

文章编号 1004-924X(2006)06-1070-06

Y 环单元 FSS 结构参数对频率特性的影响

李小秋^{1,2}, 高劲松¹

(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:利用谱域分析法,从 Y 环单元的臂长、臂宽、缝宽、加载介质的厚度及介电常数等方面,研究了 Y 环单元频率选择表面(Frequency Selective Surface 简称 FSS)结构参数对其频率响应特性的影响;采用镀膜和光刻技术制备出了相应的实验件,并在微波暗室进行测试,测试值与计算值基本一致。结果表明:臂长主要影响中心频率,臂长从 3.8 mm 增大到 4.7 mm 时,中心频率从 11.9 GHz 下降到 8.9 GHz;单元间距主要影响带宽,单元间距从 0.3 倍波长增大到 0.5 倍波长时,-3 dB 带宽从 3.2 GHz 减小到 1.0 GHz;臂宽和缝宽在影响中心频率的同时也影响带宽;介质加载主要使中心频率降低,但是中心频率并非随着介质层厚度的增加单调减小;加载介质的厚度和介电常数都影响中心频率,但中心频率对介电常数的变化更为敏感;介质加载也影响中心频率处的功率传输,如果对加载介质进行合理的匹配能改善 FSS 的传输特性。

关键词:频率选择表面;中心频率;带宽

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A

Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response

LI Xiao-qiu^{1,2}, GAO Jin-song¹

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

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Effects of the parameteristics of Y loop element on the frequency response characteristics of frequency selective surface (FSS) were studied by spectral domain method, especially in the thickness and permittivity of the loading dielectric. With filming technology and lithography, the corresponding FSS was produced. And the tests of it in the microwave darkroom were given. The agreement between the calculated and measured is good. The results show that, the arm length mainly influences the center frequency, which increases from 3.8 mm to 4.7 mm, the center frequency decreases from 11.9 GHz to 8.9 GHz. The space between the elements mainly influences the bandwidth, which increases from 0.3 wavelength to 0.5 wavelength, the bandwidth decreases from 3.2 GHz to 1.0 GHz. The arm width and the slot width influence the center frequency as well as the bandwidth. The center

收稿日期:2006-04-05;修订日期:2006-10-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60478035)

frequency of FSS decreases along with the dielectric loading, but it does not decrease at all times. The center frequency is influenced by the dielectric thickness and dielectric permittivity, but the latter does much more. The dielectric loading can also influence the transmission power at the center frequency, the appropriate dielectric thickness and dielectric permittivity can stabilize the FSS transmission characteristics as the angle of incidence and the polarization are varied, and it can improve the transmission characteristics of FSS.

Key words: frequency selective surface; center frequency; bandwidth

1 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surface 简称 FSS)能够较好的控制电磁波的传输和散射,使入射电磁波发生全反射或全透射。实际上, FSS 就相当于一个对入射角、极化方式、频率等均有作用的空间滤波器^[1]。FSS 在微波、红外直至可见光波段都具有广泛的应用,将 FSS 制备在飞行兵器雷达罩上,以实现飞行兵器雷达舱的隐身是 FSS 在微波波段极为重要的应用^[2-3]。Y 单元和 Y 环单元形状简单,工艺精度也很容易达到,对任意极化的情况都能够应用,带宽比较窄,中心频率对入射角的变化也比较稳定,适合用在三角形格子排列的结构^[4]。而大部分雷达罩的外形都是锥面,由于表面要求周期性的原因,希望 FSS 单元使用三角形格子排列,所以 Y 单元和 Y 环单元最适合使用在雷达罩上^[5]。在通常情况下环形单元在角度稳定性和极化稳定性方面要明显优于孔径型单元,因此, Y 环单元 FSS 更适合于用在飞行兵器雷达罩上^[6]。卢俊^[2]等通过试验对 Y 形单元和 Y 环单元进行了对比研究,主要从中心频率、带宽随介质衬底厚度、入射角度、不同极化方式的变化出发,讨论了 Y 环单元和 Y 形单元的稳定性;MUNK^[1]对 Y 环单元 FSS 的传输特性进行了简单的介绍。本文利用谱域分析方法,从 Y 环单元的臂长、臂宽、缝宽、排列以及介质加载等方面,研究了 Y 环单元 FSS 结构参数对其频率响应特性的影响,并采用镀膜和光刻技术制备出相应的试验件,在微波暗室进行测试,对所得的理论结果进行验证,从而为雷达罩上应用 FSS 技术提供可靠的单元图形选择依据。

2 理论分析

先考虑自由空间的孔径型 FSS,如图 1 所示。

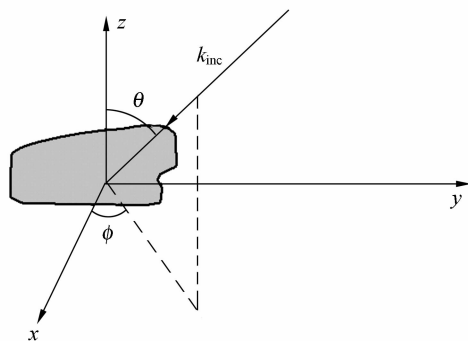


图 1 FSS 分析的基本几何形状

Fig. 1 Basis geometry for FSS analysis

利用电磁场中的二重性原理,假设 \mathbf{M} 是孔径单元由入射场激励起的感应磁流,则单个单元的散射场可以表示为

$$\mathbf{H}^s(x, y) = -j\omega\epsilon_0 \mathbf{F}(x, y) + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)), \quad (1)$$

在 FSS 单元孔径表面利用磁场的边界条件 $\mathbf{H}_t = \mathbf{H}_t^i + \mathbf{H}_t^{\text{inc}} = 0$, 并应用傅里叶变换,其中下标 t 表示切向磁场,则可得到谱域表达式

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega\mu_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \times \tilde{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} \tilde{M}_x \\ \tilde{M}_y \end{bmatrix} e^{j\alpha x} e^{j\beta y} d\alpha d\beta, \quad (2)$$

当 $k_0^2 > \alpha^2 + \beta^2$ 时

$$\tilde{\mathbf{G}} = \frac{-j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2}} \mathbf{I}, \quad (3)$$

由于 FSS 是二维周期结构,利用 Floquet 定理可得

$$\mathbf{M}(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_m e^{j(2m\pi/a + k_x^{\text{inc}})x}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_n e^{j(2n\pi/b + k_y^{\text{inc}})y}. \quad (5)$$

式(4)中, k_x^{inc} 表示在 x 方向的入射波数, a 表示

在 x 方向的周期;式(5)中, k_y^{inc} 表示在 y 方向的入射波数, b 表示在 y 方向的周期。

将式(3)、(4)、(5)代入式(2),有

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x,y) \\ H_y^{\text{inc}}(x,y) \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \times \tilde{\mathbf{G}}(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{nm}x} e^{j\beta_{nm}y}, \quad (6)$$

式(6)中, $\alpha_{nm} = \frac{2m\pi}{a} + k_x^{\text{inc}}$

$$\beta_{nm} = \frac{2n\pi}{b\sin\Omega} - \frac{2m\pi}{a} \cot\Omega + k_y^{\text{inc}}.$$

Ω 是 FSS 两个周期方向的夹角。对于有介质加载的情况,只需将自由空间的格林函数 $\mathbf{G}(x, y)$ 换成有介质加载时的格林函数即可^[7]。用矩量法求解方程(6),基函数选用子域基函数中的 Rooftop(具体可参考文献[8]),就可以求出等效磁流,进而可以求出反射系数和透射系数。

3 计算结果及分析

3.1 单元尺寸对 FSS 频响特性的影响

如 Y 环单元的尺寸示意图(图 2)所示,取 $W = 2 \text{ mm}$, $W' = 0.5 \text{ mm}$, $d = 0.75 \text{ mm}$, 正三角形排列,单元间距取 0.35 倍波长,介质厚度为 1.5 mm,介电常数为 3,臂长 L 依次取 3.8 mm, 4.3 mm, 4.7 mm, 则入射平面波在正入射下的计算结果如图 3 所示。当 L 取 3.8 mm 时,中心频率在 11.9 GHz,随着臂长的增加,中心频率往低漂移,当 L 取 4.7 mm 时,中心频率下漂到 8.9 GHz,带宽则基本上不随臂长的增加而变化。

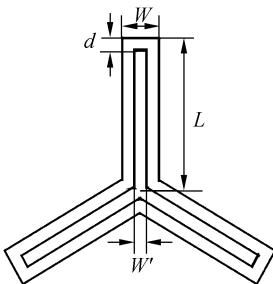


图 2 Y 环单元尺寸示意图

Fig. 2 Dimensions of Y loop element

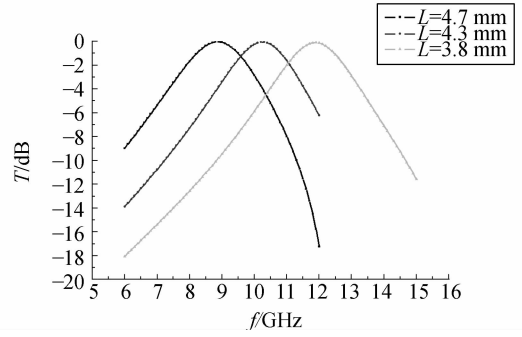


图 3 正入射下不同臂长的 Y 环单元 FSS 的频率响应特性曲线, $\phi = 90^\circ$

Fig. 3 Curves of frequency response in various arm length under the perpendicularity incidence, $\phi = 90^\circ$

表 1 FSS 频响特性随着臂宽的变化

Tab. 1 Frequency response characteristic change with arm width

臂宽 W (mm)	中心频率 (GHz)	-3 dB 带宽 (GHz)
1.0	9.2	0.9
1.5	9.7	1.6
1.8	10.2	2.2
2.0	10.2	2.4

固定臂长 $L = 4.3 \text{ mm}$, $W' = 0.5 \text{ mm}$ 不变, 改变臂宽 W , 在入射平面波正入射时 FSS 的频响特性随着臂宽的变化如表 1。 W 取 1.5 mm 时中心频率在 9.7 GHz, -3 dB 带宽为 1.6 GHz, 随着臂宽的增大, 中心频率往高漂移, 带宽变宽, 并且随着 W 的增大, 中心频率和带宽的变化速度都逐渐变慢。

臂长 $L = 4.3 \text{ mm}$, 臂宽 $W = 2 \text{ mm}$, 改变缝宽 d , 入射平面波正入射时 FSS 的频响特性随着缝宽的变化如表 2。当缝宽 $d = 0.25 \text{ mm}$ 时, 中心频率在 8.7 GHz, -3 dB 带宽 1.5 GHz, 随着缝宽的增大, 中心频率基本上是线性变大, 而带宽的变化速度则逐渐变慢。

表 2 FSS 频响特性随着缝宽的变化

Tab. 2 Frequency response characteristic change with slot width

缝宽 d (mm)	中心频率 (GHz)	-3 dB 带宽 (GHz)
0.25	8.7	1.5
0.50	9.5	2.2
0.75	10.2	2.4

FSS 的频响特性主要由单元决定,但是 FSS 单元的排列方式也会直接影响到 FSS 的频响特性。对于 Y 形单元和 Y 环单元,由于其本身的单元形状特点使得其最适合使用正三角形排列^[1]。在正三角形排列的情况下,改变单元间距,则入射平面波正入射时其频率的变化如图 4 和表 3,其中 λ_0 表示 $f=f_0$ 时空气中的波长。随着单元间距的增大,带宽变窄,中心频率基本上不产生漂移。但随着单元间距的变大,FSS 传输特性随入射角度的稳定性会变差,栅瓣也越容易出现,一般单元间距最大不能超过 0.5 倍波长。

