_{pq}^r \int_a \dot{E}_b \times \Phi_{pq}^{r*} \cdot \dot{Z} ds,$$

$$\text{透射系数 } T_i^r = \int_a \dot{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \dot{Z} ds,$$

$$\text{反射系数 } R_i^r = \int_a \dot{E}_b \times \Phi_{00}^{r*} \cdot \dot{Z} ds - A^r,$$

其中  $p=q=0$  时  $i=1$ , 此时其对应的 Floquet 模代表平面波,  $i \geq 2$  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。  $Z_{pq}^r$  表示任意  $i$  阶 Floquet 模的等效模阻抗,  $\Phi_{pq}^r$  是一组完备正交的 Floquet 模式。

将周期表面中每四个相邻的 Y 孔单元看作一个周期单元, 孔径上的未知电场  $\dot{E}_b$  选择子域基中的 rooftop 基函数将积分方程中的未知量展开。然后用 Galerkin 方法将积分方程转化为线性方程, 对线性方程求解可得出未知电场的展开系数, 进而可以得到自由空间的传播系数。

图 5 给出了不同极化方式入射波为  $30^\circ$  入射角时, 改进 FSS 结构的频率响应计算值。TE 波入射时在 11 GHz 的频率发生谐振, -2 dB 传输带宽为 1.1 GHz, 中心透过率的传输损耗为 -0.43 dB; TM 波入射时, -2 dB 传输带宽为 1.1 GHz, 11.2 GHz 频点处传输损耗为 -0.68 dB, 仅增加 0.25 dB, 说明改进结构的极化稳定性很好。

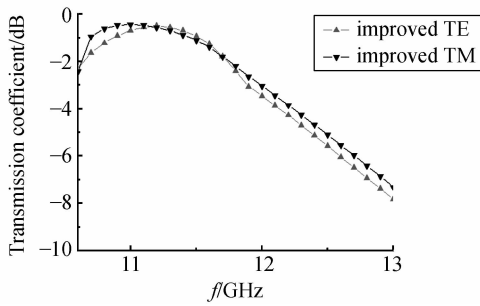


图 5 改进的 FSS 的频率响应计算值

Fig. 5 Calculated result of frequency response of improved FSS

### 3.3 实验结果

采用镀膜和光刻技术,制备了 Y 孔的传统和

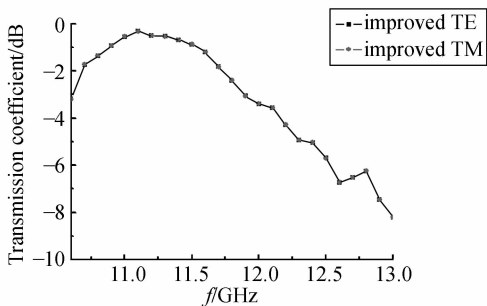


图 6 改进的 FSS 的频率响应测试值

Fig. 6 Measured result of frequency response of improved FSS

改进排列的 FSS 实验样件,在微波暗室中分别对不同极化方式的电磁波  $30^\circ$  入射时进行测试。测试结果在图 6 中给出。

## 4 结 论

图 5 与图 3 是相同参数设置的 FSS 的频率响应特性仿真曲线,可以明显地看出在入射波源极化方式改变时,改进后的结构具有更优的传输特性。改进的 FSS 结构对于 TE、TM 极化获得几乎相同的传输特性,中心频率 11 GHz 处的传输损耗由原来的  $-0.43$  dB 变为  $-0.68$  dB,仅增大  $0.25$  dB,比传统结构的中心频率点传输损耗改变值小很多。实验测试结果对于 TE、TM 极化获得完全相同的值,与计算结果基本一致,在  $11.1$  GHz 的频率发生谐振,  $-2$  dB 传输带宽为  $1$  GHz。

计算和测试结果均表明:当波源的极化方式改变时,改进排列的 FSS 设计对波源的极化是不敏感的。这种 FSS 设计可以应用在入射波源极化方式未知的情况,对已知极化方式的入射波,也可以省略进行 FSS 取向选择的步骤。此方法也可用于 Y 环等图形单元的 FSS,用以改善 FSS 频率响应对波源极化方式的稳定性。

## 参考文献:

- [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] CHEN C C. Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1973,21(1): 1-6.
- [4] WAHID M, MORRIS S B. Band pass radomes for reduced RCS[J]. *Antenna Radar Cross-Section, IEE Colloquium on*, 1991, 4: 1-9.
- [5] 卢俊,孙贯成,蔡红星. 远红外频率选择表面的传输特性分析[J]. *光电工程*,2006,33(6): 41-44.  
LU J, SUN G CH, CAI H X. Transmission characteristics of far-infrared frequency selective surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2006,33(6): 41-44. (in Chinese)
- [6] 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[J]. *红外与毫米波学报*,2005,24(1): 27-30.  
WANG H Q, LV M Y, WU ZH. Experiment on the influence of dielectric loading on transmission properties of frequency selective surfaces[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005,24(1): 27-30. (in Chinese)
- [7] 李小秋,高劲松. Y 环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响[J]. *光学精密工程*,2006,14(6): 1070-1075.  
LI X Q, GAO J S. Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1070-1075. (in Chinese)

- [8] 侯新宇,张澎,卢俊,等.一种双曲率雷达罩的频率选择表面分片设计[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(1):123-125.  
HOU X Y, ZHANG P, LU J, *et al.*. A novel frequency selective surface patch design for double curved radome [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 123-125. (in Chinese)
- [9] HE B, SUN L CH. Effects of fabricated error on transmission performance of double layer frequency selective surface configuration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5): 599-603.
- [10] 卢俊,张靓,孙连春.Y形和Y环形单元特性的试验对比研究[J]. 光学精密工程,2005,13(2): 219-224.  
LU J, ZHANG J, SUN L CH. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 219-224. (in Chinese)
- [11] AU P W B. Parametric study of tripole and triplloe loop arrays as frequency selective surfaces[J]. *IEE Proceedings*, 1990, 137(5): 263-268.

**作者简介:**贾宏燕(1980—),女,山东泰安人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为薄膜光学与频率选择表面的设计等。E-mail: jiayanzi0928@126.com

**通讯作者:**高劲松(1968—),男,吉林长春人,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为薄膜光学与镀膜、光刻及隐身技术等。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn