

一种适用于雷达罩的频率选择表面新单元研究^{*}

李小秋^{1)†} 高劲松¹⁾ 赵晶丽¹⁾ 孙连春¹⁾

1) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 12 月 30 日收到, 2008 年 2 月 20 日收到修改稿)

从传统的频率选择表面(frequency selective surface, 简称 FSS)Y 孔单元出发, 提出了一种新单元. 经优化设计, 给出了 Y 孔单元和新单元的 FSS 结构参数. 运用谱域 Galerkin 法对两种单元 FSS 的传输特性进行了数值计算. 采用镀膜和光刻技术制作出相应的等效平板样件, 在微波暗室对两种 FSS 等效平板在 8—12 GHz 频段内的传输特性进行了测试, 测试值与计算值基本一致. 结果表明: 与 Y 孔单元相比, 新单元 FSS 在电磁波大角度(66°)入射时具有高的透过率, 在电磁波大扫描角范围内(0°—66°)新单元 FSS 中心频率的漂移量更小. 因此, 所提出的新单元更适合于电磁波大角度入射下的应用, 为 FSS 在曲面雷达罩上的应用提供了一种新单元.

关键词: 频率选择表面, 中心频率, 雷达罩

PACC: 7300, 7360

1. 引言

频率选择表面(frequency selective surfaces, 简称 FSS)是由特定形状的单元图形构成的一种二维周期阵列结构^[1, 2]. FSS 已经在微波、红外直至可见光波段得到广泛应用及其深入研究^[3-5]. 采用 FSS 制作飞行兵器隐身雷达罩是目前国内外相关学者的研究热点^[6, 7].

大曲率流线型雷达罩的 FSS 设计是目前工程应用上的一个技术瓶颈. Y 孔单元形状简单, 工艺精度容易达到, 滤波特性较好, 在雷达罩上应用较为广泛. 但应用到曲率较大的流线型雷达罩时, 存在透过率较低和中心频率漂移的问题, 导致雷达罩的性能下降. 本文从 Y 孔单元出发, 提出了一种新型 FSS 单元, 为 FSS 的深入研究, 特别是为 FSS 在电磁波大角度入射曲面流线型雷达罩上的应用提供了可靠的单元图形选择依据.

2. 原理

利用电磁场中的二重性原理, 假设 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

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

假设 FSS 屏为理想导体(PEC), 则 FSS 单元孔径表面 $H_t = H_t^s + H_t^{\text{inc}} = 0$, 其中下标 t 表示切向磁场, 应用傅里叶变换, 则可得到谱域表达式:

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

其中 $\tilde{G}$ 为谱域并矢格林函数, 与介质衬底的电参数有关. 由于 FSS 是二维周期结构, 利用 Floquet 定理可得

$$M(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_m e^{j(2m\pi/a + k_x)x}, \quad (3)$$

$$M(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{M}_n e^{j(2n\pi/b + k_y)y}, \quad (4)$$

$$k_x = k_0 \sin\theta \cos\phi, \quad (5)$$

$$k_y = k_0 \sin\theta \sin\phi, \quad (6)$$

其中 k_x 和 k_y 是由扫描角决定的 Floquet 传播常数, a 和 b 分别表示沿 x 轴和 y 轴方向的周期长度, k_0

^{*} 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(批准号: 20063004)资助的课题.

[†] E-mail: xqiu12@126.com

表示自由空间的传播常数, $\tilde{M}_m$ 和 $\tilde{M}_n$ 是傅里叶级数的系数^[8].

将(3)和(4)式代入(2)式,有

$$-\begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x,y) \\ H_y^{\text{inc}}(x,y) \end{bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 ab} \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{mn}^2 & -\alpha_{mn}\beta_{mn} \\ -\alpha_{mn}\beta_{mn} & k_0^2 - \beta_{mn}^2 \end{bmatrix} \times \tilde{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} \tilde{M}_x(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \\ \tilde{M}_y(\alpha_{mn}, \beta_{mn}) \end{bmatrix} e^{j\alpha_{mn}x} e^{j\beta_{mn}y}, \quad (7)$$

由于 FSS 阵列是二维周期结构,由傅里叶变化的性质可知, α, β 不再是连续的值,变为 α_{mn}, β_{mn} , 他们对应相应的 Floquet 谐波. 其表达式为

$$\alpha_{mn} = \frac{2m\pi}{a} + k_x,$$
$$\beta_{mn} = \frac{2n\pi}{b\sin\Omega} - \frac{2m\pi}{a}\cot\Omega + k_y,$$

其中 Ω 是 FSS 两个周期方向的夹角, $\tilde{\mathbf{G}}(\alpha_{mn}, \beta_{mn})$ 为谱域并矢格林函数^[9]. 用矩量法求解方程(7),基函数选用子域基函数中的 Rooftop(具体可参考文献[9,10])就可以求出等效磁流 $\mathbf{M}$,进而可以求出反射系数和透射系数.

3.FSS 设计

图 1 为一种曲面雷达罩的几何外形示意图.其中 L 为雷达罩在 z 方向的长度.雷达罩的外形为对称旋转面,罩壁为变壁厚实心半波壁.内外表面的母线方程均给定,为 x, y 的函数 $R(x, y)$.由母线方程可以建立求解雷达罩母线上各点入射角大小的数学模型,用 Matlab 进行编程计算,即可求出母线上各点的入射角度.图 2 是某雷达罩母线上各点的入射角变化曲线.从曲线可以看出,入射角度的范围在 $0^\circ\text{--}66^\circ$ 之间.

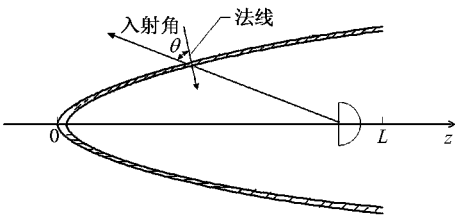


图 1 大角度入射曲面雷达罩几何外形

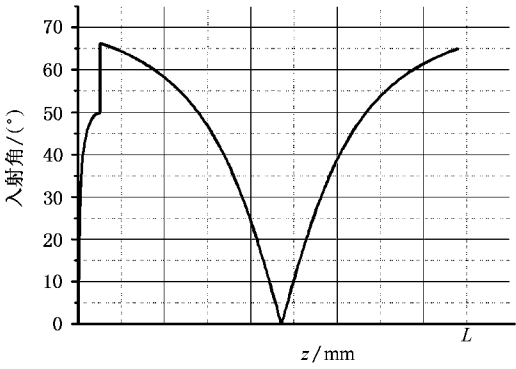


图 2 某雷达罩电磁波入射角度曲线

定单元的形状及尺寸.Y 孔单元形状简单,工艺精度容易达到,适合三角形格子排列.电磁波大角度入射时,Y 孔单元 FSS 透过率较低,中心频率漂移量较大.图 3 所示是 FSS 的仿真分析模型,其衬底参数为 $\epsilon_1 = 3.8, \tan\delta_1 = 0.003, h_1 = 9\text{ mm}; \epsilon_2 = 3, \tan\delta_2 = 0.02, h_2 = 0.02\text{ mm}; \epsilon_3 = 3.5, \tan\delta_3 = 0.02, h_3 = 0.0254\text{ mm}$.图 4 是针对某雷达罩设计的 Y 孔单元 FSS 的参数.图 5 是 Y 孔单元的传输系数曲线,可见 TE 极化波 66° 入射时,Y 孔单元 FSS 的透过率为 -0.82 dB ,在电磁波大扫描角范围内($0^\circ\text{--}66^\circ$),中心频率漂移 400 MHz .

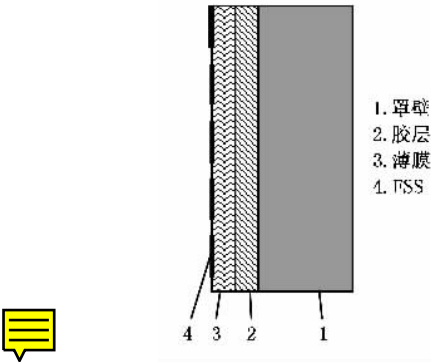


图 3 FSS 的仿真分析模型

箭头形孔径在外形上和 Y 孔单元有相似性,并且经过分析发现,在 Y 孔单元三个臂端加载箭头形的孔径,可以改变 Y 孔单元三个臂端的磁流分布.这种新型单元在外形上具有与 Y 孔单元相同的优点.图 6 是针对某雷达罩设计的新型单元 FSS 的参数,其中箭头的拐角为 60° ,长度为 1.2 mm ,宽度为 0.5 mm ,仿真分析模型以及衬底参数与 Y 孔单元相同.图 7 是这种新型单元 FSS 的传输系数曲线.可见 TE 极化波 66° 入射时,透过率为 -0.52 dB ,在电磁波大扫描角范围内($0^\circ\text{--}66^\circ$),中心频率漂移 200 MHz .

FSS 结构中,需要对参数不断进行优化,才能确

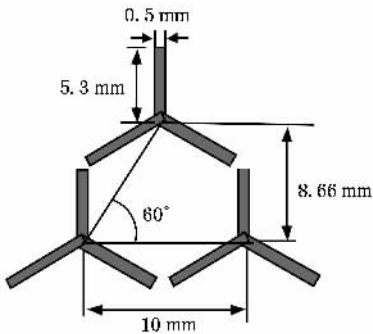


图4 Y孔单元 FSS 阵列参数

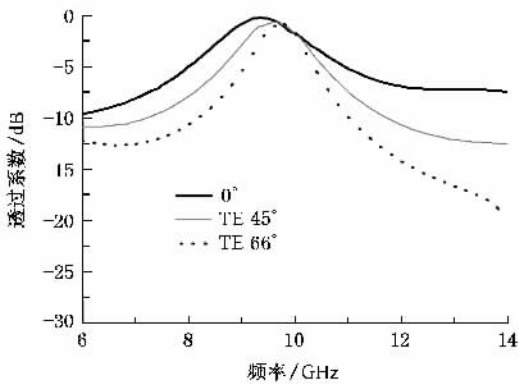


图5 Y孔单元 FSS 传输系数曲线 $\phi = 90^\circ$

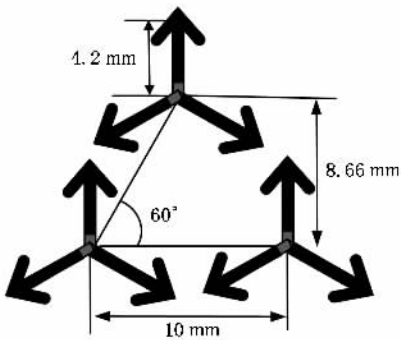


图6 新型单元 FSS 阵列参数

其传输特性较 Y 孔单元 FSS 的传输特性有很大改善.

4. 等效平板制作与透波特性测试

用于制作等效平板的材料应与雷达罩的电参数接近.经过调研,选取一种石英玻璃材料制作等效平板,大小为 500 mm × 500 mm,其电参数以及厚度与仿真分析模型中的罩壁相同.采用镀膜和光刻技

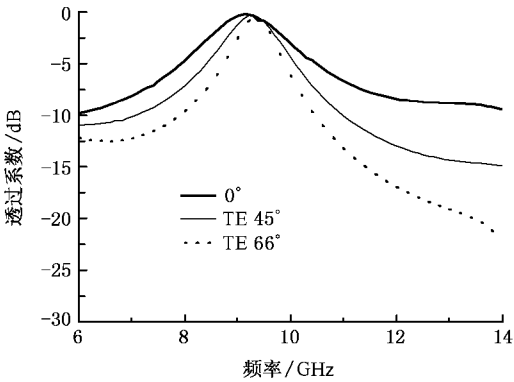


图7 新型单元 FSS 传输系数曲线 $\phi = 90^\circ$

术^[11],在大小 500 mm × 500 mm 的聚酰亚胺薄膜上镀上加厚的铜膜(大约为 200 nm),然后再在硫酸铜溶液中进行电镀,使铜膜厚度达到 15 μm,聚酰亚胺薄膜的电参数以及厚度与仿真分析模型中的薄膜相同.采用光刻技术刻蚀出这种新型单元 FSS 图形.用航空胶将聚酰亚胺膜与等效平板粘合牢固,即形成相应的实验件,其中航空胶的电参数以及厚度与仿真分析模型中的胶层相同.

将制备好的实验件在微波暗室进行测试,测试系统主要包括矢量网络分析仪和两个双脊喇叭天线及转台.测试分两步:1)测试并记录无实验件时接收信号的幅度和相位,建立参考基准;2)插入实验件,测试接收信号的幅度和相位,将它们分别与参考基准相减得到实验件插入损耗和插入相位移.图 8 所示这种新型单元 FSS 的测试曲线.从测试曲线可以看出,测试值与计算值基本一致.

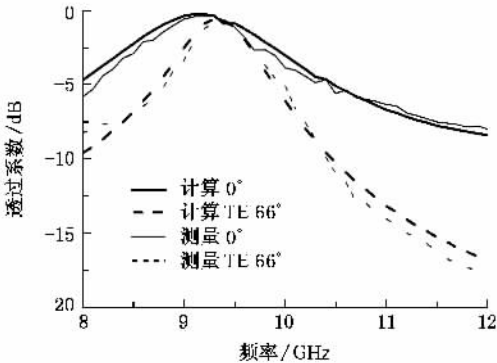


图8 测试曲线

5. 结 论

本文从 Y 孔单元出发,提出了一种 FSS 新单元.运用谱域 Galerkin 法对这种新型单元 FSS 的传

输特性进行了数值计算. 经过优化, 设计出 FSS 参数, 采用镀膜和光刻技术制作出相应的等效平板实验件, 并在微波暗室对实验件进行了测试.

计算及实验结果表明, 这种新型单元 FSS 在 TE 极化波 66° 入射时, 透过率为 -0.52 dB; 在 TE 波 0° — 66° 入射时中心频率的漂移量为 200 MHz. Y 孔单

元 FSS 在 TE 波 66° 入射时, 透过率为 -0.82 dB; 在 TE 波 0° — 66° 入射时中心频率的漂移量为 400 MHz. 说明这种新型单元 FSS 在大角度入射时具有比 Y 孔单元更高的透过率, 在电磁波大扫描角范围内中心频率的漂移量更小, 更适合于应用在电磁波大角度入射曲面流线型雷达罩.

- [1] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surface : Theory and Design* (New York : Wiley)
- [2] Wu T K 1995 *Frequency Selective Surface and Grid Array* (New York : Wiley)
- [3] Lu J , Sun G C , Cai H X 2006 *Opto-Electronic Engineering* **33** 41 (in Chinese) [卢 俊、孙贵成、蔡红星 2006 光电工程 **33** 41]
- [4] Lu J , Zhang J , Sun L C 2005 *Optics and Precision Engineering* **13** 219 (in Chinese) [卢 俊、张 靛、孙连春 2005 光学精密工程 **13** 219]
- [5] Lin B Q , Xu L J , Yuan N C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3711 (in Chinese) [林宝勤、徐利军、袁乃昌 2005 物理学报 **54** 3711]
- [6] He B , Cong Y L 2006 *Optics and Precision Engineering* **14** 704 (in

Chinese) [何 斌、丛玉良 2006 光学精密工程 **14** 704]

- [7] Jia H Y , Feng X G , Gao J S 2007 *Optics and Precision Engineering* **15** 978 (in Chinese) [贾宏燕、冯晓国、高劲松 2007 光学精密工程 **15** 978]
- [8] Zheng Q R , Fu Y Q , Lin B Q , Yuan N C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4698 (in Chinese) [郑秋容、付云起、林宝勤、袁乃昌 2006 物理学报 **55** 4698]
- [9] Mittra R , Chan C C , Cwik T 1988 *Proceedings of the IEEE* **76** 1593
- [10] Glisson A W , Wilton D R 1980 *IEEE Trans. Antennas Propagate* **28** 593
- [11] Zhang L G , Chen D 2002 *Optics and Precision Engineering* **10** 266 (in Chinese) [张立国、陈 迪 2002 光学精密工程 **10** 266]

A novel element of frequency selective surface for radome ^{*}

Li Xiao-Qiu^{1,2†} Gao Jin-Song¹⁾ Zhao Jing-Li¹⁾ Sun Lian-Chun¹⁾

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

2) (Graduate School of Chinese University of Sciences , Beijing 100049 , China)

(Received 30 December 2007 ; revised manuscript received 20 February 2008)

Abstract

Based on the Y element , a novel element for the Frequency selective surface (FSS) is presented in this paper. The transmission characteristics of Y element FSS and the novel element FSS is calculated using Galerkin 's method in the spectral domain , and the optimum parameters of the FSS is obtained. The corresponding equivalent FSS sample plate was fabricated. It 's transmission characteristics were measured by microwave network analyzer at 8—12 GHz. The agreement between the calculated and measured values was good. The results show that , the novel element FSS has excellent transmission characteristic at large-angle incidence , the transmission coefficient is -0.52 dB at TE 66° incidence. From 0° to 66° TE incidence , the drift of the resonant frequency is 200 MHz. Meanwhile the transmission coefficient of Y element FSS is -0.82 dB at TE 66° incidence , and from 0° to 66° TE incidence , the drift of the resonant frequency is 400 MHz. Therefore , the novel element FSS is more suitable than Y element FSS for the application in large-angle incidence curved streamlined radome.

Keywords : frequency selective surface , resonant frequency , radome

PACC : 7300 , 7360

^{*} Project supported by CAS Innovation Program (Grant No. 20063004).

[†] E-mail : xqiu12@126.com