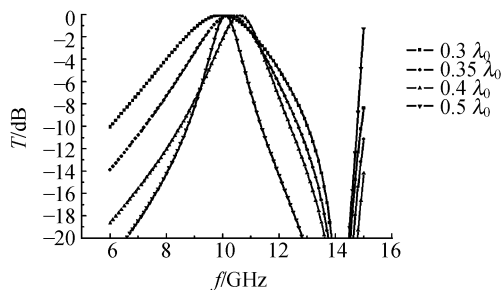


图 4 正入射下不同单元间距的 Y 环单元 FSS 的频率响应特性曲线, $\phi=90^\circ$

Fig. 4 Curves of frequency response in various gaps under the perpendicularity incidence $\phi=90^\circ$

表 3 FSS 频响特性随着单元间距的变化

Tab. 3 Frequency response characteristic change with gaps

单元间距 (波长 λ_0)	中心频率 (GHz)	-3dB 带宽 (GHz)
0.30	9.9	3.2
0.35	10.2	2.3
0.40	10.6	1.5
0.50	10.1	1.0

3.2 介质加载对 FSS 频响特性的影响

在实际应用中,FSS 必须有介质衬底做支撑,FSS 可以附着在介质层表面或者夹在介质层中间,介质衬底会对 FSS 产生重要的影响。图 5 所示是正入射时不同介质厚度的 Y 环单元 FSS 的频响特性曲线。由于介质的加载效应,当介质厚度为 4 mm 时,中心频率处传输损耗为 -1.5 dB,这是由于介质加载的失配造成的传输功率损耗,随着介质厚度的增大,传输损耗逐渐变小,当厚度达到一定值后又近似无耗传输;中心频率并非随介质层厚度的增加单调减小,而是先很快增大,然

后再慢慢减小。图 6 是正入射时不同介电常数的 Y 环单元 FSS 的频响特性曲线。随着介电常数的增加,中心频率往低漂移,并且变化的速度比随厚度的变化要快得多。若对加载介质的厚度和介电常数进行合理的选择,能大大改善 FSS 的传输特性。

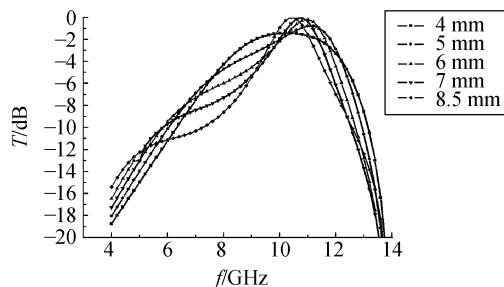


图 5 正入射下不同介质厚度的 Y 环单元 FSS 的频率响应特性曲线, $\phi=90^\circ$

Fig. 5 Curves of frequency response in various dielectric thickness under the perpendicularity incidence, $\phi=90^\circ$

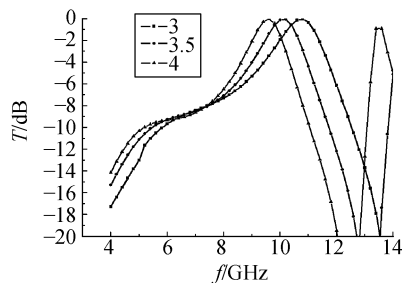


图 6 正入射下不同介电常数的 Y 环单元 FSS 的频率响应特性曲线, $\phi=90^\circ$

Fig. 6 Curves of frequency response in various dielectric permittivity under the perpendicularity incidence, $\phi=90^\circ$

4 实验

在大小为 500 mm×500 mm、厚度为 1.5 mm 的聚酯板(介电常数为 3.0,损耗正切小于 0.02)上采用真空镀膜技术,镀上铜膜,然后在硫酸铜溶液中进行电镀,使铜膜厚度达到 15 μm 。采用光刻技术刻蚀出 Y 环单元 FSS 图形^[9]。将制备好的实验件在微波暗室进行了近场测试,图 7 是微波暗室内的一套测试系统。图 8 是入射平面波

正入射时的测试曲线,此时 $W=2\text{ mm}$, $W'=0.5\text{ mm}$, $d=0.75\text{ mm}$, $L=4.3\text{ mm}$, 正三角形排列, 单元间距取 0.35 倍波长, 从测试曲线可以看出, 测试值与计算值基本一致。

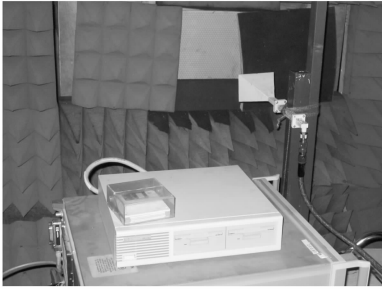


图 7 测试系统

Fig. 7 Measuring system

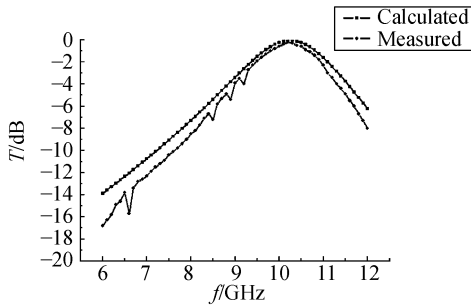


图 8 理论计算和实验结果比较

Fig. 8 Comparison between calculated values and measured results

5 结 论

本文利用谱域分析方法,从 Y 环单元的臂长、臂宽、缝宽、加载介质的厚度及介电常数等方面,研究了 Y 环单元 FSS 结构参数对其频率响应特性的影响;并采用镀膜和光刻技术制备出相应的实验件,在微波暗室进行测试,测试值与计算值基本一致。经过研究发现,Y 环单元的臂长影响中心频率,臂长从 3.8 mm 增大到 4.7 mm 时,中心频率从 11.9 GHz 下降到 8.9 GHz。臂宽和缝宽在影响中心频率的同时也影响带宽,随着缝宽的增大,中心频率基本上是线性变大,而带宽的变化速度则逐渐变慢,臂宽增大到 1.8 mm 时,中心频率和带宽的变化速度逐渐变慢。单元间距主要影响带宽,单元间距从 0.3 倍波长增大到 0.5 倍波长时,-3 dB 带宽从 3.2 GHz 减小到 1.0 GHz,中心频率基本上不受影响,但单元间距过大会影响 FSS 的角度稳定性,并容易出现栅瓣。加载介质主要使得中心频率降低,介质厚度和介电常数都影响中心频率,但中心频率对介电常数的变化更为敏感;介质加载也影响中心频率处的传输功率,如果对介质厚度和介电常数进行合理的匹配,能大大改善 FSS 的传输特性。FSS 的设计是一个多参数的优选问题,只有对 FSS 的各个参数进行综合考虑,才能达到特定的滤波效果。

参考文献:

- [1] MUNK B A. *Frequency selective surface: theory and design*[M]. New York: Wiley, 2000.
- [2] 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 C. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(2): 219-224. (in Chinese)
- [3] WAHID M, MORRIS S B. Band pass radomes for reduced RCS[J]. *Antenna Radar Cross-Section, IEE Colloquium on*, 1991, 4:1-9.
- [4] 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]. 火箭与制导学报,2006,26(1):123-125.
HOU X Y, ZHANG P, LU J, et al. A novel frequency selective surfaces patch design for double curved radome[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006,26(1):123-125. (in Chinese)
- [5] PELTON E L, MUNK B A. A streamlined radome[J]. *IEEE trans. on Antennas and Propagation*, 1974, 32(6): 799-803.
- [6] 约翰.克劳斯,章文勋译. 天线(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
KRAUS J D, ZHANG W X Translated. *Antennas: for all applications (third edition)*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2005. (in Chinese)

- [7] WU T K. *Frequency selective surface and grid array*[M]. New York: Wiley, 1995.
- [8] GLISSON A W, WILTON D R. Simple and efficient numerical methods for problems of electromagnetic radiation and scattering from surfaces[J]. *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, 1980, 28(5):593-603.
- [9] 张立国,陈迪. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. *光学精密工程*,2002,10(3):266-269.
ZHANG L G, CHEN D. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 266-269. (in Chinese)

作者简介:李小秋(1980—),男,湖南隆回人,现为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,周期性结构的单元图形选择,频率选择表面的设计等。E-mail: xqiu12@126.com